НАУКА ЮУрГУ

МАТЕРИАЛЫ
66-Й
НАУЧНОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ

СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет

Ч48
Н34

НАУКА ЮУрГУ

Материалы 66-й научной конференции

СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2014

ББК Ч481.46.я43 + Ч215.1.я43
Н34

Оргкомитет 66-й научной конференции

Ваулин С.Д. (председатель), Рождественский Ю.В., Спасибожко В.В., Шабиев С.Г., Сафонов Е.В., Карпов А.Н., Радченко Г.И., Шестеркина Л.П., Парфентьева Н.Д., Хомутова Т.Н., Келлер А.В., Горшенин В.П., Гузеев В.И., Майсак В.Н., Казаринов Л.С., Солдатова Е.Л., Кундикова Н.Д., Михайлов Г.Г., Авдин В.В., Шиндина Т.А., Баев И.А., Белоножко А.Т., Классен А.Н., Волошина И.А., Шестакова Л.И., Демин А.А., Эрлих В.В., Окольнишникова И.Ю., Чванова Е.Е., Чуманов В.И., Плаксин О.А., Балахонова И.М., Серко И.А., Борщенюк В.Н., Давыдова О.И., Романов Е.В., Кравцов А.И., Орлова Е.Ю., Шкерина Г.А.

Ответственный за выпуск Ваулин С.Д.

Н 34 **Наука ЮУрГУ** [Электронный ресурс]: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Электрон. текст. дан. (46,3 Мб). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 1 электрон. опт. диск (DVD); 12 см – Системные требования: PC не ниже класса Pentium I; ОЗУ 512 Mb; ОС Windows 2000/XP/Vista/7; Adobe Acrobat Reader; DVD-ROM дисковод. – Загл. с экрана.

Представлены материалы 66-й научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников, которая состоялась в апреле 2014 года.

Отпечатано с авторских оригиналов.

ББК Ч481.46.я43 + Ч215.1.я43

ISBN 978-5-696-04586-3 © Издательский центр ЮУрГУ, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кириллов В.В. Расчет рабочих процессов в рекуператоре микрогазотурбинной установки…….. 22

Кириллов В.В. Расчёт теплового режима генератора микрогазотурбинной установки…….. 27

Карташев А.Л., Кривоногов А.А. Исследование пространственных гидрогазодинамических эффектов в проточной части вихревого расходомера и оценка возможности их численного моделирования…… 33

Карташева М.А., Карташев А.Л. Анализ влияния величины давления внешней среды на газодинамические характеристики кольцевых сопел внешнего расширения…….. 40

Карташева М.А. Методы расчета течений совершенного газа в кольцевых соплах……... 45

Махнович С.В., Визняк Е.А. Сравнительный анализ систем аварийного спасения экипажа космического корабля…… 54

Махнович С.В., Фисивский Н.А. Сравнение классической и соосной компоновочных схем вертолетов……... 60

Пешков Р.А., Сидельников Р.В. Методики расчета газодинамических и ударно-волновых нагрузок на пусковой контейнер в период «раскупорки» 67

Королькова Л.И., Машрабов Н. Непараметрическое оценивание 80-процентного ресурса по результатам незавершенных испытаний…….. 75

Онучин Е.С., Хищенко Ю.М. Оценка динамики вафельной цилиндрической оболочки при поперечном ударном воздействии…….. 80

Махнович С.В., Лисин И.С. Расчет нагруженности конструкции ракеты и пусковой установки при старте с учётом контактных связей ракеты, контейнера и шахты…… 89

Махнович С.В., Овчинников А.М. Расчёт деформирования гофрированной оболочки под действием избыточного давления…… 97

Тараненко П.А., Анчуков В.В., Шакиров А.А. Разработка расчетной трехмерной динамической модели четырехколесного мобильного марсохода с использованием технологий LMS…… 102

Бухмастов М.В., Сидельников Р.В. Разработка методики оценки влияния шума реактивной струи на корпус головной части ракеты-носителя…….. 108

Сергеева А.А., Сидельников Р.В. Исследование влияния нестационарного поперечного обтекания цилиндра на возникновение боковых сил……... 112

Ерпалов А.В., Махнович С.В., Шефер Л.А., Усков П.Н. Выбор рациональных параметров образцов с концентраторами напряжений для усталостных испытаний при консольном изгибе..... 117
Тепляков Ю.Н. Влияние кислородсодержащих сверхзвуковых струй на конструкции стартовых комплексов..... 125
Устиновский Е.П., Вайчулис Е.В. Модернизация учебной лаборатории «Детали машин и основы конструирования» Южно-Уральского государственного университета..... 131
Вайчулис Е.В. Математическое моделирование нестационарных теплогидравлических процессов в каналах энергоустановок с гомогенным рабочим телом..... 136
Прядко Ю.Г., Караваев В.Г. О возможных ошибках при неполных решениях ряда известных задач механики..... 142
Караваев В.Г., Прядко Ю.Г. Особенности решения задач динамики при качении с трением скольжения..... 149
Захезин А.М., Воителев П.Ю. Метод определения параметров трещин при помощи вейвлет-анализа вибросигнала..... 156
Черногоров Е.П. Некоторые вопросы оценки адекватности модели..... 162
Яшков Ю.К., Гусев А.Г., Сяськов Г.Ю., Смолий А.А., Теребов А.С. Динамическая податливость и трибологические характеристики гусеничного хода тракторов..... 168
Исмагилов А.Р., Спиридонов Е.К. Влияние элементов проточной части жидкостно-газового струйного насоса на его степень сжатия и КПД..... 172
Спиридонов Е.К., Хабарова Д.Ф. Гидродинамика и характеристики бесклапанного насоса с гидродиодами..... 181
Назаров Ф.М., Нигматулин Д.Р., Барышев В.И. Повышение работоспособности игольчатых подшипников поршневых насосов эксцентрикового типа..... 187
Лайко К.К. Влияние упрочнения на характеристику объемного растяжения жидкости..... 195
Лайко К.К. Контроль качества рабочих жидкостей по их объемной прочности..... 200
Найгерт К.В., Редников С.Н., Костик Д.А. Преимущества применения прямого электромагнитного управления потоком в прецизионных гидравлических приводах..... 205
Подзерко А.В. Анализ работы систем вакуумирования предприятий металлургии и энергетики..... 212

АВТОТРАКТОРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

Глемба К.В. К вопросу снижения степени тяжести травмирования участников дорожного движения при ДТП..... 218
Леванов И.Г., Герцев В.В. Напряжённо-деформированное состояние и ресурс вкладыша подшипника скольжения коленчатого вала дизеля..... 227
Леванов И.Г., Дойкин А.А. Обзор конструкций тепловых аккумуляторов фазового перехода для системы предпускового подогрева двигателя легкового автомобиля..... 235
Илимбетов Р.Ю., Дернов В.В. Компьютерное моделирование электромеханической трансмиссии грузового автомобиля Урал-4320..... 241
Кукис В.С. Исследование рабочего процесса ДВС с разделенными процессами сжатия и расширения..... 247
Рулевский А.Д. Тенденции и перспективы развития рынка новых автомобилей Челябинской области..... 255
Грабец М.П. Уменьшение вредных выбросов дизелей совершенствованием каталитических нейтрализаторов отработавших газов..... 262
Кондаков С.В., Павловская О.О., Горелый Е.А., Горяев Н.К. Математическое моделирование движения беспилотной гусеничной платформы с бортовой гидростатической трансмиссией..... 267
Кромский Е.И., Юсупов А.А. Техника и технология уплотнения дорожно-строительных материалов..... 275
Разношинская А.В. Повышение эффективности нейтрализации отработавших газов автомобильных двигателей..... 279
Яковлев П.В. Повышение динамических свойств полноприводных автомобилей..... 285
Задорожная Е.А., Караваев В.Г. Алгоритм решение трехмерной неизотермической задачи смазки подшипников скольжения коленчатых валов..... 292
Гаврилов К.В., Дойкин А.А. Экспериментальные и численные исследования триботехнических параметров пары трения «алюминиевый сплав – легированный чугун»..... 300
Лазарев В.Е., Ломакин Г.В., Лазарев Е.А. Оценка уровня нагружения направляющего прецизионного сопряжения распылителя топливной форсунки дизеля использованием CFD-моделирования..... 307
Ломакин Г.В. Методика оценки граничных условий при решении задачи определения теплового состояния поршня двигателя 4ч 8,2/7,56..... 314
Шароглазов Б.А., Гофман А.В. Снижение уровня контактных напряжений в основных элементах механизма преобразования движения бескривошипной поршневой тепловой машины..... 322

Шишков В.В., Бакиев Д.Р. Моделирование внутрицилиндровых процессов для условий пуска дизеля сжатым воздухом..... 329
Алферова И.Д. Использование управляемых дорожных знаков для повышения пропускной способности городских дорог..... 335
Гайфуллин В.М. Алгоритм анализа механизма дорожно-транспортного происшествия..... 342
Городокин В.А. Комментарии к некоторым изменениям, внесенным в постановление совета министров – Правительства Российской Федерации от 23 октября 1993 г. N 1090 «О правилах дорожного движения», от 22 марта 2014 г. N 221..... 345
Альметова З.В., Ларин О.Н. Оценка эффективности магистральных перевозок на основе коэффициента использования пробегов транзитного транспорта..... 351
Хозенюк Н.А., Мыльников А.А., Клюканов Д.О. К определению нагруженности коренных опор коленчатого вала..... 355
Помаз А.Н. Определение газодинамических и геометрических параметров эжектора в системе охлаждения наддувочного воздуха дизеля..... 361

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Ардашев Д.В. Описание механизма износа абразивного зерна с позиций кинетической теории прочности..... 367
Ардашев Д.В., Лебедев С.Н. Пути повышения эффективности УЗК литых деталей для нефтегазовой промышленности..... 375
Батуев В.А., Батуев В.В. Математическая модель зоны резания при многокоординатном фрезеровании..... 381
Валиев Д.Ф., Мясников Ю.И. Универсально-сборные станочные приспособления (УСП) стационарные и приспособления-спутники..... 387
Выбойщик А.В. Разработка интерфейса поискового программного обеспечения с использованием Borland..... 389
Выбойщик А.В. Расчёт неровностей пространственно-сложных поверхностей..... 393
Гузеев В.И. Оптимизация технологических процессов на стадии проектирования и реализации..... 397
Дегтярева А.С., Мясников Ю.И. Принципиальные особенности универсально-сборных приспособлений (УСП)..... 404
Дьяконов А.А., Ковалерова О.В. Особенности проектирования цикла обработки для шлифовальных станков с числовым программным управлением..... 407

Дьяконов А.А., Дегтярева А.С. Задачи и особенности теплофизической модели круглого шлифования с осевой подачей..... 413
Дьяконов А.А. Мировые тенденции в области композитных материалов с микро- и нанодисперсными наполнителями..... 417
Кулыгин В.Л., Кулыгина И.А. Анализ эффективности проектных вариантов технологических процессов с учётом технологических и конструкторских параметров..... 425
Кулыгин В.Л., Кулыгина И.А. Компетентностный подход к преподаванию дисциплин профессионального цикла направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»..... 434
Лошкин А.А., Шамин В.Ю. Тригонометрический калькулятор машиностроителя..... 441
Мясников Ю.И. Метод системного проектирования технологической оснастки на примерах станочных и контрольных приспособлений..... 446
Николаенко А.А. Классификация схем глубинного шлифования для станков с ЧПУ..... 454
Нуркенов А.Х. Производственный метод оценки жесткости технологической системы шлифовального станка..... 460
Переверзев П.П. Принципы проектирования высокопроизводительных циклов обработки на металлорежущих станках..... 463
Пименов Д.Ю. Экспериментальные исследования деревообрабатывающего центра с ЧПУ модальным анализом..... 468
Попова А.В. Методика создания оптимальных циклов обработки на примере внутреннего шлифования..... 475
Сафин В.Н., Нечаев В.М. Особенности нарезания резьбы на резьбошлифовальных станках..... 481
Сазонова Н.С. Задачи и направления совершенствования систем автоматизированного нормирования технологического назначения..... 483
Сырейщикова Н.В. Разработка методики расчета затрат на качество по комбинированной модели..... 491
Сырейщикова Н.В. Использование методики SERVQUAL для адаптивной системы предприятия, ориентированной на потребителя..... 499
Сметанин С.Д., Шаламов В.Г., Нургужин О.К. Моделирование элементной стружки при ротационном фрезеровании..... 507
Сурков И.В. Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений геометрических параметров зубчатых колес и зуборезных инструментов..... 511
Шаламов П.В. Геометрия и прочность отверстий под резьбу, образованных вращающимся пуансоном, в тонколистовых заготовках..... 519

Шаламов В.Г., Сметанин С.Д., Голосников А.И. Определение коэффициента усадки стружки при ротационном фрезеровании…… 527
Шипулин Л.В. Разработка алгоритма CAM-модуля системы ADEM для проектирования операций плоского шлифования периферией круга в виде трехступенчатого цикла…….... 531
Шмидт И.В. Систематика технологий покрытия для изделий машиностроения……... 536
Щуров И.А., Немытова Е.В. Особенности резьбофрезерования на станках с ЧПУ…….... 542
Щурова А.В. Моделирование формообразования цилиндрических поверхностей базированием на обрабатываемую поверхность…….. 547
Абдуллоев Р.Т., Тряпицын А.Б., Сидоров А.И. Особенности конструктивного выполнения заземляющих устройств тяговых подстанций 551
Киселева Л.М. Об опасности при обращении с отходами…… 555
Кудряшов А.В. Влияние энергосберегающего освещения на состояние зрительных функций и организма в целом……. 559
Палатинская И.П., Дружинин П.С., Самойлов С.П. Исследование резонансных частот человека-оператора автотранспортных устройств….. 563
Палатинская И.П. О механизмах управления факторами профессионального риска человека-оператора автотранспортных устройств 567
Солдатов А.И. Изучение адсорбции азотсодержащих гетероароматических углеводородов на углеродной поверхности…… 572
Сидоров А.И., Таваров С.Ш. Применение расчетных карт распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 Кв для защиты линейного персонала 578
Хашковский А.В. Определение значений энергетических показателей взрывоопасности технологических блоков товарно-сырьевой базы при обосновании безопасности……... 582
Буров К.С. Модель взаимодействия образовательных организаций общего и профессионального образования в сфере профориентации……. 589
Волкова М.А. Содействие развитию компетенций следования здоровому образу жизни у магистрантов…….. 594
Котлярова И.О. Программа дополнительного профессионального образования для профессорско-преподавательского состава вузов КНР… 601
Сериков Г.Н. Образование как отношения человека с окружением и с собой 607
Тягунова Ю.В. Связь проектирования образовательно-научного процесса в университете с интегративными процессами в образовании……... 615
Ханжина О.А. Аспекты разработки методики определения скорости забывания информации электробезопасности персонала…….. 620
Попов М.Ю. Специальный ротационный режущий инструмент для фасонных поверхностей…….. 624

ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ (КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ)

Абдуллин В.В. Система управления и контроля качества отопления здания на основе метода идентификации тепловых параметров в реальном времени 627

Басалаев А.А. Прогнозирование потребления тепловой энергии, расходуемой на отопление и горячее водоснабжение..... 633

Барбасова Т.А. Интегрированное управление эффективностью теплоэнергетических комплексов..... 638

Вставская Е.В. Адаптивные системы многозонального управления энерготехнологическими объектами..... 645

Захарова А.А. Метод построения оптимальных графиков электропотребления..... 651

Казаринов Л.С., Колесникова О.В., Барбасова Т.А., Хасанов А.Р. Метод нормирования и прогноза потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия..... 656

Крахмалев Е.И. Моделирование светотехнических характеристик в системах управления наружным освещением..... 660

Крахмалев Е.И. Подход к внедрению распределенной системы управления уличным освещением с применением интеллектуальных регуляторов..... 665

Хасанов А.Р., Барбасова Т.А., Колесникова О.В. Подход к моделированию систем водоснабжения предприятия..... 669

Ахметвалиева А.А. Проблема развития культуры информационно-психологической безопасности будущего специалиста по защите информации в правоохранительной сфере..... 674

Антясов И.С., Соколов А.Н. Комплексная оценка локализации и ослабления электромагнитных волн в замкнутом пространстве альтернативной измерительной площадки..... 678

Заляцкая И.И. Способ компенсации неидентичностей фазовых характеристик каналов приёмника в малогабаритных широкодиапазонных фазовых радиопеленгаторах..... 685

Казимиров А.Н. Генератор сверхширокополосного фрактального сигнала для радиотехнических систем связи..... 690

Комогорова А.Р. Использование ТСО для подготовки студентов кафедры инфокоммуникационных технологий..... 694

Поваляев С.В. Особенности применения DDS-синтезаторов в радиолокационных измерителях малых расстояний..... 698

Бухарин В.А., Войтович Н.И. Исследование характеристик резонаторной антенны..... 704

Войтович Н.И., Ершов А.В. Широкополосная вибраторная антенна с апериодическим рефлектором..... 709
Войтович Н.И., Клыгач Д.С. Экспериментальное исследование широкополосной турникетной щелевой антенны..... 716
Думчев И.А., Войтович Н.И. Возбуждение плоской резонаторной антенны полосковой линией..... 724
Хашимов А.Б. Итеративная регуляризация в обработке результатов измерений в ближней зоне антенн..... 730
Анисимов Я.О. Использование нейронной сети в задаче фильтрации одномерного сигнала..... 738
Коваленко В.В. Комплексирование датчиков системы ориентации, работающей в условиях магнитных возмущений..... 740
Алёшин Е.А. Области качества теплового режима здания..... 746
Волович Г.И., Щербаков В.П. Определение параметров силового трансформатора с использованием методов идентификации..... 750
Зырянов Г.В. Об исследовании устойчивости цифровых МСАР с иррациональными и трансцендентными звеньями..... 755
Ильин Е.Д., Ширяев В.И. Об оценивании возмущений в зависимости от ошибок измерений в задаче минимаксной фильтрации..... 760
Павловская О.О. Об анализе надежности систем малогабаритного космического аппарата..... 766
Плотникова Н.В. Сетевая реализация образовательных программ..... 770
Подивилова Е.О., Ширяев В.И. Об оценке информационных множеств в задаче минимаксной фильтрации с использованием систем линейных неравенств..... 775
Подлинева Т.К. О коррекции исполнительных систем для упругой нагрузки..... 783
Ширяев В.И., Цыбулевский А.Г. Об одной задаче параметрической идентификации модели с хаотической динамикой..... 789

ФИЗИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Танклевская Н.М., Михайлов Г.Г. Термодинамический анализ образования включений в кристаллизующихся расплавах стали х25т1..... 794
Пашкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. Изменение физико-химических и механических свойств образующихся фаз при окислительном обжиге хромовых руд..... 801
Винник Д.А., Машковцева Л.С., Михайлов Г.Г. Выращивание монокристаллов феррита бария, легированного кобальтом..... 808

Ердаков И.Н., Герасимчук А.В., Якшимбетова К.С., Габбасов Р.Д. Особенности образования пористости в ходе затвердевания отливки сложной конфигурации…….. 810
Шабурова Н.А. Импульсная и ультразвуковая обработка расплавов металлов…….. 814
Космацкий Я.И. Анализ теоретических разработок, направленных на определение устойчивого винтообразного течения металла и выполнение профиля прессованных труб…… 820
Иванов В.А., Яров Б.А., Лепихов А.В., Мовчан К.Г. Проблемы дегазации порошковой насыпки при прессовании в пресс-формах с жесткими стенками…….. 824
Болдов Ю.П., Фирстова С.В., Кувшинова Н.Л. История развития порошковых выстрелов с пиротехническим приводом…… 832
Осипов А.М., Зайцев Н.Л., Безганс Ю.В. Оптимизация режимов наплавки толкателей двигателей автомобилей…… 837
Рыбин В.С., Безганс Ю.В. Расчет режимов сварки для стандартных сварных соединений под флюсом с применением ПО «Маткад»…….. 841
Ярославцев С.И., Иванов М.А., Безганс Ю.В., Уланов А.М. Анализ напряженного состояния сварных соединений рамы вагона трамвая…….. 849

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

Абызов В.А. Жаростойкие фосфатные ячеистые бетоны, клеи и связующие на основе дисперсных высокоглиноземистых промышленных отходов……. 854
Абызов В.А., Речкалов Д.А., Черногорлов С.Н. Модифицированные глиноземистые вяжущие на основе шлаков ферросплавного производства 861
Анисимова Е.Ю. Энергосбережение в системах отопления…….. 866
Аршакян Д.Ю. Проблемы государственного кадастрового учета подземных объектов недвижимости в России и пути их решения…… 873
Байбурин А.Х. Научные исследования в Харбинском политехническом университете…….. 879
Байбурин А.Х., Русанов А.Е. Методы определения уровня теплозащиты наружных ограждающих конструкций…… 882
Буторина И.В. Выполнение заданий курса инженерная и компьютерная графика в программе SolidWorks…… 887
Васильев В.И., Басманова Т.В. Особенности проекта систем водоснабжения и канализации аэродрома г. Шарджа (ОАЭ)…….. 891
Васильев В.И., Чучелов К.И., Кутузова Н.Е. Утилизация дренажных вод застроенных территорий…… 895

Гайфуллина А.А., Крамар Л.Я. Современные пенообразователи для пенобетонов..... 897
Головнев С.Г., Дмитрин Г.С. Проектирование строительных процессов на основе уточненных норм затрат труда..... 902
Горбунов С.П., Погорелов С.Н., Семеняк Г.С. Использование малоцементных вяжущих при производстве строительных материалов... 906
Денисов С.Е., Витомскова Т.А., Широкова М.В. Экономические аспекты в природоохранной деятельности..... 911
Денисов С.Е., Витомскова Т.А., Широкова М.В. Эколого-экономическое обоснование финансирования водоохранных мероприятий..... 915
Зимич В.В. Штукатурные составы на магнезиальных вяжущих для наружных работ..... 918
Ивашенко Ю.А., Мельников В.Д. Экспериментальное исследование замоноличенных узлов панельной системы..... 926
Кирсанова А.А. Влияние комплексных добавок с метакаолином на сульфатостойкость цементного камня..... 929
Киянец А.В. Зеленое строительство..... 934
Колобаева Т.В. Церкви юга Оренбургской губернии первой четверти XIX века..... 938
Короткий В.А. Квадратичное преобразование пространства, установленное двумя поверхностями второго порядка..... 942
Короткий В.А. Приложения начертательной геометрии четырехмерного пространства к конструированию поверхностей..... 946
Кравченко Т.А. Опыт международного сотрудничества архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ..... 950
Крамар Л.Я. Эффективные ускорители твердения для шлакопортландцементов..... 954
Кувшинов Н.С. Преподавание начертательной геометрии на энергетическом факультете ЮУрГУ с учетом новых ГОС..... 960
Кучин В.Н., Шилоносова Н.В. Структура студентов архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ по месту проживания..... 964
Логиновский А.Н. Начертательная геометрия в пакете SolidWorks..... 968
Малев И.В., Шилоносова Н.В. Экономические проблемы предприятий городского хозяйства..... 972
Мишнёв М.В., Асташкин В.М., Маликов Д.А. Разработка комплексной мобильной технологии производства и монтажа крупногабаритных оболочек из полимерных композиционных материалов..... 975
Мусихин В.А. Методика преподавания курса «Железобетонные конструкции» на основе комплексного примера расчёта плиты перекрытия 982

Нагорная А.Н. Применение CFD-программ для исследования тепловых и воздушных режимов помещений..... 985
Николаенко Е.В., Курбангалеева А.А. Проблемы реновации водопроводных сетей г. Юрюзань..... 993
Носов А.В., Черных Т.Н., Крамар Л.Я. Добавки-интенсификаторы обжига доломита..... 998
Оленьков В.Д. Инновационные технологии проектирования реставрации памятников архитектуры..... 1003
Орлов А.А. Стекломагнезиальные листы в строительстве..... 1007
Попцова Т.Ю., Дубовикова Е.П., Карманова Л.Л. Самообучение и самообразование студентов при изучении компьютерной графики..... 1013
Потапов А.Н. Анализ колебаний диссипативных систем с учетом физической и конструктивной нелинейности..... 1017
Сбитнев В.Ф. Определение частот свободных колебаний в конических стержнях, имеющих замкнутый прямоугольный, недеформируемый контур, находящихся в условиях стеснённого кручения..... 1021
Старкова Л.Г. Эффективные методы обработки воздуха для чистых помещений на примере медицинских операционных..... 1027
Трофимов Б.Я. Модифицирование технологии гипсоволокнистых листов 1035
Трофимов Б.Я., Киль П.Н., Шулдяков К.В. Активность шлака и обеспечение морозостойкости бетона на цементах с добавкой доменного гранулированного шлака..... 1043
Ульрих Д.В., Брюхов М.Н. Возможности использования фиторемедиационных сооружений в очистке сточных вод..... 1050
Ульрих Д.В., Жбанков Г.О. Роль сорбционно-фильтрующих сооружений в очистке поверхностного стока..... 1054
Уфимцев Е.М. Временной анализ колебаний фермы с учётом физической и конструктивной нелинейности при запроектном воздействии..... 1058
Февралев А.А. Определение расходов на водоснабжение жилого дома методом агентного моделирования..... 1066
Хейфец А.Л., Васильева В.Н. Конструкция Данделена для произвольных квадрик вращения в Autocad..... 1073
Хмарова Л.И., Путина Ж.В., Колобаева Т.В. Графика для абитуриентов: актуально, необходимо, доступно..... 1077
Черных Т.Н., Носов А.В., Орлов А.А. Эффективность добавок-интенсификаторов при производстве магнезиальных вяжущих..... 1081

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Горбенко В.И., Грибанов А.И., Юртаев М.А. К вопросу минимизации погрешности при численном решении задач теплопереноса по методу балансов энергии..... 1086
Грибанов А.И. Использование метода балансов энергии при расчете теплового баланса обжиговой печи..... 1095
Голубкова К.В., Жиргалова Т.Б. Использование энергетического оборудования для утилизации твердых бытовых отходов и применение переработанного мусора в качестве вторичного энергоносителя..... 1099
Голубкова К.В., Жиргалова Т.Б. Разработка энергосберегающих мероприятий на ОАО «Новорязанская ТЭЦ» путем реконструкции котла ТГМ-84А..... 1105
Нуреева Д.Х., Жиргалова Т.Б. Реконструкция пароперегревателя котла ст. № 7 Нижнетагильского металлургического комбината с целью повышения КПД котельного агрегата..... 1111
Жиргалова Т.Б. Использование испарителей мгновенного вскипания в тепловой схеме ТЭЦ металлургического комбината..... 1115
Жиргалова Т.Б. Перевод отопительных котельных в мини-ТЭЦ – путь энергосбережения в теплоэнергетике..... 1119
Жиргалова Т.Б. Разработка системы теплоснабжения ОАО «Агроснабтехсервис»..... 1123
Каргаполова Н.Н. Пути совершенствования ТЭС России..... 1126
Каргаполова Н.Н., Кривкова М.Д. Основные направления развития энергетического комплекса..... 1131
Лымбина Л.Е. Современные энергосберегающие технологии в теплоснабжении..... 1138
Осинцев К.В. Выделение основных групп технологий низкотемпературного сжигания топлива..... 1143
Осинцев К.В. Методологические основы расчета начального участка воспламенения факела при различных компоновках горелок на стенах топочных камер котельных агрегатов..... 1147
Осинцев К.В. Улучшение технико-экономических показателей работы ТЭС при переходе на рассредоточенный ввод регентов в топки котельных агрегатов..... 1151
Реш А.Г., Торопов Е.В. Влияние качества топлива на радиационные характеристики среды в топке котельного агрегата..... 1156
Реш А.Г., Жиргалова Т.Б. Разработка системы теплоснабжения микрорайона г. Челябинска..... 1160

Реш А.Г., Жиргалова Т.Б. Совершенствование системы теплоснабжения при переходе на новый источник тепла..... 1163
Торопов Е.В., Волкинд Д.К. Параметрическая идентификация модели теплообмена в теплоаккумулирующей матрице регенеративных насадок 1167
Шашкин В.Ю. Адаптация математической модели течения среды в сложных многоканальных системах..... 1175
Вязовский А.К., Киеш И.Е. Управление энергообменом в электрической цепи и его использование..... 1178
Хусаинов Ш.Н., Киеш И.Е. Влияние отклонения параметров главных ветвей электрической схемы на точность локальной диагностики электрических схем с использованием метода главных контурных токов 1184
Андреев А.Н., Гребеньков А.С. Разработка программно-аппаратного комплекса цифровой передачи данных в системах автоматического управления подстанций..... 1190
Егоров И.С., Гаврилов А.И., Гольдштейн М.Е. Особенности режимов энергоблока «синхронный генератор – объединенный регулятор потоков мощности»..... 1195
Корбуков Н.В., Булатов Б.Г., Гольдштейн М.Е. Передача постоянного тока на базе преобразователей напряжения как элемент электроэнергетической системы..... 1199
Коржов А.В. О влиянии магнитного поля кабеля 6(10) кВ на процессы в изоляции..... 1203
Павлюков В.С., Павлюков С.В., Сусанин С.П. Модель элемента искусственного интеллекта с учетом метеофакторов и алгоритмов ее обучения для расширения задачи управления режимами систем электроснабжения..... 1207
Садовников А.Н. Централизованный комплекс РЗА типовой комплектной понизительной подстанции на свободно-программируемых терминалах с интерфейсом МЭК 61850..... 1214
Борисов А.М., Лях Н.Е., Фрик М.Ф., Беляев Д.И. Автоматизация управления спускоподъемными режимами работы подъемных механизмов 1222
Брылина О.Г. Модель системы управления группой электроприводов водяных насосов на основе многозонного интегрирующего регулятора... 1228
Бычков А.Е., Золотушкин С.Н., Ефанова И.М. Исследование характеристик пильгерстана..... 1237
Дудкин М.М. Динамические характеристики интегрирующих развертывающих преобразователей с различными законами модуляции... 1242
Мацин В.П., Савостеенко Н.В. Матричная структура системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения..... 1248

Сапрунова Н.М., Гребнев А.И. Переходные процессы в импульсном источнике питания..... 1252
Воронин С.Г., Коробатов Д.В., Кондаков С.В. Математическая модель гидравлического амортизатора с электромеханическим регулированием жесткости..... 1257
Согрин А.И. Потери в роторе синхронной электрической машины с возбуждением от постоянных магнитов..... 1264
Шабуров П.О., Маргацкая Е.А., Большаков М.В., Шумаков Б.Д. Использование оптического датчика для измерения линейных перемещений 1272
Шумаков Б.Д. Система позиционирования вала двигателя транспортного средства перед электропуском..... 1276
Башмакова Н.Ю. Электромагнитные процессы в трижды четырехфазном компенсированном преобразователе..... 1284
Валеев Г.С., Валеев Р.Г., Зайнашев Э.М., Никитина М.Ю. Методика определения оптимальной зоны нагрузок для трансформаторов с форсированной системой охлаждения..... 1289
Ершов А.М., Крутов И.А. Оптимизация релейной защиты трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ..... 1296
Пястолов В.В., Бердюгин О.А. Применение ограничителей перенапряжений нелинейных для защиты электрических цепей, запитанных через вакуумные выключатели..... 1301
Кирпичникова И.М., Соломахо К.Л. Обоснование использования метода главных компонент при прогнозировании объемов электроэнергии..... 1304
Хохлов Ю.И., Федорова М.Ю. Гибкая энергосберегающая компенсированная система электроснабжения удаленных буровых установок..... 1309
Ахмедьянова Е.Н. Повышение энергоэффективности в переработке отходов на примере древесных пеллет..... 1317
Бакунин В.В. Анализ влияния параметров гидротарана на его производительность..... 1322
Волкова О.С. Анализ работы гидротаранных установок различных конструкций..... 1328
Гусева О.А., Пташкина-Гирина О.С. Имитационная модель работы напорного гидроузла..... 1332
Крымский В.В., Мингажева Ю.Г. Очистка производственной и питьевой воды от тяжелых металлов..... 1338
Балакирев В.Ф., Крымский В.В., Литвинова Е.В. Электроимпульсная обработка водных растворов радионуклидов..... 1342
Малюгин С.А. Повышение эффективности использования солнечной энергии в автономных системах энергоснабжения..... 1348

Мартьянов А.С. Моделирование измерения характеристик ВЭУ в реальных погодных условиях..... 1354
Смолин В.И., Топольская И.Г. Система управления синхронным электроприводом по критерию максимума коэффициента мощности..... 1362
Соломин Е.В., Аникин А.С., Сироткин Е.А. Анализ развития мировой ветроэнергетической промышленности за 2010–2013 года..... 1366
Соломин Е.В., Сироткин Е.А. Мировая малая ветроэнергетика, анализ состояния..... 1371
Топольский Д.В., Топольская И.Г. Анализ современных SCADA-систем в электроэнергетике..... 1378

ФАКУЛЬТЕТ ВОЕННОГО ОБУЧЕНИЯ

Зайчиков Ю.Н., Таземдинов М.Н. Концепция создания и применения учебных машин бронетанкового вооружения и техники..... 1382
Каляженков А.Н., Тычков А.В., Мальгин Д.П. Тенденции развития современных боеприпасов и взрывателей..... 1386
Мурог И.А., Окольников В.В. Концепция формирования требований к военной автомобильной технике..... 1392
Сорокин А.Ф., Хуснутдинов А.М., Крикунов К.Н. Анализ развития подвижных средств технического обслуживания и ремонта в Вооружённых Силах Российской Федерации..... 1401

ФИЛИАЛ В г. АША

Меденков С.А. Перспективное использование металлизированных окатышей в электрометаллургии..... 1404
Мохова А.В. Альтернативные экологически безопасные источники энергии 1410
Чванова Е.Е., Шкуратов Е.А. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса прокатки толстых полос в вертикальных и горизонтальных валках..... 1416

ФИЛИАЛ В г. ЗЛАТОУСТ

Бружас В.В., Лопатин Б.А. Оценка напряженно-деформированного состояния зубчатых колес..... 1424
Дерябин И.П., Миронова И.Н. Экспериментальные исследования точности обработки отверстий ружейными сверлами..... 1429
Дерябин И.П., Павлючук С.И. Исследование влияния перемычки сверла на точность обработки отверстий..... 1437

Дильдин А.Н., Гарифулин Р.Р. Особенности технологии утилизации отходов сталеплавильного производства…… 1440
Игизьянова Н.А. Термоэлектрические процессы в жидких неметаллических средах…… 1443
Казарцев Д.Н. Геометрические характеристики гиперболоидных зубчатых передач, определяющие несущую способность пространственного эласто-гидродинамического контакта…… 1449
Кирсанова А.А., Киль П.Н. Высокоэффективные комплексные добавки-ускорители для шлакопортландцементов…… 1457
Козлов А.В., Бобылев А.В., Халиулин Е.В. Холодная гибка с раскатыванием труб из коррозионностойких сталей и титановых сплавов 1462
Козлов А.В., Суворов А.Л. Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля…… 1467
Козлов А.В., Чумичёв А.Е. Разработка лабораторной установки для гибки с раскатыванием труб из коррозионно-стойких сталей и сплавов диаметрами 25–40 мм…… 1474
Лопатин Б.А. Зубчатые передачи с эвольвентно-коническими колесами 1478
Пестов С.П. Особенности моделирования обработки отверстий на станках с ЧПУ…… 1483
Плотникова С.В., Мурзина И.В. Разработка твердотельных моделей зубчатых колес различной геометрии…… 1487
Сандалов В.М., Плотников В.А. Разработка лабораторного стенда «Интеллектуальный дом» на базе контроллера «Mitsubishi alpha»…… 1491
Трофимова С.Н. К вопросу о надежности электроснабжения сельских потребителей…… 1495
Лопатин Б.А., Хазиев Т.Р. Новая конструкция машины для безогневой резки труб большого диаметра…… 1500
Цуканов О.Н. К расчету профиля инструмента для обработки роторов винтовых компрессоров…… 1504

ФИЛИАЛ В г. КЫШТЫМ

Симонов Е.Н., Ласьков В.В. Фильтрация изображений в рентгеновской компьютерной томографии…… 1510
Симонов Е.Н., Ласьков В.В. Фильтрация рентгеновских томограмм методом адаптации размера окна фильтра к локальным характеристикам изображения…… 1515
Киселева Т.В. Педагогическое сопровождение самостоятельной работы студентов при изучении физики в вузе…… 1522

Борисова Е.Н. Организация процесса дистанционного обучения в филиале ЮУрГУ в г. Кыштыме..... 1525
Дубынина Т.В. Компьютерная математика и её роль в становлении общекультурной компетенции (ОК-10) будущих бакалавров инженерных направлений..... 1529
Светлова М.Т., Светлов А.Ю. SWOT-анализ деятельности ОАО «Челябинский Радиозавод «Полет»..... 1534
Ардашев Д.В. Информационное обеспечение современного многономенклатурного производства..... 1540
Суворова Н.Н. История развития кафедры «Технология обработки материалов» филиала ЮУрГУ в г. Кыштыме..... 1547
Ардашев Д.В. Моделирование контактного взаимодействия абразивного зерна с заготовкой при шлифовании..... 1551
Силаева Л.А. Социальные сети как веб-сервис в организации учебного процесса в вузе..... 1559
Попова А.В. Аналитическая модель процесса съема металла при внутреннем шлифовании..... 1564
Попова А.В. Расчет управляющих программ для внутреннего шлифования 1570

ФИЛИАЛ В г. МИАСС

Абрамов М.И. О способах определения уровня внешнего воздействия микропрофиля дороги на транспортное средство..... 1575
Горшков В.А. Некоторые проблемы внедрения СМК в соответствии с требованиями МС ИСО 9001 в образовательном учреждении..... 1583
Зезин В.Г., Решетников М.И. Применение нечетко-логического вывода для многокритериального анализа схемно-конструктивных решений вспомогательных систем ракетного комплекса..... 1591
Зезин В.Г., Решетников М.И. Система правил нечетких продукций для выбора типа системы инициирования пиросредств ракеты..... 1599
Казакова Е.А. Основные положения риск-менеджмента строительных объектов повышенного уровня ответственности..... 1606
Камерлохер В.А. Безопасность движения автомобильного транспорта на дорогах г. Миасса Челябинской области..... 1613
Краснокутский В.В. Использование кинематического и силового рассогласования в приводе движетелей прицепа и полуприцепа..... 1618
Куянцева Н.Б., Чащина О.Е., Андреева П.О. Оценка виталитета ценопопуляций *Phragmites australis* (Cav.) Trin.ex Steud.в условиях разнотипного химического загрязнения (Южный Урал)..... 1622

Миков Ю.Г. Способ установки величины натяга раскатки при холодной гибке труб с раскатыванием..... 1627
Петухов В.С. Моделирование зон рассеивания составляющих выхлопных газов автомобилей..... 1629
Плаксин А.В. Перспективы применения концепции сквозного компьютерного проектирования в подготовке студентов технических направлений..... 1634
Решетников М.И., Зезин В.Г. Многокритериальный анализ систем инициирования пиросредств ракетного комплекса по методу Белмана-Заде 1639
Слесарев Е.Н. История и перспективы развития технического образования в нашей стране..... 1648
Слесарев Е.Н., Горшков В.А. Резерв экономического развития России в бережливом производстве..... 1653
Слесарев Е.Н. Постоянное образование – не прихоть, а потребность нашего времени..... 1657
Солодянкин А.А., Иванова Л.И. Применение неорганического алюмоборфосфатного связующего (АБФК) для холоднотвердеющих смесей 1659
Стружкова Т.В. Проблема ртутного загрязнения окружающей среды.... 1663
Судаков Н.В. Дискретно-локальный метод минимизации невязок при приближенном решении уравнений в задачах обработки металлов давлением 1669
Суховая С.И. Прозрачный бетон (литракон)..... 1675
Чебоксаров Д.В. Основные измения правил обследования и мониторинга техничекого состония зданий и сооружений в связи со вступлением в силу ГОСТ 31937-2011..... 1678
Шабанов М.Н. Отдельные аспекты применения информационных технологий в образовательном процессе..... 1684
Шерстобитова Е.Г. Применение ферм покрытия из квадратных труб «на ребро» в условиях агрессивной среды..... 1686
Эпштейн М.С. Использование методики оценки и прогнозирования риска аварии для качественной оценки соответствия объектов капитального строительства требованиям технических регламентов и проектной документации..... 1690
Биткин С.А. Интегрированная система прогнозирования энергетических характеристик РДТТ при выборе топлив маршевых ступеней (часть 1)... 1696
Гуськова А.И., Морозова Е.А. Анализ законодательства Российской Федерации в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности..... 1711

Мокин Ю.А., Киселев В.И. Оценка вариаций положения центра давления за счет малого изменения формы затупленных тел вращения при их гиперзвуковом обтекании..... 1719
Пегов В.И., Киселев В.И. Аналитическое представление аэродинамических характеристик ракет-носителей сложной конфигурации..... 1728
Саитгараев С.С., Позин Г.Б. Возможности ракетно-космических комплексов для борьбы с опасными космическими объектами «малых» размеров..... 1740

ФИЛИАЛ В г. НИЖНЕВАРТОВСК

Жарова Н.Р. Использование web-технологий в повседневной жизни..... 1745
Зверева Е.А. Информационное сопровождение практик..... 1751
Леоненко А.Н. Технологии аналитической обработки информации..... 1757
Нурисламов О.Р. Об одном режиме образования гидратной при всплытии газового пузырька..... 1764

ФИЛИАЛ В г. СНЕЖИНСК

Соколков С.В. Об изохронности мультифилярного подвеса..... 1771
Семеняк Г.С., Крупнова Н.Е. Материалы для экстерьера промышленных зданий..... 1778
Соколков С.В. Электрохимическая ячейка как первичный преобразователь информации..... 1786

ФИЛИАЛ В г. УСТЬ-КАТАВ

Колесов Ю.Б., Некрутов В.Г., Мальцев П.С. Технология вытяжки деталей с предварительным гофро- и конусообразованием фланца листовой заготовки..... 1792
Сафонов В.И., Константинов В.Д. Способы векторного регулирования параметрического источника тока..... 1795
Сергеев С.В., Некрутов В.Г., Мартынова И.В. Совершенствование процесса получения пищевых эмульсий..... 1799
Сергеев С.В., Иршин А.В., Селивёрстова Е.Н. Совершенствование процесса переработки медицинских отходов во вторичное сырьё..... 1803

УДК 662.994

РАСЧЕТ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В РЕКУПЕРАТОРЕ МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В.В. Кириллов

Предложена математическая модель и метод расчёта рабочих процессов в теплообменнике газотурбинной установки.

Ключевые слова: газотурбинная установка, теплообмен, регенерация, метод расчёта.

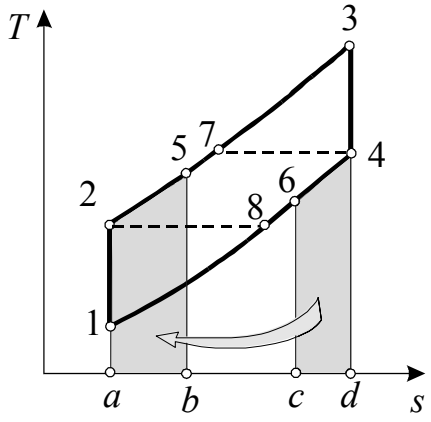


Рис.1. Схема цикла ГТУ

На рис. 1 представлен цикл газотурбинной установки (ГТУ) с регенерацией теплоты и сгоранием топлива при постоянном давлении. Сжатый воздух после компрессора подогревается в теплообменнике за счёт теплоты продуктов сгорания (процесс 2–5) и подаётся в камеру сгорания. Таким образом, часть отводимой теплоты возвращается в цикл. Точки 7 и 8 соответствуют полной регенерации. Полнота регенерации характеризуется степенью регенерации:

$$\sigma = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}, \qquad (1)$$

При заданных степени регенерации и температуры T_4 после турбины из (1) можно найти температуру воздуха после теплообменника:

$$T_5 = T_2 + \sigma(T_4 - T_2), \qquad (2)$$

Теплообменник ГТУ имеет ряд особенностей. Оба теплоносителя газы, расходы которых отличаются незначительно. Коэффициенты теплоотдачи к газам невелики, порядка 10^2 Вт/м^{2}К, поэтому для передачи одного и того же количества тепла требуются значительно большая поверхность теплообмена, чем в теплообменниках жидкость-жидкость или жидкость-газ.

В данной работе предлагается кольцевой теплообменник пластинчатого типа, схема которого представлена на рис. 2. Пластины располагаются внутри цилиндрического корпуса внутренним диаметром d_1 и наружным диаметром d_2. Воздух движется внутри прямоугольных параллельных каналов, продукты сгорания в режиме противотока движутся между пластинами. Пластины располагаются на внутреннем диаметре корпуса с шагом h. Количество пластин теплообменника определяется по формуле:

$$N = \frac{\pi d_1}{h + b + 2\delta_w}, \tag{3}$$

где δ_w – толщина стенки пластины. Высота пластины определяется количеством воздушных каналов.

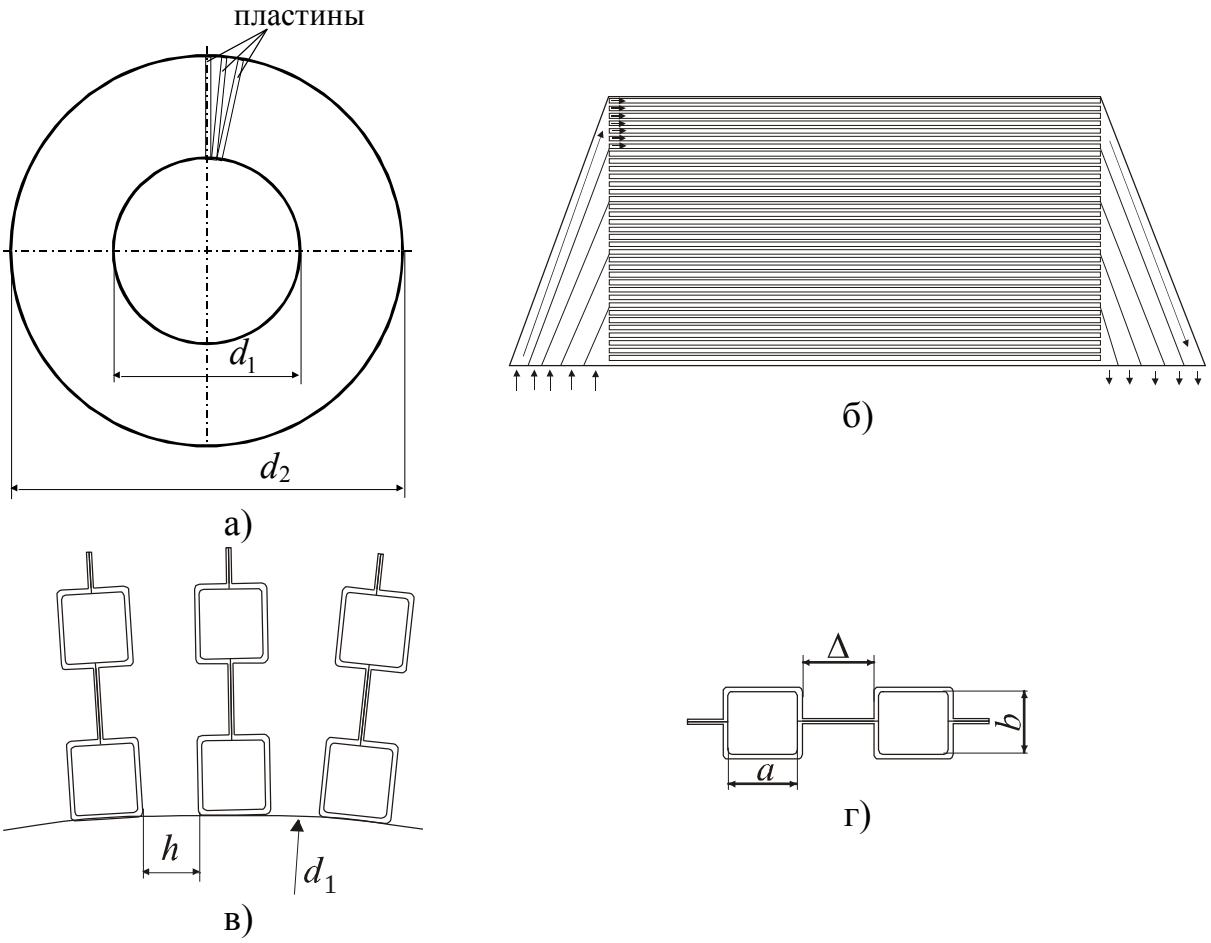


Рис. 2. Схема теплообменника: а – поперечное сечение;
б - воздушная пластина; в – расположение пластин по окружности корпуса;
г – каналы воздушной пластины

Количество тепла, передаваемое воздуху, определяется по уравнению баланса тепла:

$$Q = G_{\text{в}} c_{p\text{в}} \left(T_5 - T_2\right) = G_{\text{г}} c_{p\text{г}} \left(T_4 - T_6\right), \tag{4}$$

где G – расход, $c_{\text{р}}$ – удельная теплоёмкость; T – температура; индексы: в – воздух; г – продукты сгорания (далее, газы). Теплоёмкости воздуха и газов рассчитываются по их средним температурам.

Скорость воздуха в канале пластины находится по формуле:

$$w_{\text{в}} = \frac{G_{\text{в}}}{N_{\text{пл}} N_{\text{к}} \rho_{\text{в}} S_{\text{к}}}, \tag{5}$$

где $N_{\text{пл}}$ – количество пластин; $N_{\text{к}}$ – число каналов в пластине; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха; $S_к = ab$ – площадь сечения канала пластины.

Изменение температуры воздуха и газов по длине теплообменника можно определить из решения уравнений энергии:

$$\frac{dT_{\text{в}}}{dx} = \frac{K_{\text{в}} П_{\text{в}} \left(T_{\text{г}} - T_{\text{в}}\right)}{G_{\text{в}} c_{p\text{в}}}; \tag{6}$$

$$\frac{dT_{\text{г}}}{dx} = \frac{K_{\text{г}} П_{\text{г}} \left(T_{\text{г}} - T_{\text{в}}\right)}{G_{\text{г}} c_{p\text{г}}}. \tag{7}$$

Здесь $П$ – обогреваемый периметр; K – коэффициент теплопередачи.

$$K_{\text{в}} = \frac{1}{\frac{F_{\text{в}}}{\alpha_{\text{г}} F_{\text{г}}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w}\frac{F_{\text{в}}}{F_{\text{г}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}}; \quad K_{\text{г}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{г}}} + \frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}}\frac{F_{\text{г}}}{F_{\text{в}}}}, \tag{8}$$

Здесь α – коэффициент теплоотдачи; F – площадь поверхности; λ – коэффициент теплопроводности; x – координата вдоль пластины; индексы: в – воздух; г – газы; w – стенка. Начальные условия для уравнений (8) и (9) задаются в виде:

$$T_{\text{в}}(0) = T_2; \quad T_{\text{г}}(0) = T_6. \tag{9}$$

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются по критериальным уравнениям в зависимости от режима течения. В числах Рейнольдса в качестве характерного размера используются эквивалентные диаметры $d_э = 4S/П$. При течении в щелевых каналах при ламинарном режиме число Нуссельта рекомендуется принимать равным 7,55 [1]. При турбулентном режиме течения можно использовать уравнение Михеева [2, 3]:

$$\text{Nu} = 0{,}021 \text{Re}^{0{,}8} \text{Pr}^{0{,}43}.$$

Изменение давления по длине теплообменника рассчитывается по уравнениям импульса для воздуха и газов:

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{G_{\text{в}}^2}{S_{\text{в}} \rho_{\text{в}}} + p_{\text{в}} S_{\text{в}}\right) = -\xi_{\text{в}} \frac{G_{\text{в}}^2 П_{\text{в}}}{8 S_{\text{в}}^2 \rho_{\text{в}}}; \tag{10}$$

$$\frac{d}{dx}\left(\frac{G_{\text{г}}^2}{S_{\text{г}}\rho_{\text{г}}}+p_{\text{г}}S_{\text{г}}\right)=\xi_{\text{г}}\frac{G_{\text{г}}^2\Pi_{\text{г}}}{8S_{\text{г}}^2\rho_{\text{г}}}. \qquad (11)$$

Здесь S – площадь сечения; p – давление; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ – плотность.

Начальные условия для уравнений (10) и (11) записываются в виде:

$$p_{\text{в}}(0)=p_2;\quad p_{\text{г}}(L)=p_4.$$

Рабочий процесс теплообмена в рекуператоре должен быть организован таким образом, чтобы значения температуры воздуха на выходе из каналов пластин были одинаковыми. Для этого необходимо, чтобы в каналах пластины одинаковыми были расходы воздуха. Расход воздуха определяется перепадом давления и гидравлическим сопротивлением канала, включая подводящее и отводящее устройства (рис.2, б). Для уменьшения неравномерности распределения воздуха по каналам пластины разделим каналы на несколько групп по m штук, к каждой из которых подвод воздуха будет выполняться отдельно. Аналогично организован и отвод воздуха из пластины. Подводящее и отводящее устройства таким образом представляют собой плоские диффузоры и конфузоры, соответственно. Примем, что в пределах одной группы расход воздуха равномерно распределяется по каналам. Потери давления в i-й группе складываются из потерь давления на входе в диффузор $\Delta p_{\text{вх.д},i}$, путевых потери давления в диффузоре $\Delta p_{\text{д},i}$, потерь давления на входе в канал пластины $\Delta p_{\text{вх},i}$, путевых потерь давления в канале $\Delta p_{\text{к},i}$, потерь давления на выходе из канала в конфузор $\Delta p_{\text{вых},i}$, путевых потерь в конфузоре $\Delta p_{\text{кон},i}$, потерь давления на выходе из конфузора $\Delta p_{\text{вых.кон},i}$:

$$\Delta p_i=\Delta p_{\text{вх.д},i}+\Delta p_{\text{д},i}+\Delta p_{\text{к},i}+\Delta p_{\text{вых},i}+\Delta p_{\text{кон},i}+\Delta p_{\text{вых.кон},i}.$$

Одинаковых значений расходов в группах можно добиться различными методами, меняя, например, сопротивления на входе в диффузор и на выходе из конфузора путём изменения площади входного и выходного сечений. Для расчёта гидравлических сопротивлений использовались данные работы [2].

Уравнения (6), (7), (10), (11) решались численно методом Рунге-Кутта 4-го порядка. Интегрирование ведётся до тех пор, пока температуры воздуха и газов не станут равными T_5 и T_4, соответственно. Значение координаты x при этом и принимается за длину пластины.

В таблице представлены результаты расчёта противоточного теплообменника. Размеры канала в пластине a=3 мм, b=2 мм, $\Delta=2$ мм, $\delta_w=0{,}12$ мм.

Диаметр $d_1 = 0{,}45$ м. Температуры $T_2 = 222{,}6$ °С, $T_4 = 609{,}4$ °С, давление $p_2 = 0{,}49$ МПа, давление $p_4 = 0{,}109$ МПа. Расходы воздуха и газов равны $G_в = 1{,}007$ кг/с и $G_г = 1{,}017$ кг/с. Степень регенерации $\sigma = 0{,}75$.

Таблица

Результаты расчёта

h, мм	$N_к$	$N_{пл}$	H, м	L, м	K, вт/м^{2}К	F, м^2	Δt	$\Delta p_в$, кПа	$\Delta p_г$, кПа
0	30	498	0.132	0.236	84.2	38.1	110.6	1,047	0,51
1	30	385	0.132	0.377	66.8	47.1	110.6	2,08	0,27
2	30	314	0.132	0.552	55.4	56.2	110.6	3.44	0,19
3,37	30	250	0.132	0.851	44.6	69	110.8	7,0	0,14
0	40	498	0.176	0.19	79.5	40.8	110.7	0,68	0,21
1	40	385	0.176	0.302	63.2	50.3	110-.6	1,36	0,12
2	40	314	0.176	0.442	52.1	59.9	110.7	2,26	0,09
3,37	40	250	0.176	0.68	42.1	73.5	110.7	4,22	0,067
0	50	498	0.22	0.162	75.7	43.6	110.7	0,53	0,10
1	50	385	0.22	0.257	59.8	53.5	110.5	1,0	0,062
2	50	314	0.22	0.375	49.5	63.7	110.6	1,58	0,046
3,37	50	250	0.22	0.578	39.9	78.0	110.7	3,06	0,036

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и Открытым акционерным обществом специальным конструкторским бюро «Турбина» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР - Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Библиографический список

1. Уонг, Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров / Х. Уонг. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

2. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 424 с.

3. Бажан, П.И. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан, Г.Е. Каневец, В.М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.

К содержанию

УДК 532.542+519.63

РАСЧЁТ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ГЕНЕРАТОРА МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

В.В. Кириллов

Приведён метод расчёта теплового режима работы электрического генератора микрогазотурбинной установки. Выполнен анализ влияния параметров процесса на уровень температур в элементах генератора.

Ключевые слова: микрогазотурбинная установка, генератор, теплообмен, метод расчёта.

Во время работы электрического генератора микрогазотурбинной установки в статоре и роторе выделяется значительное количество тепла, поэтому для обеспечения допустимого уровня температур необходимо осуществить эффективное охлаждение генератора. Отвод тепла от статора осуществляется воздухом, протекающим по каналам прямоугольного сечения на внешней поверхности статора. Охлаждение ротора выполняется воздухом, протекающим в кольцевом зазоре (рис. 1).

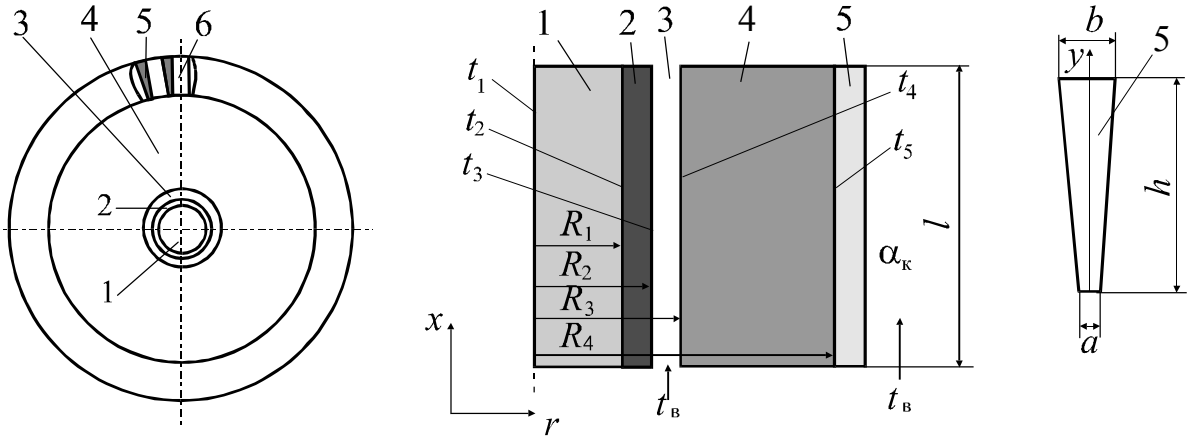


Рис. 1. Расчётная схема генератора:
1–ротор; 2–защитное кольцо; 3–воздушный кольцевой зазор;
4–статор; 5– рёбра; 6 – воздушный канал статора

Каналы статора 6 выполнены фрезерованием в кольце из алюминиевого сплава, напрессованного на статор. В результате каналы разделяются продольными рёбрами 5 трапецевидного сечения. Статор представляет собой пакет из тонких стальных пластин, между которыми практически отсутствует тепловой контакт, поэтому предполагается, что теплота, выделяющаяся в них,

к охлаждающему воздуху передаётся только в радиальном направлении. Теплообменом с торцевых поверхностей статора и ротора можно пренебречь, поскольку площадь боковой поверхности значительно больше торцевых. При этих условиях температурное поле в статоре и роторе можно считать одномерным, в котором температура изменяется только в радиальном направлении. Предполагается также, что внутреннее тепловыделение в статоре равномерно распределено по его объёму. Распределение температуры в роторе определяется из решения следующей задачи:

$$\frac{d^2 t_1}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt_1}{dr} + \frac{q_{v1}}{\lambda_1} = 0,\ 0 \le r \le R_1; \tag{1}$$

$$\frac{d^2 t_2}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt_2}{dr} = 0,\ R_1 \le r \le R_2; \tag{2}$$

$$\frac{dt_1(0)}{dr} = 0; \tag{3}$$

$$t_1(R_1) = t_2(R_1); \tag{4}$$

$$\lambda_1 \frac{dt_1(R_1)}{dr} = \lambda_2 \frac{dt_2(R_1)}{dr}; \tag{5}$$

$$-\lambda_2 \frac{dt_2(R_2)}{dr} = \alpha_3 [t_2(R_2) - t_3]. \tag{6}$$

В (1) – (6) t – температура; r – радиальная координата; q_{v1} – плотность внутренних источников тепловыделения в роторе; λ – коэффициент теплопроводности; α – коэффициент теплоотдачи; индексы: 1 – металл ротора; 2 – защитное кольцо; 3 – кольцевой канал.

Решение системы (1) – (6) имеет следующий вид:

$$t_1(r) = t_3 + \frac{q_{v1} R_1^2}{2\lambda_2} \ln\frac{R_2}{R_1} + \frac{q_{v1}}{4\lambda_1}\left(R_1^2 - r^2\right) + \frac{q_{v1} R_1^2}{2R_2\alpha_3},\ 0 \le r \le R_1; \tag{7}$$

$$t_2(r) = t_3 + \frac{q_{v1} R_1^2}{2\lambda_2} \ln\frac{R_2}{r} + \frac{q_{v1} R_1^2}{2R_2\alpha_3},\ R_1 \le r \le R_2. \tag{8}$$

Температура на поверхности защитного кольца есть:

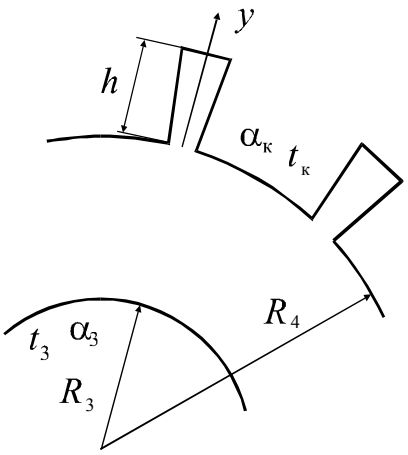


Рис. 2. Схема статора

$$t_2(R_2) = t_3 + \frac{q_{v1} R_1^2}{2 R_2 \alpha_3} \qquad (9)$$

Рассмотрим задачу о распределении температуры в статоре с внутренним тепловыделением. Расчётная схема статора приведена на рис.2.

$$\frac{d^2 t_c}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{dt_c}{dr} + \frac{q_{vc}}{\lambda_c} = 0, R_3 \le r \le R_4; \qquad (10)$$

$$t_c(R_3) = t_4; \qquad (11)$$

$$t_c(R_4) = t_5. \qquad (12)$$

Решение задачи (10) – (12) имеет вид:

$$t_c(r) = t_4 - \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(r^2 - R_3^2\right) + \frac{\ln(r/R_3)}{\ln(R_4/R_3)}\left[t_5 - t_4 + \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right)\right]. \qquad (13)$$

Здесь t_4, t_5 – температуры на внутренней и наружной поверхностях статора, соответственно. Плотность теплового потока на радиусе r есть:

$$q = -\lambda_c \frac{dt_c}{dr} = \frac{q_{vc} r}{2} - \frac{1}{\frac{r}{\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3}}\left[t_5 - t_4 + \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right)\right]. \qquad (14)$$

В (10) – (14) q_{vc} – плотность внутреннего тепловыделения в статоре; λ_c – коэффициент теплопроводности статора; q – плотность теплового потока.

Количество тепла, которое проходит через внутреннюю поверхность статора длиной l есть:

$$\alpha_3(t_4 - t_3)2\pi R_3 l = q_{vc}\pi R_3^2 l - \frac{\pi l}{\frac{1}{2\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3}}\left[t_5 - t_4 + \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right)\right]. \qquad (15)$$

Количество тепла, проходящее через наружную поверхность длиной l есть:

$$Q_4 = q_{vc}\pi R_4^2 l - \frac{\pi l}{\frac{1}{2\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3}}\left[t_5 - t_4 + \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right)\right]. \qquad (16)$$

Это количество тепла передаётся воздуху через стенку с рёбрами:

$$Q_4 = \alpha_к f_{св}(t_5 - t_к) + q_р f_р N_р. \quad (17)$$

Здесь $\alpha_к$ – коэффициент теплоотдачи в каналах статора; $f_{св}$ – площадь наружной поверхности статора, свободной от рёбер; $q_р$ – плотность теплового потока у основания ребра; $f_р$ – площадь основания ребра; $N_р$ – количество рёбер.

Длина боковой поверхности ребра отличается от его высоты на 0,2 %, поэтому площадь боковой поверхности ребра трапецевидного сечения отличается от площади боковой поверхности прямого ребра на эту же величину. Учитывая высокий коэффициент теплопроводности алюминиевого сплава можно с достаточно высокой точностью заменить трапецевидное ребро прямым. В этом случае [1]:

$$q_р = (t_5 - t_к)\sqrt{\alpha_к u_р \lambda_р f_р}\,\mathrm{th}(mh), \quad (18)$$

где $u_р = 2(a+l)$; $f_р = al$; $m = \left(\dfrac{\alpha_к u_р}{\lambda_р f_р}\right)^{1/2}$

и

$$Q_4 = (t_5 - t_к)\left[N_р\sqrt{\alpha_к u_р \lambda_р f_р}\,\mathrm{th}(mh) + \alpha_к f_{св}\right]. \quad (19)$$

Приравниваем (16) и (19).

$$q_{vc}\pi R_4^2 l - \frac{\pi l}{\dfrac{1}{2\lambda_c}\ln\dfrac{R_4}{R_3}}\left[t_5 - t_4 + \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right)\right] =$$
$$= (t_5 - t_к)\left[N_р\sqrt{\alpha_к u_р \lambda_р f_р}\,\mathrm{th}(mh) + \alpha_к f_{св}\right]. \quad (20)$$

Выразим t_5 из (15), подставим в (20) и найдём температуру на внутренней поверхности статора t_4.

$$t_5 = B_1 t_4 + B_2, \quad (21)$$

$$B_1 = 1 - \frac{R_3\alpha_3}{\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3}; \qquad B_2 = \frac{q_{vc}R_3^2}{2\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3} - \frac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right) + t_3\frac{R_3\alpha_3}{\lambda_c}\ln\frac{R_4}{R_3}.$$

$$t_4 = \frac{q_{vc}\pi R_4^2 l - B_2 A_2 - A_2\dfrac{q_{vc}}{4\lambda_c}\left(R_4^2 - R_3^2\right) + A_1 t_к}{(A_1 + A_2)B_1 - A_2}, \quad (22)$$

где $A_1 = N_р\sqrt{\alpha_к u_р \lambda_р f_р}\,\mathrm{th}(mh) + \alpha_к f_{св}$; $A_2 = \dfrac{\pi l}{\dfrac{1}{2\lambda_c}\ln\dfrac{R_4}{R_3}}$.

Температура воздуха по длине кольцевого зазора определяется из решения уравнения:

$$\frac{dt_3}{dx} = \frac{\alpha_3(t_4 - t_3)2\pi R_3 + \alpha_3(t_5 - t_3)2\pi R_4}{G_3 c_{p3}}. \quad (23)$$

Температура воздуха в каналах статора определяется из решения уравнения:

$$\frac{dt_к}{dx} = \frac{A_1(t_5 - t_к)}{lG_к c_{pк}}. \quad (24)$$

Здесь G – массовый расход; c_p – удельная теплоёмкость. Значения коэффициента теплоотдачи в каналах статора определяется по данным [1], а в кольцевом канале – по данным работы [2].

Изменение давления в кольцевом канале и каналах статора определяются из решения уравнений:

$$\frac{dp_3}{dx} = -\frac{1}{S_3 - \dfrac{G_3^2}{S_3 \rho_3 p_3}}\left(\frac{G_3^2}{S_3 \rho_3 T_3}\frac{dt_3}{dx} + \zeta_3 \frac{G_3^2 П_3}{8 S_3^2 \rho_3}\right); \quad (25)$$

$$\frac{dp_к}{dx} = -\frac{1}{S_к - \dfrac{G_к^2}{S_к \rho_к p_к}}\left(\frac{G_к^2}{S_к \rho_к T_к}\frac{dt_к}{dx} + \zeta_к \frac{G_к^2 П_к}{8 S_к^2 \rho_к}\right). \quad (26)$$

В уравнениях (25), (26) S – площадь сечения канала; $П$ – периметр канала; ρ – плотность; p – давление; T – абсолютная температура; ζ – коэффициент гидравлического сопротивления. Значения коэффициента гидравлического сопротивления в каналах статора определяются по данным [3], а в кольцевом канале – по данным [2].

Расчёт теплового режима работы выполнены при следующих исходных данных, полученных в результате электрического расчёта: q_{vc}=0,977 10^6 Вт/м^3; q_{v1}=0,812 10^5 Вт/м^3. Температура воздуха на входе в генератор 20 °С. Перепад давления в каналах генератора варьировался от 50 до 800 Па. Результаты расчётов приведены в таблицах 1 и 2. В таблице 1 приведены значения расходов в кольцевом канале и каналах статора при различных значениях перепада давления в каналах генератора.

Таблица 1

Значения расходов воздуха в каналах генератора

Δp, Па	$G_к$, кг/с	$G_З$, кг/с
50	0,2265	0,0002
100	0,3366	0,00041
200	0,50	0,00082
400	0,743	0,00164
800	1,104	0,00329

В таблице 2 приведены значения температур в статоре, роторе и воздуха в каналах.

Таблица 2

Значения температуры в элементах генератора

Δp, Па	Изменение температуры на оси ротора по длине, °С	Изменение средней температуры статора по длине, °С	Изменение температуры воздуха в кольцевом канале по длине, °С	Изменение температуры воздуха в каналах статора по длине, °С	Температура воздуха на выходе из генератора, °С
50	39-386	331-330	20-372	20-64	68
100	39-302	240-245	20-287	20-52	52
200	39-241	178-184	20-226	20-42	42
400	39-193	134-140	20-189	20-35	35
800	39-146	103-109	20-129	20-30	30

Как следует из результатов расчёта, средняя по толщине статора температура по длине генератора изменяется незначительно. Значительно сильнее изменяется температура ротора и воздуха в кольцевом канале. Удовлетворительные уровни температур получаются при перепаде давления порядка 800 Па.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание производства модельного ряда микротурбинных энергоустановок нового поколения» по договору № 02.G25.31.0078 от 23.05.2013 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и Открытым акционерным обществом специальным конструкторским бюро «Турбина» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Библиографический список

1. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1985. – 424 с.

2. Мочалин, Е.В. Теплообмен и гидравлические потери в зазоре между вращающимися цилиндрами / Е.В. Мочалин, С.А. Юрьев // Технологический аудит и резервы производства. – 2013. – № 3/1(11). – С. 45–48.

3. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

К содержанию

УДК 681.121

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГИДРОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ВИХРЕВОГО РАСХОДОМЕРА И ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Л. Карташев, А.А. Кривоногов

Проведено исследование научных работ в которых описывается процесс вихреобразования, в частности влияние изменения геометрии проточной части вихревого расходомера, на трехмерную структуру турбулентного потока вблизи тела обтекания. Проведены испытания вихревых расходомеров на воздушных и водных стендах, построены характеристики Sh(Re), проведены предварительные численные расчеты и представлено сравнение результатов.

Ключевые слова: вихревые расходомеры, трехмерная структура вихря, численное моделирование

Введение

Измерение расхода жидких и газообразных сред занимает важное место в системе производственных отношений. Требования, предъявляемые к средствам измерения расхода, возрастают с внедрением в промышленность ресурсосберегающих технологий. Среди таких, зачастую противоречивых требований – надежность и низкая стоимость, широкий динамический диапазон измерения и высокая точность, частотный выходной сигнал и отсутствие подвижных частей. На данный момент времени, с точки зрения удовлетворения этим требованиям, являются вихревые расходомеры с обтекаемым телом [1, 2].

Принцип действия вихревого расходомера с обтекаемым телом (далее – вихревой расходомер), основан на зависимости частоты срывающихся с тела регулярных крупномасштабных вихрей (дорожкой Кармана) от скорости потока и последующим детектированием вихрей при помощи сенсора [1, 2].

При создании измерительной системы вихревого расходомера основными проблемами являются обеспечение стабильности процесса вихреобразования в достаточно широком диапазоне скоростей. Особенно остро встают эти проблемы при измерении малых и больших расходов жидкости, и газа. Эффективность решения этих проблем напрямую зависит от того, насколько глубоко понятен механизм вихреобразования и дальнейшего распространения вихрей в потоке. В настоящее время накоплен достаточно обширный материал о процессе упорядоченного вихреобразования за плохообтекаемыми телами [3]. Однако многие вопросы остаются еще открытыми, особенно те, которые связаны с влиянием на процесс вихреобразования различных факторов, таких как ограниченность течения (обтекаемое тело вихревого расходомера находится в канале), неравномерность профиля скорости, турбулентности набегающего потока, пульсации скорости в потоке и влияние трехмерных эффектов в процессе вихреобразования на стабильность работы расходомера. В связи с этим, тема настоящего исследования связанна с изучением процесса срыва вихрей с тела обтекания, находящегося в трубе (проточная часть вихревого расходомера) и распространение вихрей от него по потоку, представляется весьма актуальной.

Постановка задачи

Преобразователь представляет собой отрезок трубопровода, с установленным в его диаметральной плоскости неподвижным телом обтекания специальной формы (рис. 1), ось которого, перпендикулярна оси трубопровода. При обтекании тела потоком вязкой жидкости или газа в следе за ним образуются вихревые структуры, которые регулярно отрываются с противоположных сторон обтекаемого тела. Чувствительный элемент (крыло) преобразует энергию импульса давления регулярных вихрей в выходной электрический сигнал. Частота преобразования в широком диапазоне скоростей пропорциональна объемному расходу газа, а количество импульсов – объему газа, прошедшему через преобразователь.

Структура течения и закономерности формирования регулярных вихрей в широком диапазоне параметров однозначно определяются двумя числами гидродинамического подобия: число Струхаля (Sh) и число Рейнольдса (Re).

Число Рейнольдса характеризует соотношения вязких и инерционных сил, определяется соотношением:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_{ср} \cdot D}{\nu}, \qquad (1)$$

где ν – кинематическая вязкость, D – диаметр проточной части, $V_{ср}$ – средняя скорость потока. Рабочий диапазон чисел для расходомера от 10000 до 200000.

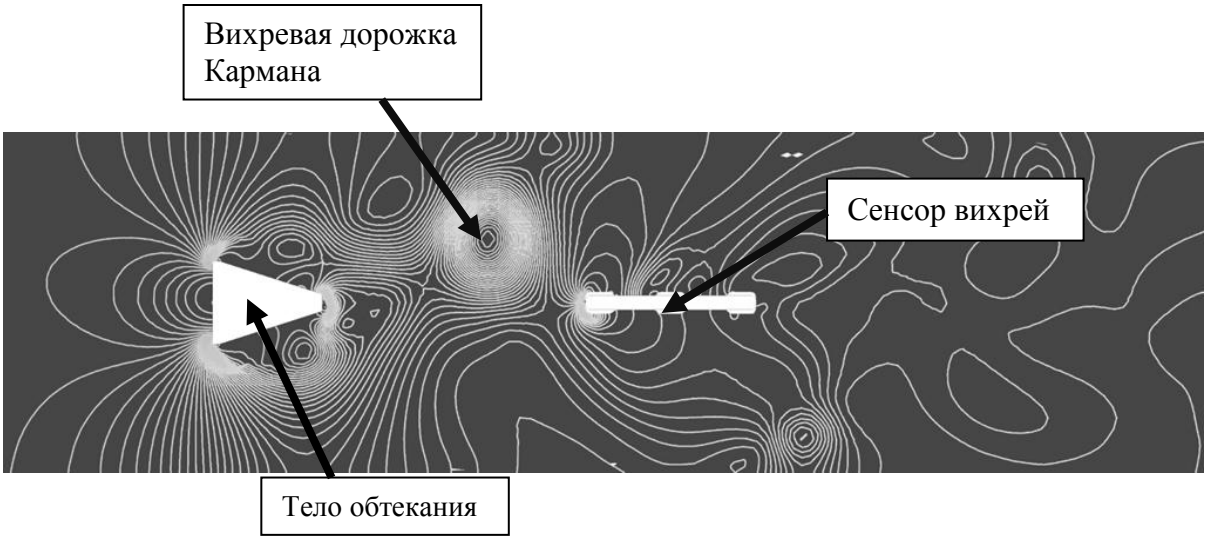


Рис. 1. Проточная часть вихревого расходомера во время работы

Число Струхаля представляет собой безразмерную частоту вихреобразования, нормированную по скорости набегающего потока, и определяется соотношением:

$$Sh = \frac{V_{ср} \cdot d}{f}, \qquad (2)$$

где f – частота генерации вихрей , d – размер генератора вихрей, $V_{ср}$ – среднее значение скорости в трубе.

При проведении очередных испытаний (в ЗАО ПГ Метран) расходомера с телом обтекания, у которого выступала цилиндрическая часть (рис. 2), был обнаружен эффект от влияния данной геометрической особенности тела обтекания на рабочую характеристику расходомера, причем на определенных скоростях потока (рис. 3), что свидетельствовало о возможном изменении процесса вихреобразования на определенных скоростях за счет выступающей цилиндрической части. В результате чего была поставлена цель: исследовать влияние изменения геометрии тела обтекания расположенного в проточной части вихревого расходомера, на трехмерную структуру турбулентного потока вблизи тела обтекания. Из цели была поставлена задача: Определить изменение характеристики Sh(Re) вызванное различиями геометрических параметров проточной части, а также исследовать трехмерную структуру вихревого течения.

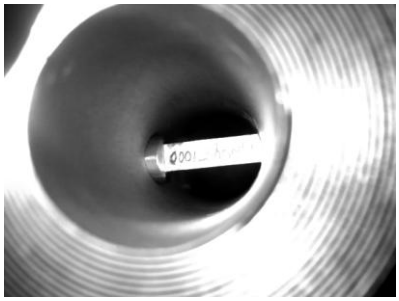


Рис. 2. Тело обтекания с выступающей цилиндрической частью

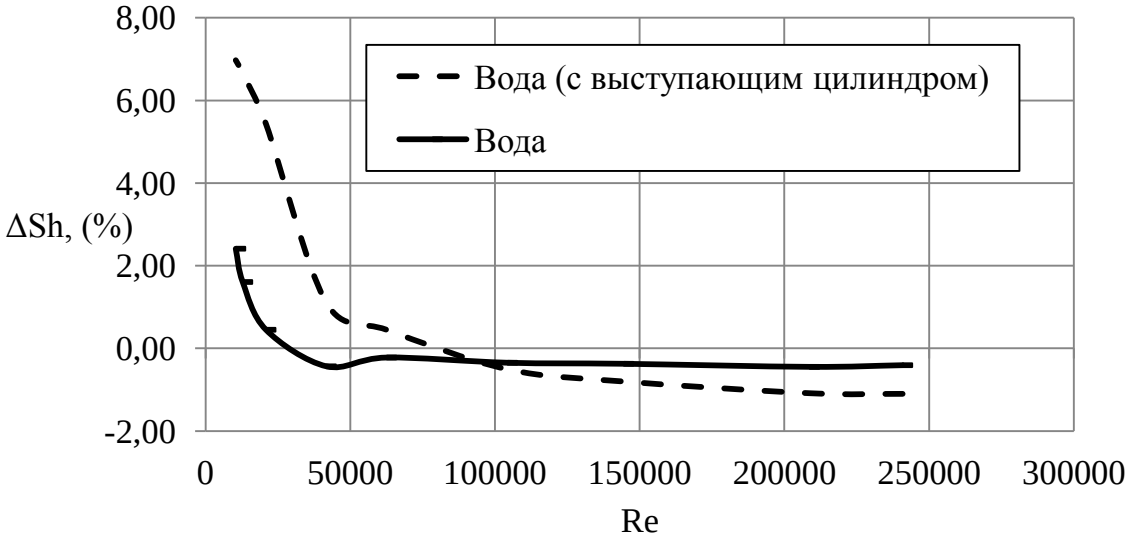


Рис. 3. Результаты испытаний тела обтекания с выступающей цилиндрической частью

Некоторые исследователи [4, 5] уже вносили корректировки в число Струхаля для потока в трубе с препятствием, путем введения эмпирических зависимостей и приведенных параметров характерного размера вихревого следа:

$$Sh = \frac{V_{ср} \cdot d_{вс}}{f}, \qquad (4)$$

где $d_{вс}$ – характерный размер вихревого следа;

$$Sh = 0,2 \cdot \left(1 + 7,25 \cdot K_q^{3,3}\right), \text{при } 10^4 < Re < 10^6, \qquad (5)$$

где $K_q = d/D$ – коэффициент загроможденности канала.

Но в рассмотренных формулах (4 и 5), нет учета трехмерных эффектов, происходящих в процессе вихреобразования в загроможденном канале, за счет нестабильности поперечного сечения тела обтекания по его длине.

При изучении литературы было установлено, что подобный вопрос уже рассматривался в работе Кратирова Д. В. [6]. Проводились тесты пластины с переменным и постоянным поперечным сечением, которые были установлены в трубе. В результате было определено, что на пластине с переменным поперечным сечением процесс вихреобразования отличается от пластины с постоянным поперечным сечением (рис. 4).

Автором [6] были сделаны следующие выводы: формирование единых вихрей с переменной частотой срыва по длине пластины не может быть продолжительным, поскольку такой механизм приводит к увеличению угла наклона оси каждого последующего вихря к плоскости пластины. Это, в свою очередь, приводит к разрыву единого вихря и формированию нового вихря в узкой части пластины. Разрыву вихря (рис. 4, справа), сопутствуют пульсации скорости пониженной амплитуды. Местоположение зон разрыва вихрей является случайным, а относительная частота появления разрывов изменяется по длине пластины приблизительно пропорционально местной частоте следования вихрей.

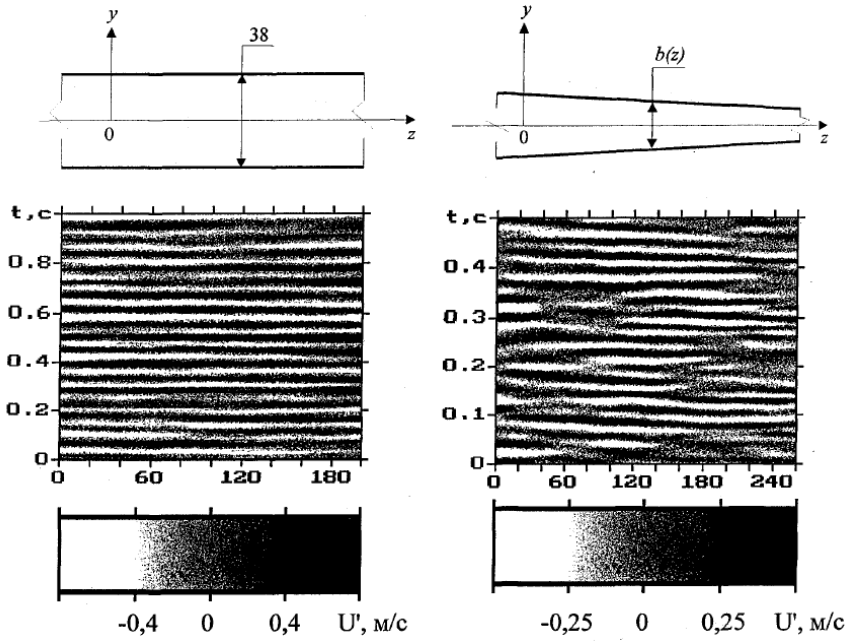


Рис. 4. Пространственно временное поле пульсаций скорости вблизи кромки пластины постоянной ширины и сужающейся пластины

Но в работе [6] не рассматривается дальнейшее распространение вихрей по проточной части, не тестируются тела обтекания более сложной формы. Кроме этого, во время выполнения данных исследований было достаточно сложно численно смоделировать процесс вихреобразования, происходящий в канале.

Верификация численных расчетов

Для того чтобы более детально понять процесс вихреобразования в проточной части расходомера, было принято решение проводить численные расчеты в программном пакете ANSYS CFX [7] так как возможности данного комплекса позволяют моделировать задачи подобного рода. Но перед тем как анализировать результаты расчетов необходимо верифицировать адекватность работы численной модели.

Для тестирования численной модели были проведены эксперименты. Для испытаний был создан макет проточной части вихревого расходомера (рис. 5) с внутренним диаметром 25 мм. Детектирование пульсаций вихрей осуществлялось при помощи механического сенсора «крыла». Испытания проводились на водном стенде, при различных скоростях потока. Численная модель соответствовала экспериментальной.

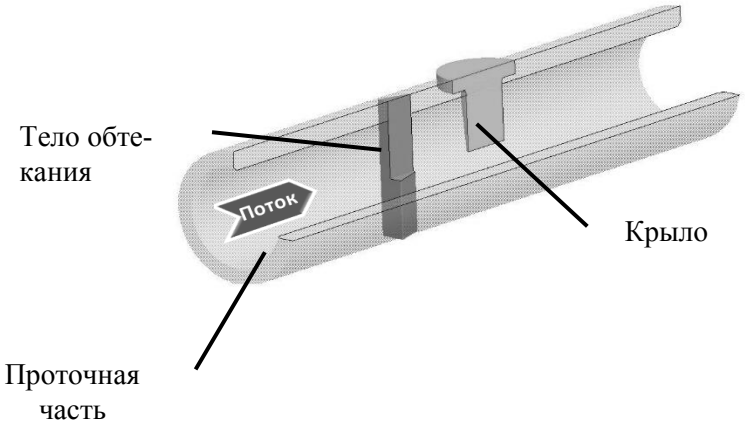


Рис. 5. Макет проточной части вихревого расходомера

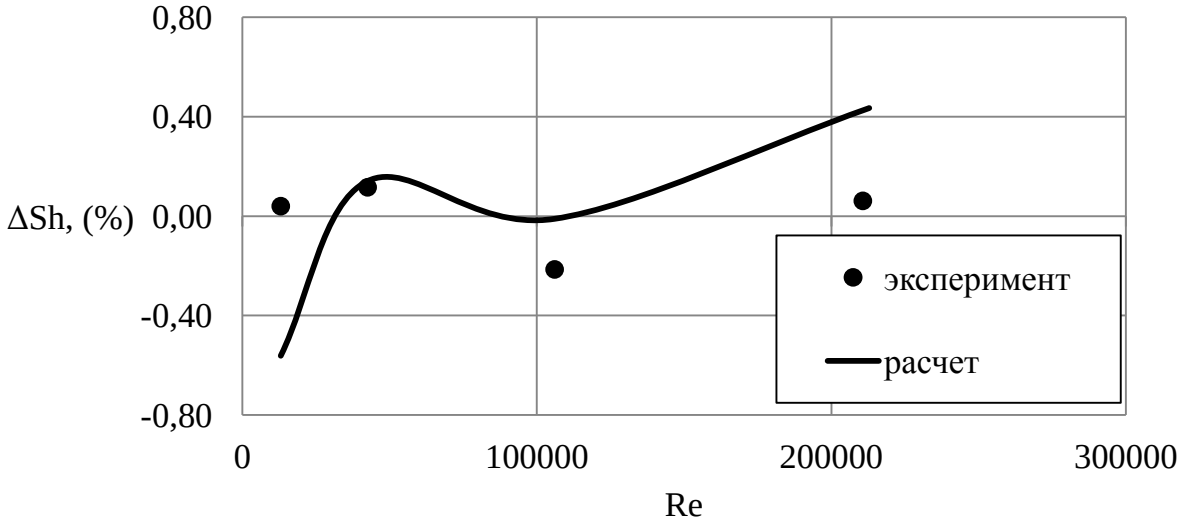


Рис. 6. Результаты численных расчетов

Из результатов численных расчетов (рис. 6) видно, что они соответствуют экспериментальным, колебания погрешности не превышает ± 0,4 %, а самое главное в том, что расчетная и экспериментальная кривые согласуются между собой, что свидетельствует о возможности анализа процессов вихреобразования по результатам численных расчетов в ANSYS CFX.

Заключение

При анализе литературы и экспериментальных данных стало ясно, что даже небольшое отклонение геометрических параметров проточной части может значительно искажать рабочую характеристику вихревого расходомера. При этом исследований по влиянию геометрических параметров проточной части на рабочую характеристику расходомера проведено мало, особенно учитывающих влияние трехмерных эффектов.

Для этого было принято решение использовать численную модель, реализованную в программном пакете ANSYS CFX, при верификации которой с экспериментом было установлено, что она достаточно хорошо с ним согласуется.

Библиографический список

1. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: справ. / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.

2. Baker, R.C. Flow measurement handbook: handbook. / R.C. Baker. – New York: Cambridge University Press, 2000. – 524 p.

3. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

4. Жукаускас, А.А. Конвективный перенос в теплообменниках / А.А. Жукаускас. – М.: Наука, 1982. – 472 с.

5. Еронин, М.В. Дорожка Кармана за обтекаемым телом вихревого расходомера в возмущенном потоке: автореф. дис. … канд. техн. наук / М.В. Еронин. – Казань, 2010. – 18 с.

6. Кратиров, Д.В. Структура течения и процесс вихреобразования вблизи обтекаемого тела вихревого расходомера: автореф. дис. … канд. техн. наук / Д.В. Кратиров. – Казань, 2000. – 12 с.

7. Богданов, В.Д. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров / В.Д. Богданов, А.В. Конюхов, А.А. Кривоногов, Е.В. Сафонов, В.А. Дорохов // Датчики и системы. – 2012. – № 8(159). – С. 40–43.

К содержанию

УДК 533

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ДАВЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВЫХ СОПЕЛ ВНЕШНЕГО РАСШИРЕНИЯ

М.А. Карташева, А.Л. Карташев

Рассмотрена схема течения в кольцевом сопле внешнего расширения с укороченным центральным телом. Выделены режимы открытой донной области и замкнутой донной области в кольцевых соплах рассматриваемого типа в зависимости от величины давления внешней среды. Определена ударно-волновая картина течения в кольцевом сопле на режиме замкнутой донной области.

Ключевые слова: кольцевое сопло внешнего расширения; давление внешней среды; режим донной области; ударно-волновая картина течения.

Кольцевое сопло, как и любое другое сопло, представляет собой газодинамическое устройство, предназначенное для создания осевой тяги и управляющих усилий либо для создания на выходе из сопла газового потока с заданными свойствами. Тяговые характеристики сопла при заданных параметрах рабочего тела на входе и параметрах внешней среды полностью определяются его геометрической конфигурацией.

Решение поставленной выше задачи находится с помощью математического моделирования течения газа [1]. Выбор надежного и эффективного метода математического моделирования необходимо провести с учетом характера газодинамических процессов, протекающих в кольцевых соплах, и анализа ударно-волновой структуры течения в кольцевом сопле заданной геометрической конфигурации при заданных параметрах рабочего тела. На рис. 1 представлена геометрическая конфигурация кольцевого сопла и его основные параметры.

В соответствии с целью настоящего исследования проведено математическое моделирование влияния внешнего давления на ударно-волновую картину течения в кольцевых соплах внешнего расширения. Течения в кольцевых соплах всех описанных типов имеют одну общую черту, а именно: наличие в поле течения интенсивных ударных волн и волн разрежения, положение которых внутри сопла определяется его геометрическими параметрами, параметрами рабочего тела и давлением внешней среды. Следовательно, многообразие конфигураций кольцевых сопел и условий их работы предполагает и многообразие ударно-волновых конфигураций в рассматриваемых соплах.

Характерной особенностью течения в таком сопле является наличие развитой отрывной области за торцем укороченного центрального тела, параметры которой определяются ударно-волновым взаимодействием газовых потоков, истекающих из минимального сечения сопла, представляющего кольцевую щель, плоскость которой имеет существенный наклон к продольной оси сопла.

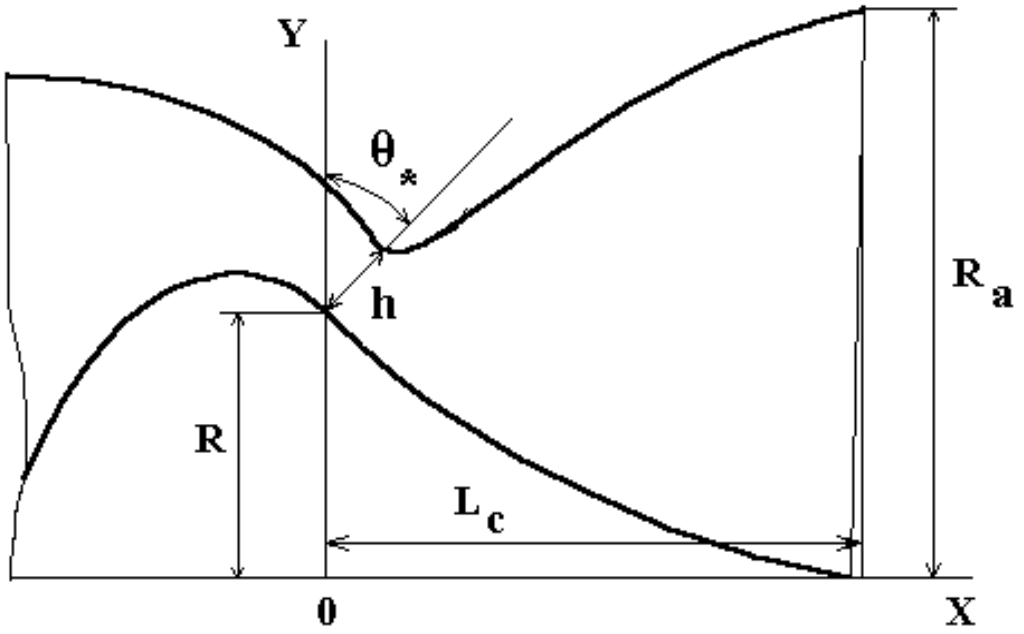


Рис. 1. Геометрические параметры кольцевого сопла
(R – радиус, на котором расположена внутренняя граница кольцевого минимального сечения; R_a – радиус выходной части сопла; h – ширина кольцевого минимального сечения сопла; L_c – длина сверхзвуковой части сопла; Θ_* – угол наклона плоскости минимального сечения сопла)

Данная особенность приводит к возникновению в потоке значительных градиентов газодинамических параметров, определяющих волновую структуру течения. В ходе проведенного численного моделирования исследована детальная структура течения в кольцевых соплах с укороченным центральным телом с целью определения распределения давления по поверхности кольцевого сопла, которое в конечном итоге и определяет тяговые характеристики сопла.

Сравнение тяговых характеристик кольцевых сопел (да и, вообще, сопел любого типа) удобно проводить, используя такую характеристику, которая бы не зависела от габаритных размеров сопла и величины расхода рабочего тела через сопло, а характеризовала бы эффективность организации процесса истечения газа из сопла, которое определяется геометрической конфигурацией сопла.

Такой характеристикой является коэффициент тяги, определяемый как отношение тяги сопла к площади минимального сечения сопла и давлению торможения на входе в сопло:

$$K_T = \frac{R_{сопла}}{F_* \cdot P_o}, \quad (1)$$

где $R_{сопла}$ – тяга сопла, F_* – площадь минимального сечения сопла, P_o – давление торможения на входе в сопло.

Для проведения математического моделирования характеристик кольцевых сопел выбрано сопло с частично укороченным центральным телом, которое является типичной конфигурацией для кольцевых сопел исследуемого типа.

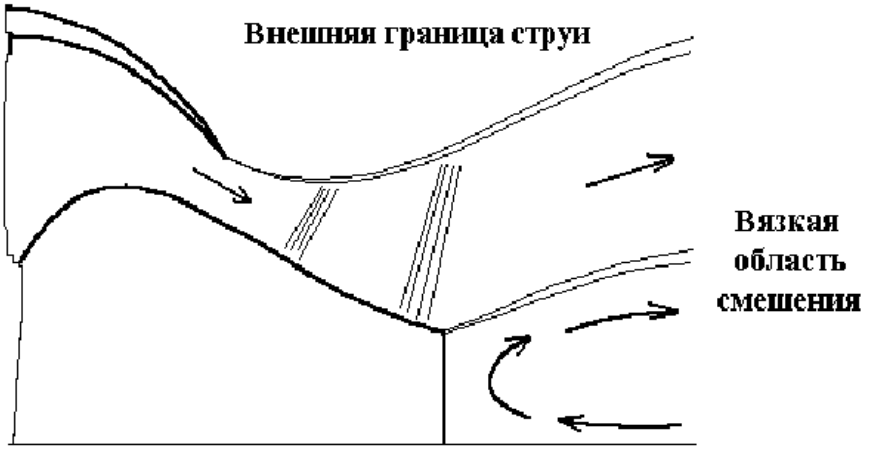
Расчет поля течения в кольцевом осуществлен с помощью метода установления с использованием расчетной схемы, описанной выше. В поле течения строится расчетная сетка с большим количеством ячеек, что позволяет существенно повысить точность расчета и увеличить скорость сходимости нестационарного решения к стационарному. В качестве критерия установления параметров потока принято постоянство распределения давления по обтекаемым поверхностям сопла и постоянство расхода газа через кольцевое минимальное сечение сопла. При постоянстве этих параметров, как показывает практика вычислений, величина тяги также является установившейся величиной.

В рассматриваемой конфигурации кольцевого сопла заметно существенное повышение давления на поверхности центрального тела в результате наличия системы скачков уплотнения, возникающей непосредственно после прохождения газом через кольцевую щель. Газ движется вдоль центрального тела в тонком сжатом слое, при этом диаметр ближнего следа существенно меньше диаметра, на котором расположено кольцевое минимальное сечение. Такой характер течения определяется низким перепадом давлений в сопле и является проявлением свойства саморегулируемости течения в кольцевом сопле по давлению внешней среды. За торцем укороченного центрального тела формируется замкнутая отрывная донная область, давление в которой меньше, чем в окружающей эту область струе. В целом, тяговые характеристики сопла определяются интегралом давления по всем поверхностям сопла, с учетом тяги создаваемой кольцевым минимальным сечением.

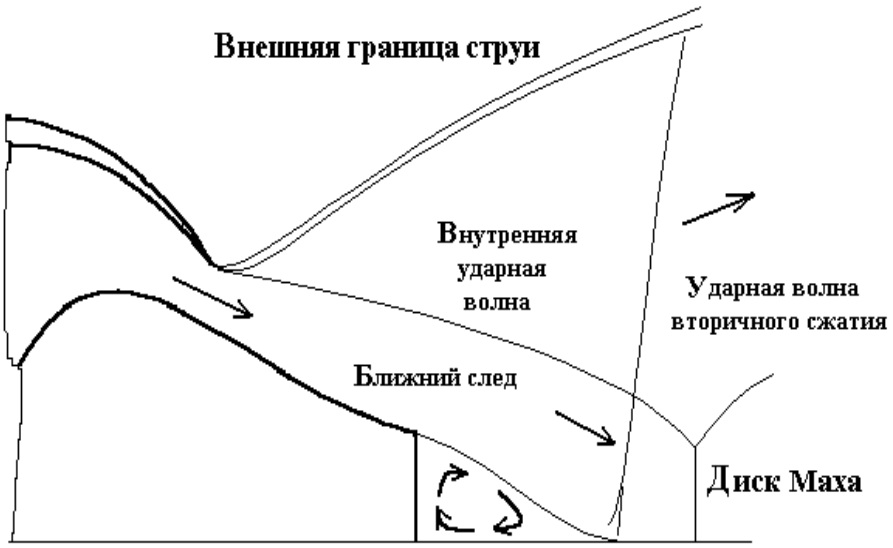
Результаты математического моделирования газодинамических характеристик кольцевого сопла различных геометрических конфигураций показали высокую эффективность применяемых методов С.К. Годунова – В.П. Колгана и М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова для расчета течений в кольцевых соплах.

По результатам численного моделирования определены картины течения в кольцевых соплах различных конфигураций [1].

Для рассматриваемых кольцевых сопел с укороченным центральным телом характерны два типа донной области за торцем укороченного центрального тела: «открытая донная область» и «замкнутая донная область» (рис. 2). При работе сопла с открытой донной областью давление на торце укороченного центрального тела полностью определяется давлением внешней среды (практически равно ему). При работе сопла с замкнутой донной областью давление в ней не равно давлению внешней среды, а полностью зависит от параметров газа, вытекающего из рассматриваемого сопла.



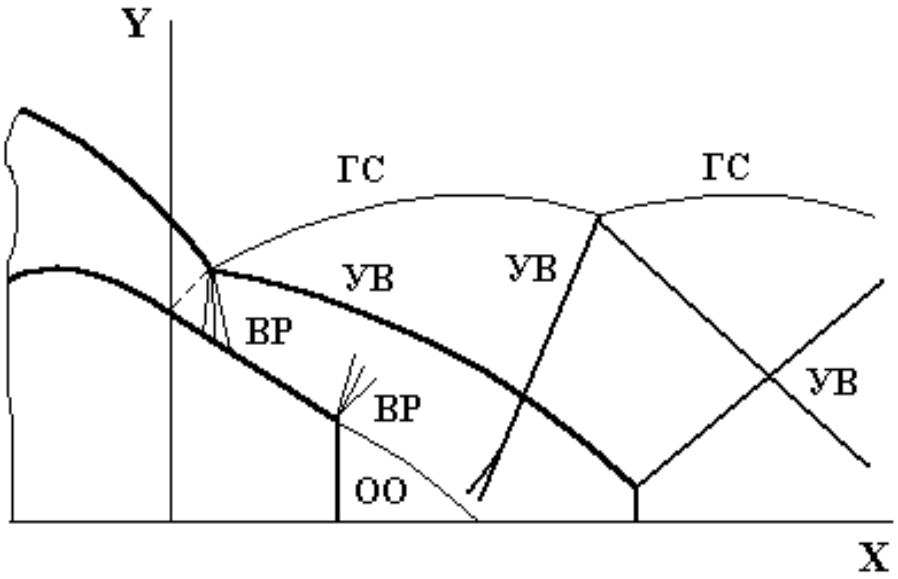
а)



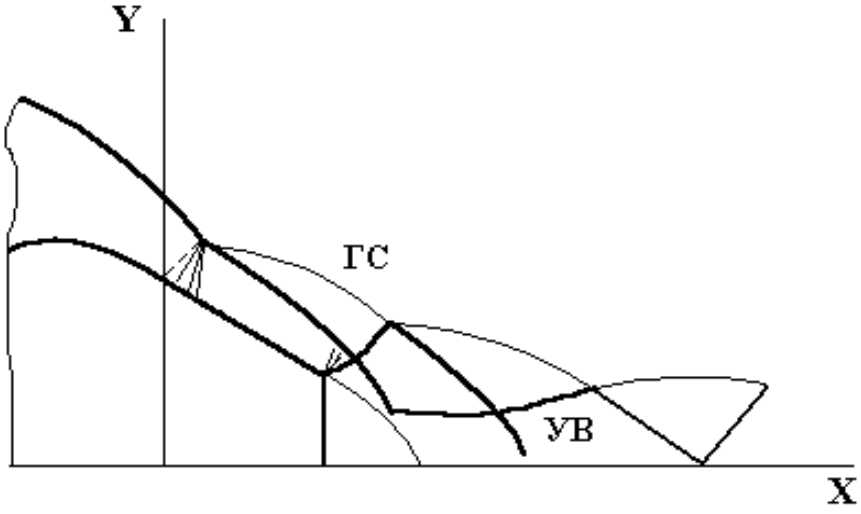
б)

Рис. 2. Течение в донной области кольцевого сопла
с укороченным центральным телом на различных режимах:
а – открытая донная область; б – замкнутая донная область

Результаты расчета ударно-волновой картины течения для режима замкнутой донной области представлены на рисунке 3. На данном рисунке приведена типичная схема течения в кольцевом сопле с укороченным центральным телом на режиме «закрытой» донной области для различных соотношений давления на срезе сопла P_a и давления внешней среды P_H. Сокращениями на нем обозначены: УВ – ударная волна, ВР – волна разрежения, ГС – граница струи, ОО – отрывная область.



а) $P_a > P_н$



б) $P_a < P_н$

Рис. 3. Схемы течения в кольцевом сопле с укороченным центральным телом при различных отношениях давлений

Ударно-волновая картина течения, представленная на рисунке 3а), соответствует высокому давлению газового потока в выходном сечении кольцевого сопла, превышающему давление внешней среды, ударно-волновая картина течения, представленная на рисунке 3б), соответствует низкому давлению газового потока в выходном сечении кольцевого сопла, имеющему значение ниже давления внешней среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования зависимости режима донной области кольцевого сопла внешнего расширения с укороченным центральным телом и ударно-волновой картины течения от давления внешней среды могут быть использованы при определении газодинамической структуры потока в кольцевых соплах летательных аппаратов различного назначения и их тяговой эффективности.

Библиографический список

1. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.

К содержанию

УДК 519.63

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЙ СОВЕРШЕННОГО ГАЗА В КОЛЬЦЕВЫХ СОПЛАХ

М.А. Карташева

Исследованы методы расчета течений совершенного газа в кольцевых соплах внешнего расширения, у которых отсутствует внешняя обечайка. Рассмотрена схема течения в кольцевом сопле внешнего расширения с укороченным центральным телом. Предложены варианты использования численных методов для расчета течений в до-, трансзвуковой и сверхзвуковой областях потока. На основе предложенных методов расчета разработаны вычислительные алгоритмы для моделирования газодинамических и тяговых характеристик кольцевых сопел внешнего расширения.

Ключевые слова: кольцевое сопло внешнего расширения; расчетная область; метод установления; разностная схема.

Расчет параметров течения газа в кольцевых соплах представляет достаточно сложную задачу вследствие большего, чем в соплах Лаваля, числа газодинамических особенностей в структуре течения [1]. Тем не менее, пред-

ставляется целесообразным использовать для расчета течений в кольцевых соплах методы, развитые для расчетов течений газа в соплах Лаваля, каналах сложной геометрической формы и других газодинамических устройствах, а также для расчета параметров течения при исследовании внешнего обтекания тела. При этом предпочтение следует отдавать так называемым методам сквозного счета, позволяющим получить решение без выделения особенностей в потоке, так как, как правило, положение ударных волн, волн разрежения и контактных разрывов в поле течения кольцевого сопла заранее неизвестно. В этой связи необходимо отметить работы С.К. Годунова [2, 3], в которых предложена разностная схема первого порядка точности, основанная на решении задачи распада произвольного разрыва и получившая название схемы С.К. Годунова, работы В.П. Колгана [4, 5], в которых предложена модификация схемы С.К. Годунова, повышающая порядок схемы по пространственным переменным до двух, а также работу Тилляевой Н.И. [6], рассматривающую некоторые аспекты применения упомянутой схемы. И особо следует отметить ставшую классической монографию [7], выполненную следующим коллективом авторов: С.К Годуновым, А.В. Забродиным, М.Я. Ивановым, А.Н. Крайко, Г.П. Прокоповым. Также следует отметить стационарный аналог схемы С.К. Годунова, разработанный М.Я. Ивановым, А.Н. Крайко, Н.В. Михайловым для расчета сверхзвуковых течений [8, 9].

Необходимо отметить, что применение упомянутых выше численных методов для расчета течений в кольцевых соплах вызывает ряд трудностей, без решения которых невозможно эффективное применение этих методов. Такие трудности связаны, прежде всего, с наличием в потоке двух обтекаемых поверхностей и большей сложностью газодинамической структуры течения. Поэтому, при применении ставших классическими для расчета течений в соплах Лаваля вычислительных алгоритмов к расчету течений в кольцевых соплах требуется соответствующая модификация (адаптация) применяемых вычислительных алгоритмов с учетом специфических особенностей течения в кольцевых соплах.

Течения в кольцевых соплах всех описанных типов имеют одну общую черту, а именно: наличие в поле течения интенсивных ударных волн и волн разрежения, положение которых внутри сопла определяется его геометрическими параметрами, параметрами рабочего тела и давлением внешней среды. Следовательно, многообразие конфигураций кольцевых сопел и условий их работы предполагает и многообразие ударно-волновых конфигураций в рассматриваемых соплах. Поэтому для проведения математического моделирования течений в кольцевых соплах целесообразно использовать численные методы, не связанные с выделением особенностей в поле течения и обеспечи-

вающие проведение «сквозного» расчета. Численные методы, в которых необходимо выделение особенностей, могут быть использованы для уточнения картины течения, в тех случаях, когда положение разрывов в потоке установлено с помощью предварительных расчетов.

В рассматриваемых геометрических конфигурациях кольцевых сопел в поле течения присутствуют дозвуковые и сверхзвуковые области (расчетная область кольцевого сопла представлена на рис. 1).

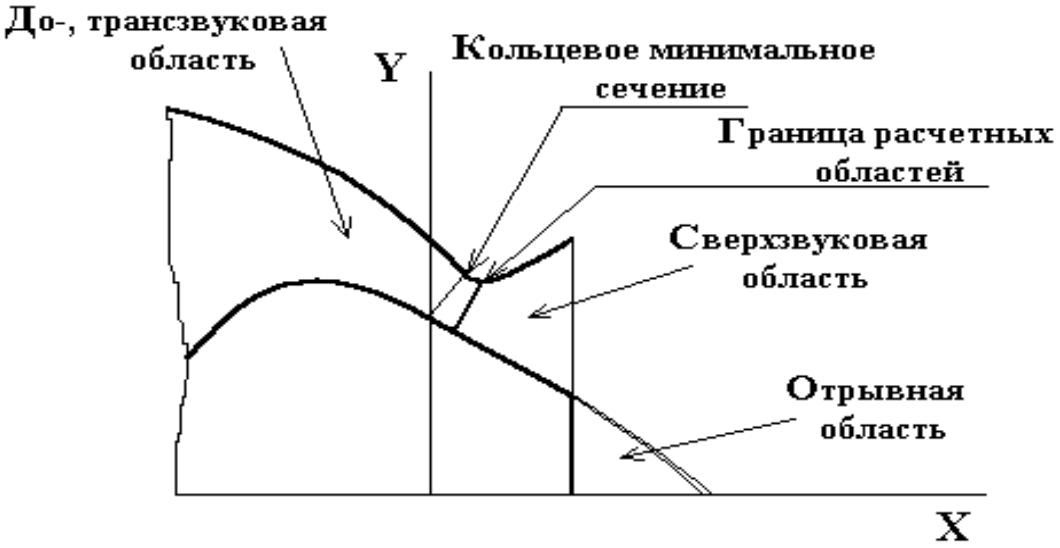


Рис. 1. Расчетная схема кольцевого сопла

Область перехода потока через скорость звука будем рассматривать как область трансзвукового течения. Сложность расчета поля течения в кольцевом сопле обусловлена тем, что все три области течения: до-, транс-, сверхзвуковая расположены во внутреннем объеме сопла не последовательно, как в сопле Лаваля, а более сложным образом: три области течения могут чередоваться друг с другом и быть распределены по внутреннему объему сопла нерегулярно, что определяется геометрическими параметрами сопла и условиями его работы.

Течение газа в кольцевом сопле представляет собой двумерное осесимметричное течение. Нестационарная система уравнений газовой динамики, описывающая осесимметричное течение невязкого газа, в интегральной форме имеет следующий вид [10]:

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial}{\partial t}\iint\limits_{\sigma} y\rho dxdy + \oint\limits_{\Gamma} y\rho(udy - vdx) = 0;\\
&\frac{\partial}{\partial t}\iint\limits_{\sigma} y\rho u dxdy + \oint\limits_{\Gamma} y((\rho u^2 + p)dy - uvdx) = 0;\\
&\frac{\partial}{\partial t}\iint\limits_{\sigma} y\rho v dxdy + \oint\limits_{\Gamma} y\left(\rho uvdy - \left(\rho v^2 + p\right)dx\right) = \iint\limits_{\sigma} pdxdy;\\
&\frac{\partial}{\partial t}\iint\limits_{\sigma} y\rho\left(e + \frac{V^2}{2}\right)dxdy + \oint\limits_{\Gamma} y\rho\left(\frac{p}{\rho} + e + \frac{V^2}{2}\right)(udy - vdx) = 0.
\end{aligned} \qquad (1)$$

где ρ – плотность газа;

p – давление газа;

u, v – осевая и радиальная компоненты вектора скорости $\vec{V}$;

x, y – осевая и радиальная координаты;

$e = \frac{1}{k-1}\cdot\frac{p}{\rho}$ – удельная внутренняя энергия газа;

t – время;

σ – произвольная замкнутая область в плоскости X, Y с границей Г.

Вопрос о количестве граничных условий для рассматриваемой системы уравнений решается на основе анализа ее характеристических свойств. На стенках ставится условие непротекания V_n=0; на границе струи задается давление $p = p_н$; на входной дозвуковой границе должны быть поставлены три граничных условия, в качестве которых используется постоянство энтропии $S = \text{const}$, полной энтальпии $H_o = \text{const}$, распределение угла наклона вектора скорости $\Theta_* = \Theta_*(x, y)$. На сверхзвуковой входной границе необходимо задание всех параметров течения. Выходная граница выбирается таким образом, чтобы нормальная к границе составляющая скорости была сверхзвуковой. Граничных условий в этом случае не требуется.

В качестве уравнения состояния рассматриваемого газа принято уравнение состояния совершенного газа:

$$p = \rho RT\,. \qquad (2)$$

Основной задачей, стоящей перед исследователем, является разработка вычислительного алгоритма расчета течений, который бы позволял наиболее эффективно решать задачу определения структуры течения в рассматриваемой расчетной области. В понятие «эффективность» следует включить как вполне естественные при решении задачи численным методом требования устойчивости разностной схемы, ее сходимости, обладание требуемым порядком точности, так и требования, связанные непосредственно с объектом исследования. В рассматриваемом случае исследования течений в кольцевых соплах такими требованиями являются способность вычислительного алгоритма к «сквозному» расчету поля течения вследствие предполагаемой сложности картины течения и достаточно малое время расчета, связанное с тем, что программу расчета поля течения предполагается использовать для нахождения оптимальных кольцевых сопел в составе пакета прикладных программ. При этом процедура оптимизации предполагает многократные расчеты поля течения в оптимизируемом объекте.

Построение вычислительного алгоритма расчета течений в кольцевых соплах может быть осуществлено с использованием известных и хорошо себя зарекомендовавших для расчета течений в соплах Лаваля методов и разностных схем. Однако, использование этих методов в той постановке, в какой они используются в соплах Лаваля, не представляется возможным вследствие существенных различий в геометрических конфигурациях кольцевого сопла и сопла Лаваля, что обусловливает и различия в газодинамической структуре потока рассматриваемых сопел. Поэтому, в процессе разработке вычислительного алгоритма расчета течения в кольцевом сопле необходима соответствующая модификация (адаптация) известных численных методов и разностных схем, то есть, необходима новая постановка задачи математического моделирования течения в рассматриваемом кольцевом сопле.

Расчет поля течения в кольцевом сопле представляет собой расчет смешанного течения, так как в поле течения кольцевых сопел имеются зоны дозвукового и сверхзвукового течения. В этом случае стационарные уравнения газовой динамики являются уравнениями смешанного типа: эллиптическими в дозвуковой зоне и гиперболическими в сверхзвуковой зоне, причем местоположение и геометрическая конфигурация поверхностей, разделяющих эти зоны (а в поле течения кольцевого сопла их может быть несколько) заранее неизвестны. Численный расчет течения в рассмотренном случае наталкивается на две взаимосвязанные трудности: необходимо применение различных численных методов в областях, расположение которых заранее неизвестно. Для разрешения этих трудностей целесообразно использовать метод установления [11], заключающийся в рассмотрении нестационарного физического процесса и его установления по времени (решении стационарной задачи

с помощью нестационарной). Введение временной координаты означает переход к гиперболической системе уравнений, справедливой во всех областях рассматриваемого течения, для решения которой применяется один численный метод.

Решение данной нестационарной системы сходится с течением времени к решению стационарной задачи. В связи с этим важное значение имеет выбор критерия установления, по которому можно судить о достижении искомого результата. В качестве такого критерия целесообразно использовать постоянство какой-либо интегральной характеристики течения на определенном временном промежутке. В случае кольцевого сопла одним из таких критериев может быть постоянство давления на поверхностях сопла, так как именно интеграл давления по поверхностям сопла определяет его тяговую характеристику (в зависимости от поставленной цели расчета могут быть использованы и другие критерии установления).

Алгоритм расчета смешанных течений идеального газа в кольцевых соплах построен на основе общего подхода к численному решению задач газовой динамики, предложенного в работе С.К. Годунова, А.В. Забродина, М.Я. Иванова, А.Н. Крайко, Г.П. Прокопова «Численное решение многомерных задач газовой динамики» [7], а также на методах, изложенных в работах [12, 13]. Данный подход основан на методе С.К. Годунова, предложенном в работе [2].

Рассматриваемая разностная схема имеет первый порядок точности по пространству и времени, что, вообще говоря, не в полной мере удовлетворяет задаче моделирования течений в кольцевых соплах ввиду многообразия и геометрической сложности волновых структур, так как в этом случае требуется повышенная точность расчета. Кроме того, известно, что схема [7] в ее первоначальном варианте не совсем адекватно описывает разрывы параметров различных типов (ударные волны, волны разрежения, контактные разрывы) используя решение одной задачи о распаде разрыва при определении параметров газа в ячейке разностной сетки.

Поэтому в данной работе для расчета параметров кольцевых сопел использована модификация В.П. Колгана схемы [7], имеющая второй порядок точности по пространственным переменным и более точно описывающая параметры газа при рассмотрении разрывов параметров газа в поле течения [4, 5]. Данная модификация построена с применением принципа минимальных значений производной к построению разностной схемы. В работе также использованы идеи, представленные в работе Н.И. Тилляевой [6], представляющие некоторые аспекты практического применения модификации [4, 5] схемы [7] для произвольных нерегулярных расчетных сеток.

Выбор схемы [7] с модификацией [4, 5] обусловлен точностью данного метода, его надежностью (в смысле обеспечения сходимости и устойчивости используемой разностной схемы) и апробированностью для расчета смешанных течений в соплах [13, 14, 15].

Особенности постановки задачи математического моделирования течений в кольцевых соплах связаны с наличием в потоке сложной ударно-волновой структуры, состоящей из достаточно близко расположенных ударных волн и волн расширения. Поэтому при расчетах течения в кольцевых соплах особого внимания требует построение разностной сетки, которая должна позволить с достаточной точностью определить местоположение указанных выше волновых структур.

В качестве алгоритма построения разностной сетки рассмотрена процедура построения приближенно ортогональных разностных сеток. Ортогонализация сетки проводится с помощью решения уравнений Лапласа. Разностная сетка может быть задана с помощью фиксированных в пространстве узлов сетки либо с помощью алгоритма построения подвижной разностной сетки, расположение узлов в которой определяется характером течения (например, организуется сгущение узлов разностной сетки в областях разрывов, там, где градиенты газодинамических параметров имеют значительные величины). Для расчета течений в кольцевых соплах в рамках настоящего исследования используются подвижные разностные сетки, что позволяет существенно снизить время расчета одного варианта поля течения и одновременно повысить точность определения параметров течения. Особенностью применяемого алгоритма является одновременное перераспределение узлов, составляющих координаты центрального тела и внешней обечайки. При этом в ряде случаев возможны как существенная деформация ячеек сетки, так и перехлест линий, образующих сетку, что приводит к невозможности продолжения расчета. Для того, чтобы избежать возникновения такой ситуации, при каждом перестроении разностной сетки использован алгоритм проверки возможности ортогонализации ячеек разностной сетки.

Для расчета параметров сверхзвукового течения в кольцевых соплах в случаях, когда заранее известен характер течения, используется разностная схема М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова, являющаяся стационарным аналогом схемы С.К. Годунова. В данной работе использовано обобщение схемы М.Я. Иванова – А.Н. Крайко – Н.В. Михайлова, необходимость использования которого связана с тем, что в кольцевых соплах направление, вдоль которого скорость течения больше скорости звука, в общем случае не совпадает с осью симметрии потока. Как правило, в кольцевом сопле в поле течения присутствует значительная радиальная компонента скорости (причем

она может быть направлена как к оси сопла, так и в противоположном направлении). Такая особенность течения газа в кольцевом сопле требует вычисления осевой и радиальной компонент вектора скорости и проверки наличия сверхзвукового течения в направлении, перпендикулярном выходной границе расчетной области сопла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе указанных расчетных методов разработаны вычислительные алгоритмы, позволяющие проводить расчеты течений в кольцевых соплах без предварительного выделения особенностей и определить газодинамические параметры потока и тяговые характеристики кольцевого сопла. Основное отличие представляемых вычислительных алгоритмов от применяемых ранее – их модификация в части построения разностной сетки и постановки граничных условий. Такие различия обусловлены особой геометрией расчетной области кольцевого сопла: наличием двух обтекаемых поверхностей и сложной искривленной геометрией расчетной области, что приводит к наличию в исследуемом потоке значительных градиентов газодинамических параметров и необходимости «подстраивать» разностную сетку под особенности течения.

Библиографический список

1. Карташев, А.Л. Математическое моделирование течений в кольцевых соплах / А.Л. Карташев, М.А. Карташева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 158 с.

2. Годунов, С.К. Разностный метод численного расчета разрывных решений уравнений гидродинамики / С.К. Годунов // Матем. сб. – 1959. – № 47. – Вып. 3. – С. 271–306.

3. Годунов, С.К. Разностные схемы / С.К. Годунов, В.С. Рябенький. – М.: Наука, 1973. – 400 с.

4. Колган, В.П. Применение принципа минимальных значений производной к построению конечноразностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики / В.П. Колган // Уч. зап. ЦАГИ. – 1972. – Т. 3. – № 6. – С. 68–77.

5. Колган, В.П. Конечно-разностная схема для расчета двумерных разрывных решений нестационарной газовой динамики / В.П. Колган // Уч. зап. ЦАГИ. – 1975. – Т. 6. – № 1. – С. 9–14.

6. Тилляева, Н.И. Исследование возможностей модификации В.П. Колгана численной схемы С.К. Годунова, сохраняющей аппроксимацию на произвольных расчетных сетках / Н.И. Тилляева // Технический отчет ЦИАМ № 9860. Москва, 1982. – 46 с.

7. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов, А.В. Забродин, М.Я. Иванов и др. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

8. Иванов, М.Я. Метод сквозного счета двумерных и пространственных сверхзвуковых течений / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко, Н.В. Михайлов // ЖВМ и МФ. – 1972. – Т. 12. – № 2. – С. 441–463.

9. Иванов, М.Я. Метод сквозного счета двумерных и пространственных сверхзвуковых течений / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко // ЖВМ и МФ. – 1972. – Т.12. – № 3. – С. 805–813.

10. Двухфазные моно- и полидисперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер и др. – М.: Машиностроение, 1980. – 176 с.

11. Годунов, С.К. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отошедшей ударной волной / С.К. Годунов, А.В. Забродин, Г.П. Прокопов // ЖВМ и МФ. – 1961. – Т. 1. – № 6. – С. 1020–1050.

12. Иванов, М.Я. Численное решение прямой задачи о смешанном течении в соплах / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1969. – № 5. – С. 77–83.

13. Иванов, М.Я. Расчет смешанного течения газа в соплах / М.Я. Иванов, А.Н. Крайко // Труды секции по численным методам в газовой динамике 2-го Международного коллоквиума по газодинамике взрыва и реагирующих систем. – Новосибирск. – 1969. – Т. 2. – М.: ВЦ АН СССР. – 1971. – С. 3–26.

14. Исследование нерасчетных режимов регулируемого тарельчатого сопла / Ю.В. Гора, Л.З. Гребенюк, Н.Д. Коваленко и др. // Динамика насосных систем. Киев: Наукова думка, 1980. – С. 137–144.

15. Гора, Ю.В. Численное исследование течения идеального газа в трансзвуковой области кольцевого сопла с подвижной обечайкой / Ю.В. Гора // Динамика насосных систем. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 152.

К содержанию

УДК 629.782.015 + 629.788

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ

С.В. Махнович, Е.А. Визняк

В статье рассматриваются существующие концепции систем аварийного спасения экипажа космического корабля, их состав и алгоритм работы. Проведен сравнительный анализ характеристик этих систем. Приведены рекомендации к их использованию при проектировании космических кораблей.

Ключевые слова: Система аварийного спасения, ракета-носитель, катапультное кресло, космический корабль.

12 апреля 1961 года человечество проложило путь в космическую эру. Еще на этапе подготовки первого полета человека в космос остро встала проблема спасения экипажа в аварийной ситуации. Ракета – агрегат, 90 % массы которого составляет взрывоопасное топливо. В случае нештатной ситуации конструкция угрожает превратиться в огненный шар, став смертельной ловушкой для экипажа.

Для первых пилотируемых полетов космические корабли (КК) («Восток», «Джемини») снабжались автоматическими катапультными устройствами, показанными на (рис. 1) [3].

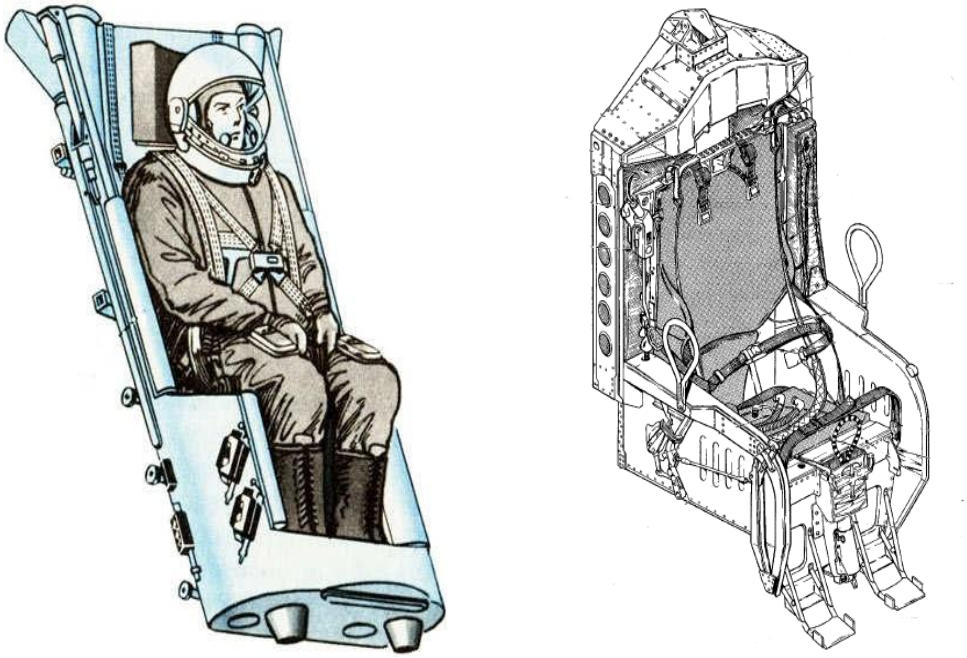


Рис. 1. Катапультируемые кресла космических кораблей «Восток» и «Джемини»

В состав катапультного устройства космического корабля «Восток» входят:

- кресло с космонавтом в скафандре, запасом кислорода и продовольствия;
- два ракетных двигателя твердого топлива (РДТТ), вмонтированных в кресло;
- пиротехнические средства отделения крышки аварийного люка;
- система парашютов для стабилизации полета, отделения кресла, мягкой посадки экипажа;
- система аварийного срабатывания;
- направляющие поверхности.

Таблица 1

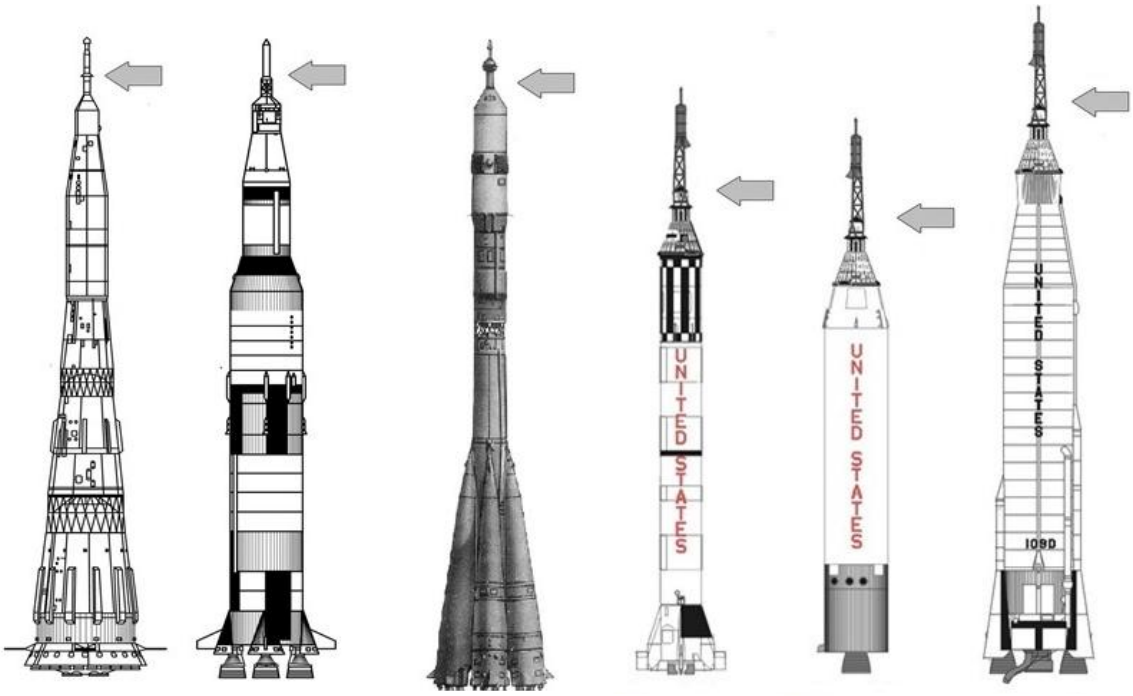
Технические характеристики катапультного устройства космического корабля «Джемини»

Масса кресла с космонавтом	150–200 кг
Ракетные двигатели твердого топлива	2x15.5 кН
Создаваемые перегрузки	До 24 g в течение 0.27с
Угол между направлением эвакуации и продольной осью ракеты-носителя	49°
Дальность эвакуации при аварии на старте	300 м
Высота подъема при аварии на старте	150 м

Алгоритм действия катапультирующего устройства следующий [4]:

При аварии выходной люк отделяется пироболтами; включаются РДТТ, вмонтированные в кресло, и выводят кресло с космонавтом из космического корабля. В полете раскрывается стабилизирующий парашют. При удалении на безопасное расстояние раскрывается тормозной парашют, отделяющий экипаж от кресла. На конечном этапе раскрывается основной парашют, обеспечивающий мягкую посадку космонавта.

При создании многоместных космических кораблей было решено в случае чрезвычайной ситуации спасать экипаж вместе с частью космического корабля методом отделения головной части ракеты-носителя, при этом двигательная установка (ДУ) спасательного устройства располагается над головным обтекателем. Этот вид систем аварийного спасения (САС) нашел свое применение в космических кораблях «Союз», «Аполлон», «Меркурий», «Л-3» (рис. 2). Технические характеристики системы аварийного спасения космических кораблей «Союз ТМ» и «Союз ТМА» приведены в табл. 3. Конструктивная схема системы аварийного спасения пилотируемых космических кораблей «Союз ТМ» и «Союз ТМА» приведена на рис. 3.



«Н – 1» КК «Л-3» «Сатурн-5» КК «Аполлон» «Союз» КК «Союз» «Редстоун» «Юпитер» КК «Меркурий» «Атлас»

Рис. 2. Схема расположения системы аварийного спасения на различных ракетах-носителях

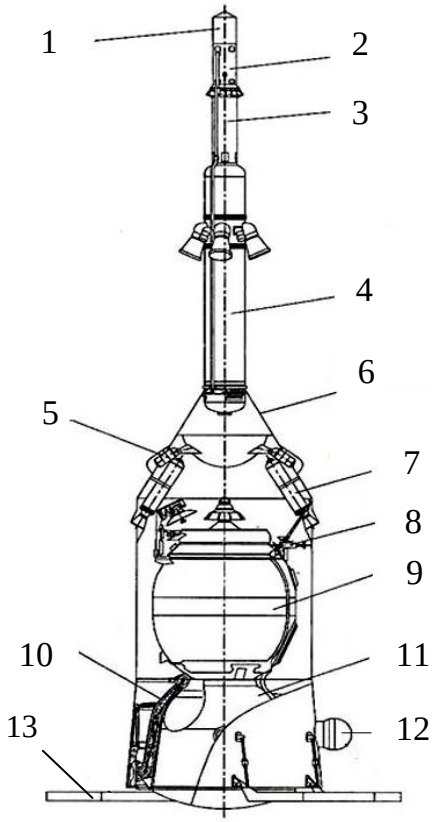


Рис. 3. Состав системы аварийного спасения с отделяемой головной частью КК «Союз ТМ» и «СОЮЗ ТМА»:
1 – балансировочный груз;
2 – управляющие двигатели;
3 – двигатели разделения;
4 – центральный двигатель;
5 – двигатели отделения створок;
6 – головной обтекатель;
7 – двигатели головного обтекателя;
8 – верхние опоры КК;
9 – бытовой отсек;
10 – нижние опоры КК;
11 – спускаемый аппарат;
12 – блистер оптического визира;
13 – решетчатые стабилизаторы.

Состав САС с отделяемой головной частью [2]:

- уводимая часть: бытовой отсек (БО) и спускаемый аппарат (СА);
- система автоматического срабатывания системы аварийного спасения (блоки автоматики, программно-временное устройство, блоки питания, гироприборы, бортовая кабельная сеть);
- пироболты для отделения головной части от ракеты-носителя;
- механизмы и агрегаты САС, размещенные на головном обтекателе (решетчатые стабилизаторы, нижние и верхние опоры космического корабля, механизмы аварийного стыка, блистер оптического визира);
- балансировочный груз;
- двигательная установка САС.

Двигательная установка системы аварийного спасения представляет собой систему из трех типов РДТТ: разделяющие – для отделения и отведения уводимой части от ракеты-носителя, управляющие двигатели для формирования и стабилизации траектории полета и двигатели сброса створок для отделения и отвода ДУ САС и БО от места посадки СА [4].

Таблица 2

Технические характеристики системы аварийного спасения с отделяемой головной частью КК «Союз ТМ» и «Союз ТМА» [5]

Масса двигательной установки САС	2800 кг
Длина САС (с уводимой частью)	9.98 м
Диаметр головного обтекателя	3 м
Тяга основного двигателя	750 кН
Тяга управляющего двигателя	10 кН
Тяга разделяющего двигателя	90 кН
Максимальные перегрузки	До 15 g в течение 2 с
Дальность отведения спускаемого аппарата при аварии на старте	До 3000 м
Высота подъема уводимой части при аварии на старте	До 1200 м

Срабатывание САС осуществляется в следующем порядке [1]:

В момент возникновения аварии включается сигнализация на пульте космонавтов. Аварийно отключаются двигатели ракеты-носителя (не раньше 20 секунд после старта), при помощи пироболтов космический корабль разделяется по стыку между спускаемым аппаратом и приборным отсеком, фиксируются силовые связи, удерживающие СА и БО внутри головного обтекателя; раскрываются решетчатые стабилизаторы, одновременно запускается основной РДТТ; в процессе работы основного двигателя включаются управ-

ляющие двигатели, формирующие траекторию увода отделившейся головной части; на пике траектории увода происходит отделение СА от БО, включается двигатель разделения, обеспечивающий увод ДУ вместе с бытовым отсеком на безопасное расстояние от места посадки экипажа; после отделения СА включается система управления спуском, которая компенсирует угловые возмущения, полученные при разделении; затем начинается ввод парашютной системы; в 4 метрах от поверхности земли срабатывают РДТТ мягкой посадки, снижающие скорость падения до нуля.

Перед отделением первой ступени ракеты-носителя двигательная установка САС сбрасывается за ненадобностью. После этого спасение экипажа может быть проведено за счет штатных систем: отделения головной части и посадки.

Проведем сравнение характеристик представленных систем аварийного спасения. Рассмотрение представлено в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение характеристик системы аварийного спасения
с отделяемой головной частью и катапультирующего устройства

Катапультирующее устройство	САС с ОГЧ
В случае отказа одного из устройств, не умаляет шансов на выживание остальных членов экипажа.	В случае отказа системы – неминуемая гибель для всего экипажа КК.
Может использоваться как при взлете, так и при посадке аппарата (при отказе штатных парашютных систем КК).	Обеспечивает спасение только на начальном участке полета (с момента старта, до отделения ДУ САС).
Не предоставляет защиты от механических, термических, акустических нагрузок при эвакуации, а так же от набегающего потока при больших скоростях РН.	Обеспечивает надежную защиту от всех поражающих факторов, возникающих при аварии РН.
Примерное время выведения экипажа из опасной зоны ~ 1с.	Примерное время выведения экипажа из опасной зоны ~ 2с.
Перегрузки до 24g в течение 0.27с.	Перегрузки до 15g в течение 2с.
Располагается внутри спускаемого аппарата, уменьшая полезный объем КК.	Располагается над КК, увеличивая нагрузку на головной обтекатель.
Масса кресла с космонавтом 150–200 кг.	Масса двигательной установки 2–2,5 т.
Спасает только экипаж.	Спасает экипаж и часть дорогостоящего оборудования.
Относительная дешевизна и простота установки.	Дорогостоящее оборудование. Установка осложняется взрывоопасной твердотопливной начинкой ДУ САС.
Может использоваться повторно.	После сбрасывания на первом этапе полета приходит в негодность.

Как видно, катапультирующее устройство выигрывает в скорости эвакуации, но проигрывает в дальности отвода экипажа в случае аварии на старте. При этом дает шанс на спасение отдельных членов в случае отказа одного из устройств. Катапультирующее устройство позволяет спасти экипаж в случае отказа парашютов космического корабля на стадии посадки. При этом катапультирующее устройство проигрывает в защищенности САС с отделяемой головной частью: аварии на ракете-носителе сопровождаются большим количеством осколков, высокими температурами и акустическими нагрузками, защиту от которых катапультное кресло предоставить не может.

Катапультирующее устройство более выгодно с экономической точки зрения, так как нет необходимости создавать новую систему для каждого нового запуска. Система может использоваться повторно, тогда как сброшенная в процессе полета двигательная установка системы аварийного спасения с отделяемой головной частью приходит в негодность после сброса.

Массово-габаритные характеристики позволяют использовать катапультное устройство только при орбитальных полетах маломестных (1–2 члена экипажа) космических кораблей.

Из-за простоты использования катапультирующие устройства являются хорошим вариантом для орбитальных кораблей многоразового использования, таких как «Буран» и «Space Shuttle».

В многоместных космических кораблях, а так же в дальних экспедициях целесообразно использовать систему аварийного спасения с отделяемой головной частью. Применение этой системы в кораблях многоразового использования не выгодно из-за сложности конструкции.

В настоящее время катапультирующие устройства не используются в космонавтике. Системы аварийного спасения с отделяемой головной частью используются на российских космических кораблях «Союз», а так же проектируются для американского космического корабля «Орион».

Библиографический список

1. Средства аварийного спасения КК «Союз» [Электронный ресурс] // Космические аппараты. – URL: http://kmapp.narod.ru/st066.htm.

2. Установка 11Д855М [Электронный ресурс] // ОАО «Корпорация тактическое военное вооружение» [Официальный сайт]. – URL: http://www.ktrv.ru/production/69/174/766/.

3. РДТТ систем аварийного спасения американских космических кораблей [Электронный ресурс] // Colonization. – URL: http://colonization.com.ua/practica/rocket/TTD/avariaam.html.

4. РДТТ систем аварийного спасения и мягкой посадки советских космических кораблей [Электронный ресурс] // Colonization. – URL: http://colonization.com.ua/practica/rocket/TTD/avariasov.html.

5. Спасение экипажа при авариях в плотных слоях атмосферы [Электронный ресурс] // Космические аппараты. – URL: http://kmapp.narod.ru/st064.htm.

К содержанию

УДК 629.735.45

СРАВНЕНИЕ КЛАССИЧЕСКОЙ И СООСНОЙ КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ ВЕРТОЛЕТОВ

С. В. Махнович, Н.А. Фисивский

В статье рассмотрены конструктивные особенности соосной и одновинтовой схем. Выделены достоинства и недостатки каждой схемы. Показаны преимущественные области применения этих схем.

Ключевые слова: вертолет; реактивный момент; несущий винт; конструкция.

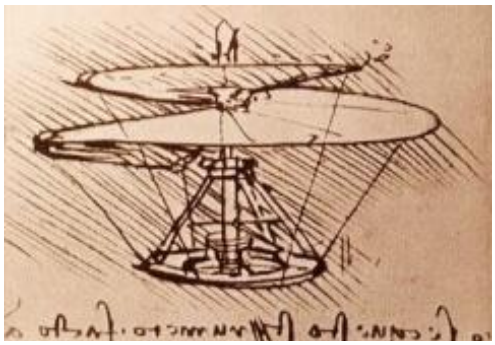


Рис. 1. Проект вертолета Леонардо да Винчи

Первые известные чертежи вертолета, один из которых приведен на рисунке 1, были выполнены Леонардо да Винчи. Однако исследования показали, что на нем, даже при условии достаточной подъемной силы, невозможно было бы летать – корпус неминуемо вращался бы в сторону, противоположную винту. В какой-то мере проблему реактивного движения корпуса удалось решить М.В. Ломоносову в его проекте беспилотного вертолета для метеорологических исследований, который показан на рисунке 2 – два соосных винта вращались в разные стороны.

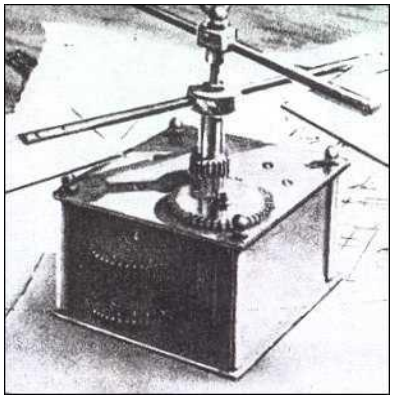


Рис. 2. Вертолет М.В. Ломоносова

В настоящее время существует большое количество вариантов компенсации реактивного момента корпуса. Для схем с одним несущим винтом это – фенестроны, многолопастные винты в кольце под килем; конструкции NoTaR (No Tail Rotor), реактивный момент в которых компенсируется по законам аэродина-

мики; варианты реактивного движения лопастей без трансмиссии, в которых двигатели расположены прямо на лопастях. Также есть варианты с двумя несущими винтами, например, перекрещивающиеся лопасти, оси винтов при этом расположены под углом и лопасти имеют большую площадь перекрытия. Поперечная схема использована на самом большом в мире вертолете Ми-12. Продольная схема расположения двух несущих винтов применена на известном американском транспортном вертолете CH-47 Chinook[4]. Из многовинтовых схем необходимо отметить винтокрылы, например, Ка-22 и Fairey Rotodyne, а также мультикоптеры, летательные аппараты с четным количеством винтов от четырех до двенадцати.

Рис. 3. Одновинтовой вертолет Ми-28 и соосный Ка-52

Практический интерес представляет сравнение двух наиболее распространенных схем компоновки – с рулевым винтом и соосной. Они представлены на рисунке 3 сверху вниз.

Наиболее распространенной является схема с одним несущим винтом и открытым хвостовым (иначе – рулевым), который показан на рисунке 4 [1]. Рулевой винт предназначен для компенсации реактивного момента от несущего винта, который стремится закрутить вертолет в направлении, противоположном вращению несущего винта, а также для управления углом рыскания, или по азимуту. Суть его работы представлена на рисунке 5. Привод вращения рулевого винта осуществляется посредством карданных валов от редуктора несущего винта к редуктору рулевого, через промежуточный редуктор. Силовая установка вертолета с одним несущим и открытым хвостовым винтом показана на рисунке 6.

Рис. 4. Открытый рулевой винт

На некоторых вертолетах вместо открытого рулевого винта применяются фенестроны – многолопастные винты, размещенные в специально спрофилированных кольцах под килем. Изображен на рисунке 7. Фенестрон

более безопасен для обслуживающего персонала и при маневрировании в ограниченном пространстве ввиду своей закрытости, при равных диаметрах фенестрон имеет больший КПД, нежели открытый винт. Однако в 1976 году на вертолетном заводе имени М.Л. Миля провели испытания модели Ми-24А с фенестроном, фотография которой приведена на рисунке 8, после которых пришли к выводу о нецелесообразности его использования на тяжелых вертолетах [6]. Из достоинств можно отметить отсутствие промежуточного редуктора, меньший уровень шума, и, как было сказано выше, закрытость, а из недостатков – более широкий и более тяжелый киль. Именно из-за этого применение фенестрона оправдано на легких и средних вертолетах.

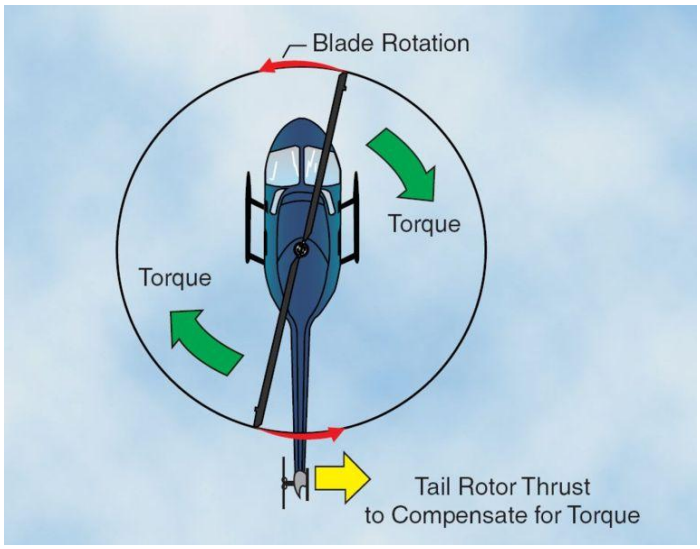


Рис. 5. Принцип работы рулевого винта

На некоторых вертолетах вместо стандартного рулевого винта с равными углами между лопастями устанавливают X-образные винты, один из которых показан на рисунке 9. Они имеют преимущество в более низком уровне издаваемого шума.

Достоинство схемы с рулевым винтом в том, что она проста в исполнении колонки несущего винта, в частности, автомата перекоса, конструкция которого показана на рисунке 10, ремонте и обслуживании, что снижает затраты на эти операции. Однако вертолет, лишившийся хвостового винта, обречен на неуправляемое падение. Из-за большого диаметра винта затруднены маневры вблизи поверхностей. Кроме того, рулевой винт отбирает часть мощности двигателя (до 10 %), однако не дает ни подъемной силы, ни тяги, направленной вперед.

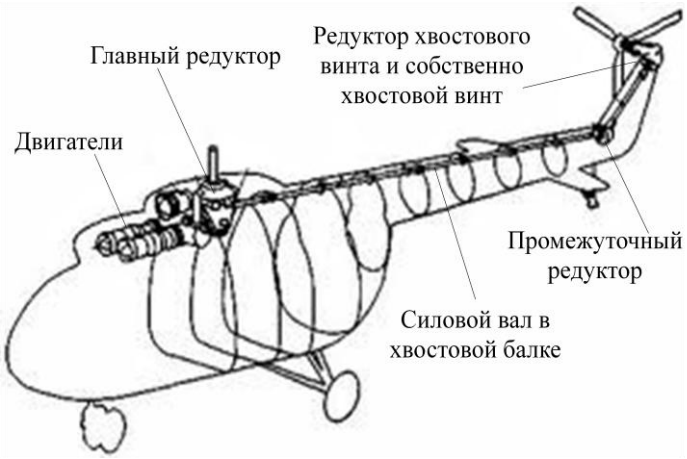


Рис. 6. Силовая установка вертолета с одним несущим винтом

Если говорить об использовании этой схемы в военном деле, нельзя не отметить, что она обладает меньшей боевой живучестью из-за легко повреждаемых

деталей собственно хвостового винта, при повреждении хвостовой балки возможно повреждение карданной передачи или промежуточного редуктора. Также при повреждении лопасти несущего винта будет потеряна часть подъемной силы, что также может привести к крушению всей машины (например, Ка-50 на одном из испытаний лишился половины лопасти одного из несущих винтов, что не помешало ему закончить полет) [2].

Рис. 7. Фенестрон

Соосная схема расположения винтов характеризуется более сложным конструктивным исполнением. Однако эта схема имеет ряд неоспоримых преимуществ.

В первую очередь, это отсутствие рулевого винта – реактивные моменты взаимно компенсируются двумя вращающимися в разных направлениях винтами. Управление по рысканию осуществляется дифференциальным изменением реактивных моментов несущих винтов, и рулями направления на киле. Из-за отсутствия рулевого винта уплотняется компоновка приводов, а вследствие полного использования мощности двигателя несущими винтами сокращается их диаметр. Таким образом, вертолет в целом становится более компактным, что упрощает его хранение и транспортировку, расширяет область применения. За счет меньших габаритов уменьшаются моменты инерции, что увеличивает угловые скорости и маневренность в целом. Так, например, соосный вертолет может выполнить пилотажные фигуры «косая петля» и «воронка», недоступные вертолетам с рулевым винтом. Отсутствие хвостового винта с его редуктором и приводами существенно повышает боевую живучесть вертолета. Также облегчается маневрирование вблизи поверхностей. Кроме того, за счет более продуктивного использования ометаемой винтами площади и мощности двигателя существенно повышается коэффициент весовой нагрузки (отношение полезной нагрузки к общей полетной массе).

Рис. 8. Ми-24А с фенестроном

Рис. 9. Х-образный рулевой винт

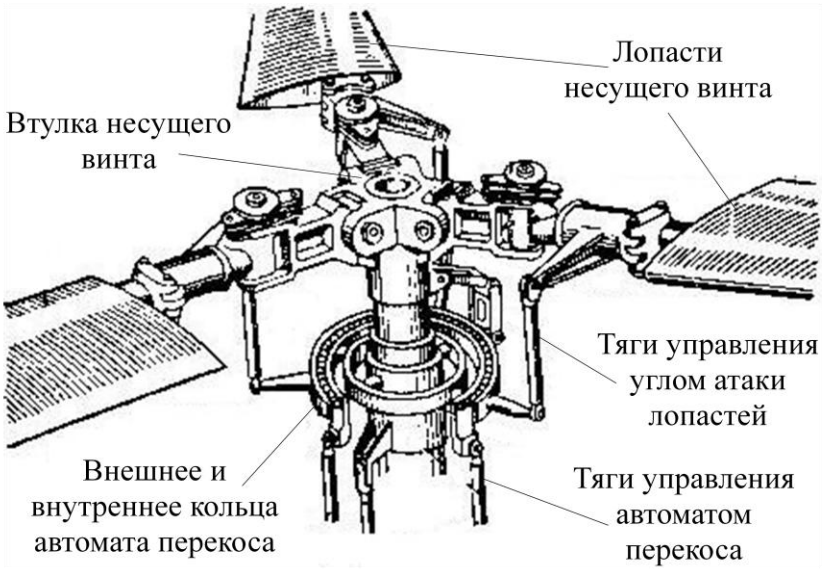


Рис. 10. Конструктивная схема автомата
перекоса для одного несущего винта

Однако конструктивно соосная схема, как видно на рисунке 11, куда сложнее одновинтовой. Конструкция проходящих один в другом силовых валов, а также реализация управления циклическим шагом винтов, усложняют конструкцию, производство и эксплуатацию трансмиссии. Также существует опасность схлестывания винтов – для этого их надо разносить дальше друг от друга, что увеличивает высоту всей конструкции и несколько поднимает центр тяжести машины. Впрочем, камовцы за долгие годы эксплуатации этой схемы нашли оптимальное расстояние между верхним и нижним винтами.

Для сравнения этих двух схем по техническим показателям в таблицах 1 и 2 представлены характеристики вертолетов Ми-28 и Ка-52[3]. Оба вертолета имеют в составе силовой установки два турбовальных двигателя ВК-2500 [5]. Из сравнения массогабаритных характеристик видно, что Ка-52 обладает меньшими длиной, диаметром несущего винта, большей взлетной массой. Большая ширина объясняется более длинными крыльями (больше точек подвески, чем у Ми-28) и расположением кресел пилотов «плечом к плечу», а не «тандемом». При сравнении летно-технических характеристик видно, что Ми-28 уступает соосному Ка-52 буквально по всем параметрам. Однако, по состоянию на 2011 год, стоимость Ка-52 на 3 млн USD выше стоимости Ми-28.

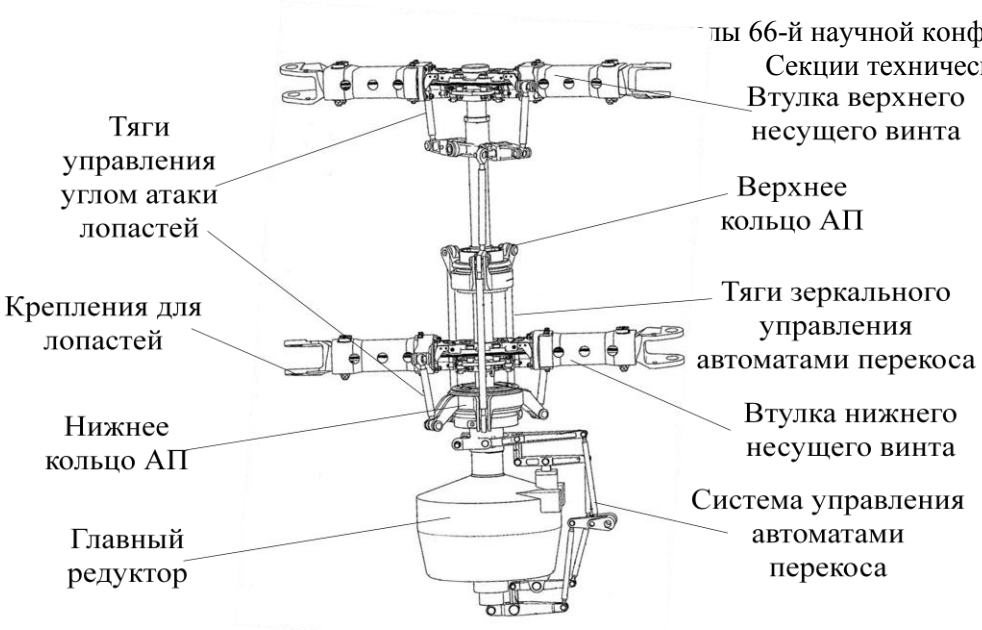


Рис. 11. Конструктивная схема автомата перекоса на соосном вертолете

Таблица 1

Сравнение массогабаритных характеристик

Параметр	Ми-28	Ка-52
Компоновочная схема	Несущий и рулевой винты	Два соосных винта
Длина фюзеляжа	17,05 м	14,2 м
Высота	3,82 м	5 м
Ширина (с крыльями)	5,88 м	7,3 м
Диаметр несущего винта	17,2 м	14,5 м
Диаметр рулевого винта	3,85 м	Отсутствует
Максимальная взлетная масса	12100 кг	12200 кг

Таблица 2

Сравнение летно-технических характеристик

Параметр	Ми-28	Ка-52
Масса топлива (без ПТБ)	1500 кг	1487 кг
Статический потолок	3600 м	4000 м
Динамический потолок	5000 м	5500 м
Скороподъемность	12…14 м/с	10…16 м/с
Максимальная скорость	300 км/ч	310 км/ч
Практическая дальность	450 км	520 км

Соосные вертолеты имеют более узкую сферу применения (например, полеты в высоких горах и ущельях, палубная авиация), сложнее в конструктивном исполнении, их стоимость выше, однако они эффективнее по массогабаритным и летно-техническим характеристикам, требуются меньшие затраты на их хранение ввиду меньших габаритных размеров. Классические же вертолеты имеют более широкую сферу применения (военное дело, грузоперевозки, гражданская авиация), легче в обслуживании и производстве из-за относительной простоты конструкции, стоимость аппарата меньше, однако их массогабаритные и летно-технические характеристики хуже, чем у соосных вертолетов. В зависимости от назначения необходимо подбирать наиболее оптимальное средство решения, поэтому каждая из этих схем находит своё применение в технике.

Библиографический список

1. Ружицкий, Е.И. Вертолеты / Е.И. Ружицкий. – М.: Виктория, АСТ, 1997. – 195 с.

2. Ка-50, Ка-52, Ка-50Н. Армейские боевые вертолеты / А. Мазепов [и др.]. – М.: Любимая книга, 1997. – 128 с.

3. Якубович, Н.В. Боевой вертолет Ми-28 / Н.В. Якубович. – М.: АСТ, 2008. – 11 с.

4. Якубович, Н.В. Вертолеты особых схем / Н.В. Якубович. – М.: Астрель, АСТ, 2001. – 128 с.

5. Кузнецов, Г.И. Взлет по вертикали / Г.И. Кузнецов, В.А. Касьяников. – М.: Полигон-пресс, 2008. – 216 с.

6. Шунков, В.Н. Боевые вертолеты мира / В.Н. Шунков, В.В. Ликсо. – М.: Астрель, АСТ, 2005. – 240 с.

К содержанию

УДК 629.762 + 531.6.011.5 + 519.8

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И УДАРНО-ВОЛНОВЫХ НАГРУЗОК НА ПУСКОВОЙ КОНТЕЙНЕР В ПЕРИОД «РАСКУПОРКИ»

Р.А. Пешков, Р.В. Сидельников

В данной статье провидится анализ возможностей программного комплекса *ANSYS FLUENT* для решения задач раскрытия контейнерного подракетного пространства. Произведена отработка предложенной методики расчета в программном комплексе *ANSYS FLUENT* газодинамических параметров в пусковом контейнере в период раскупорки путем сравнения данных по результатам расчета ударно-волновых нагрузок на пусковой контейнер с результатами, полученными по различным методикам.

Ключевые слова: пусковой контейнер, методика, численное моделирование, раскупорка.

Период раскрытия контейнерного подракетного пространства начинается со времени, когда днище ракеты достигает верхнего среза пускового контейнера (ПК).

С целью оценки возможностей численного моделирования на базе *ANSYS FLUENT*, его отработки и верификации используемой методики при исследовании газодинамических явлений, происходящих при старте ракеты, нами было проведено численное моделирование процессов с использованием программного комплекса *ANSYS FLUENT*, который предоставляет разнообразные методы динамического перестраивания сеток, необходимые для задания движения ракеты при раскрытии пускового контейнера. Отработка методики численного моделирования проводилась путем сравнения результатов расчета ударно-волновых нагрузок на ПК с результатами, полученными по методике предложенной в [3].

В ходе анализа конструкций различных шахтных пусковых установок [2, 4], была принята схема, представленная на рисунке 1.

Основные условия расчета приведены в таблице. Параметры газа от порохового аккумулятора давления (ПАД) принимались соответствующими параметрам воздуха: k=1,4 (показатель адиабаты), R=8,3144621 Дж/(моль·К) (универсальная газовая постоянная).

Таблица

Условия расчета

Основные условия расчета	Значение
Скорость выхода ракеты, м/с	30
Избыточное давление в контейнере в момент выхода ракеты, атм.	6
Параметры газа в момент выхода ракеты из ПК, К.	1500

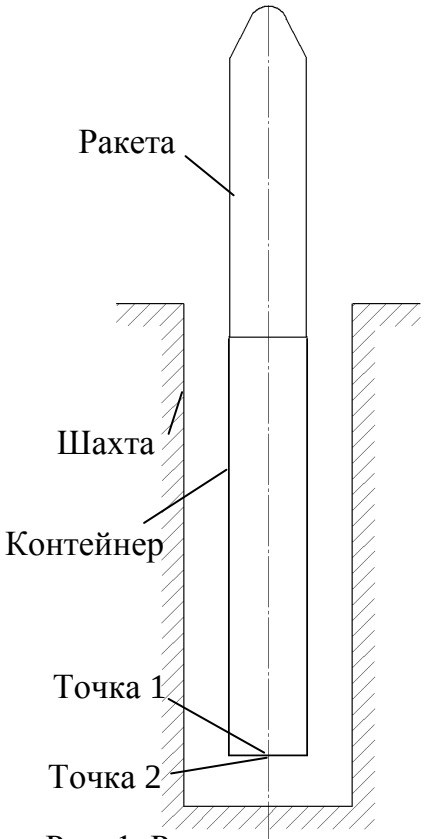


Рис. 1. Расчетная схема

В процессе исследования решалась задача определения спада давления в пусковом контейнере.

Методика расчета среднеобъёмных параметров в пусковом контейнере, представленная в [3] включает в себя три этапа решения.

На первом этапе, при удалении ракеты от среза контейнера $h \le d_r / 4$ использовалась следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dp_k}{dt} = -\dfrac{k}{V}\left[\left(\dot{m}RT\right)_{ист} + p_k \dfrac{dV}{dt} \right], \\ \dfrac{d\rho_k}{dt} = -\dfrac{1}{V}\left[\dot{m} + \rho_k \dfrac{dV}{dt} \right], \\ V(t) = x(t)\dfrac{\pi \cdot 0{,}514^2}{4} \Rightarrow \dfrac{dV}{dt} = 0{,}2074\dfrac{dx}{dt}, \\ \dfrac{dx}{dt} = \upsilon, \end{cases} \quad (1)$$

где p_k – давление газа в контейнере;

ρ_k – плотность газа в контейнере;

$T_{ист.}$ – температура истечения;

x – положение ракеты;

V – объем подракетного пространства;

υ – скорость движения ракеты;

$R_{ист.}$ – газовая постоянная во время истечения;

d_r – диаметр ракеты.

Площадь, через которую истекают газы: $F_i = \pi d_k \left(x - x_0\right)$.

Массовый расход определяется из соотношения Сен-Венана:

$$\begin{cases} \dot{m} = \varphi F_i \sqrt{\dfrac{2k}{k-1} p\rho \left(\left(\dfrac{p_h}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\dfrac{p_h}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right)} \quad при \quad \dfrac{p_h}{p} \le \left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \dot{m} = \varphi F_i \sqrt{k \left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} p \cdot \rho} \quad при \quad \dfrac{p_h}{p} > \left(\dfrac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}.$$

Так, $\frac{p_h}{p}=\frac{607950}{101325}=6>\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}=\left(\frac{2}{1,4+1}\right)^{\frac{1,4}{1,4-1}}=0,528$, то при вычислении массового секундного расхода использовалась формула для критического истечения. Проблемным здесь является определение коэффициента расхода φ, который определялся численно, методом подбора.

На рис. 2. приведены графики изменения массового секундного расхода от времени, полученные с использованием программного комплекса *ANSYS FLUENT* и в ходе решения системы дифференциальных уравнений (1) с коэффициентом расхода φ=0,81. Максимальная разница в определении массового расхода по различным методикам составила порядка 16 %.

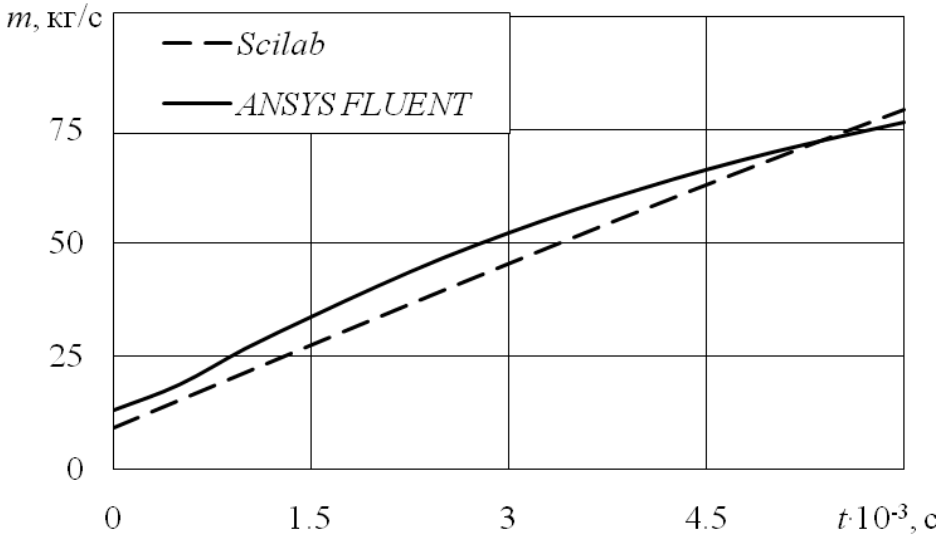


Рис. 2. Изменение массового секундного расхода через щель между ракетой и контейнером при давлении раскрытия *P*=6 атм

На втором этапе, при удалении ракеты от среза контейнера $h>d_P/4$ решалась система уравнений:

$$\begin{cases}\frac{dp_k}{dt}=-\frac{kp_k\omega}{L_к},\\ \frac{d\rho_k}{dt}=-\frac{\rho_k\omega}{L_к},\\ \frac{d\omega}{dt}=\frac{p_к-p_h}{\rho L_к},\end{cases} \qquad (2)$$

где $p_h=101325$ Па – давление окружающей среды;

ω – среднеобъемная скорость движения массы газа.

Площадь, через которую истекают газы: $F_i = \frac{\pi {d_r}^2}{4}$.

На третьем этапе, когда давление газа внутри контейнера из-за инерционности газового столба может упасть до давления ниже атмосферного, после чего начинается вток воздуха в контейнер, в первом приближении изменение газодинамических параметров можно описать системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_k}{dt} = -\frac{kp_h\omega}{L_к}, \\ \frac{d\rho_k}{dt} = -\frac{\rho_h\omega}{L_к}, \\ \frac{d\omega}{dt} = -\frac{p_к - p_h}{\rho L_к}. \end{cases} \quad (3)$$

Решение систем дифференциальных уравнений (1-3) для каждого этапа движения проводилось с использованием пакета прикладных математических программ Scilab.

Для решения дифференциальных уравнений и систем в Scilab используется функция:

$$[y,w,iw] = ode\left([type], y0, t0, t \quad [,rtol \quad [,atol]], f \quad [,jac] \quad [,w,iw]\right),$$

для которой обязательными входными параметрами являются: $y0$ – вектор начальных условий; $t0$ – начальная точка интервала интегрирования; t – координаты узлов сетки, в которых происходит поиск решения; f – внешняя функция, определяющая правую часть уравнения или системы уравнений; y – вектор решений [1].

Вторая методика расчета изменения давления в пусковом контейнере включала в себя численное моделирование с использованием программного комплекса *ANSYS FLUENT*.

В ходе решения задачи были введены следующие допущения и упрощения:

– в начальный момент времени нижний срез ракеты находится на уровне верхнего среза ТПК. Внутри ТПК задвалось равномерно распределенное давление и температура;

– моделирование проводилось в осесимметричной постановке. Данная постановка позволяет существенно снизить количество расчетных элементов.

– плотность рассчитывалась на основании уравнения идеального газа:

$$\rho = \frac{p_{op}}{\frac{R}{M_w}T}, \quad (4)$$

где ρ – плотность среды; M_w – молекулярная масса воздуха; p_{op} – рабочее давление; T – температура газа. Температура и давление окружающей среды в расчетной области вне контейнера принимались в соответствии с нормальными условиями;

– стенки шахты и ТПК принимались абсолютно гладкими. Влияние трения на распространение ударной волны не учитывалось.

Алгоритм расчета включал в себя следующие этапы:

– построение сеточной модели;

– выбор модели динамического перестроения сетки;

– задание физической модели газа;

– выбор схемы дискретизации по пространству.

На основании имеющейся геометрии расчетной области строилась конечно-элементная двумерная сетка, симметричная относительно оси ракеты для снижения временных затрат и вычислительных ресурсов, построенная инструментами сеточного генератора *ANSYS ICEM CFD*. Подобная постановка задачи позволила использовать гексаэдрическую расчетную сетку. Данный тип сетки предпочтителен при расчете ударно-волновых процессов – ячейки сетки можно выстроить в соответствии с распространением фронта ударной волны. Использование тетраэдрической сетки так же возможно, но требует для получения сравнимых по точности результатов большего количества элементов.

При построении сетки выполнялось сгущение у поверхности ракеты (для пограничного слоя на теле). При этом для расчета высоты ячейки на поверхности ракеты принимались значения параметров y+ = 30…50 (это связано с необходимостью использования высокорейнольдсовых моделей турбулентности для описания сверхзвуковых течений газа в расчетной области [5]).

Как уже упоминалось, решение поставленной задачи предполагает использование подвижных сеток. Однако следует отметить, что возможны подходы к решению задач с подвижными границами, а именно использование динамических (*dynamic*) и скользящих (*sliding*) сеток.

После выбора метода перестроения (*sliding* в нашем случае) задаются параметры границ подобласти с подвижной сеткой. Подвижными задаются граничное условие стенки для ракеты и массив ячеек сетки. При этом закон движения определяется с помощью специальной пользовательской функции *Motion UDF/Profile*. Данная функция записывается на языке *C++* и требует компиляции в бинарный файл.

Задание физической модели процесса стандартно для всех задач, решаемых с помощью *ANSYS FLUENT*. Так как в нашем случае течение газа турбулентное, то помимо основных уравнений (неразрывности, энергии, импульса, состояния) для расчета газодинамических течений выбиралась модель турбу-

лентности. Как уже упоминалось ранее необходимо использования высокорейнольдсовых моделей турбулентности для описания сверхзвуковых течений газа в расчетной области. В ходе расчета были протестированы две модели турбулентности: *k-e* и *SST*. Различия результатов по определению давления снаружи и изнутри днища контейнера, полученные с помощью данных моделей турбулентности были незначительны. Дальнейшие расчеты проводились с использованием *k-e* модели турбулентности.

Для решения нестационарной задачи распространения ударных волн большое значение имеет выбор схемы дискретизации решения уравнений.

На основании тестовых расчетов была подобрана комбинация схем, позволяющая получать достаточно быстро устойчивое сходящееся решение. Необходимо выбрать *Pressure-Velocity Coupling* решатель и задать для него параметр *Skewness Correction* равным 0.

Схема дискретизации по времени задается по умолчанию – *First Order Implicit*.

Схема дискретизации по градиенту – *Least Squares Cell Based*.

Схема дискретизации по давлению – *Second Order*.

Схема дискретизации по плотности – *Second Order Upwind*.

Все остальные схемы заданы по умолчанию для данного решателя.

Для обеспечения сходящегося решения шаг по времени должен быть не меньше 0,0005 с.

В ходе решения задачи раскупорки с использованием различных методик получены графики изменения давления в пусковом контейнере с течением времени (рис. 3).

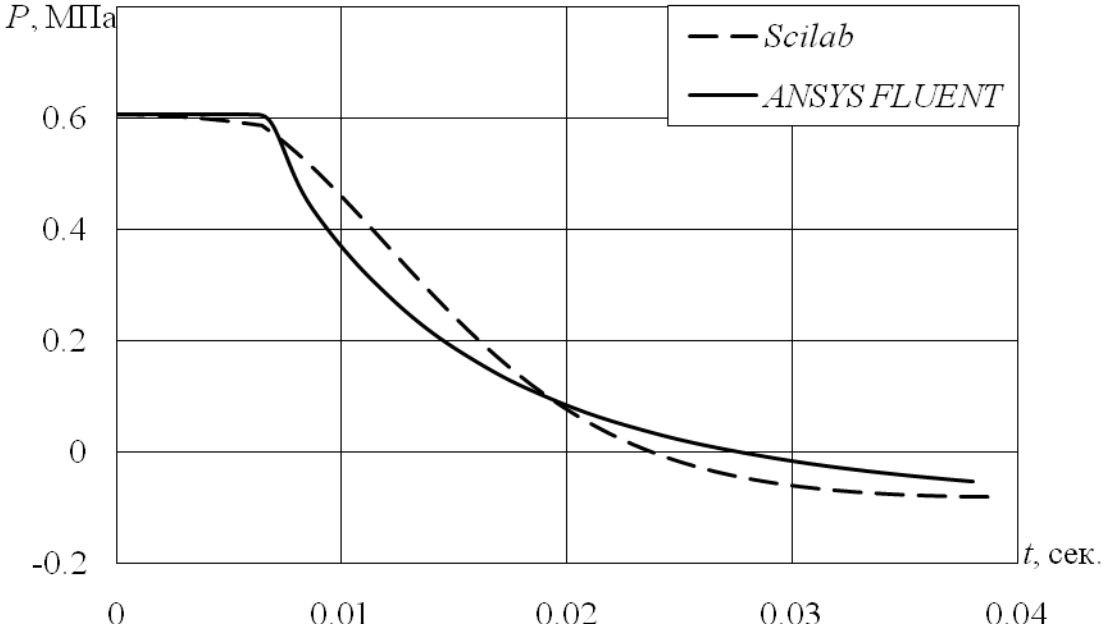


Рис. 3. Изменение давления во времени на днище изнутри контейнера при давлении раскрытия *P*=6 атм

Как видно из графиков (рис. 3) максимальное расхождение в значениях давления составило порядка 20 %. Разница в давлениях может быть обусловлена тем, что методика, основанная на получения среднеобъемных величин газодинамических параметров не учитывает их распределение в радиальном направлении. Так же к недостаткам методики решения, основанной на решении одномерной задачи, можно отнести и то, что она не позволяет получать газодинамические параметры во всей расчетной области. Так как контейнер может находится в шахте, то возникает необходимость определения давления на днище снаружи контейнера. Изменения давления со временем на днище снаружи контейнера по мере выхода ракеты из ПК, полученные с помощью программного комплекса *ANSYS FLUENT*, представлены на рис. 4.

Первое возмущение среды в ПУ вызывается пусковой ударной волной в момент выхода нижнего обтюратора ракеты из контейнера, дойдя до дна ПУ, эта волна отражается и вызывает второй пик давления в точке снаружи пускового контейнера (рис. 4). При раскрытии ТПК, в результате истечения продуктов сгорания, давление в нем падает и к моменту прихода прямой волны сжатия к дну ПУ, оно составляет 20–30 % от давления раскрытия.

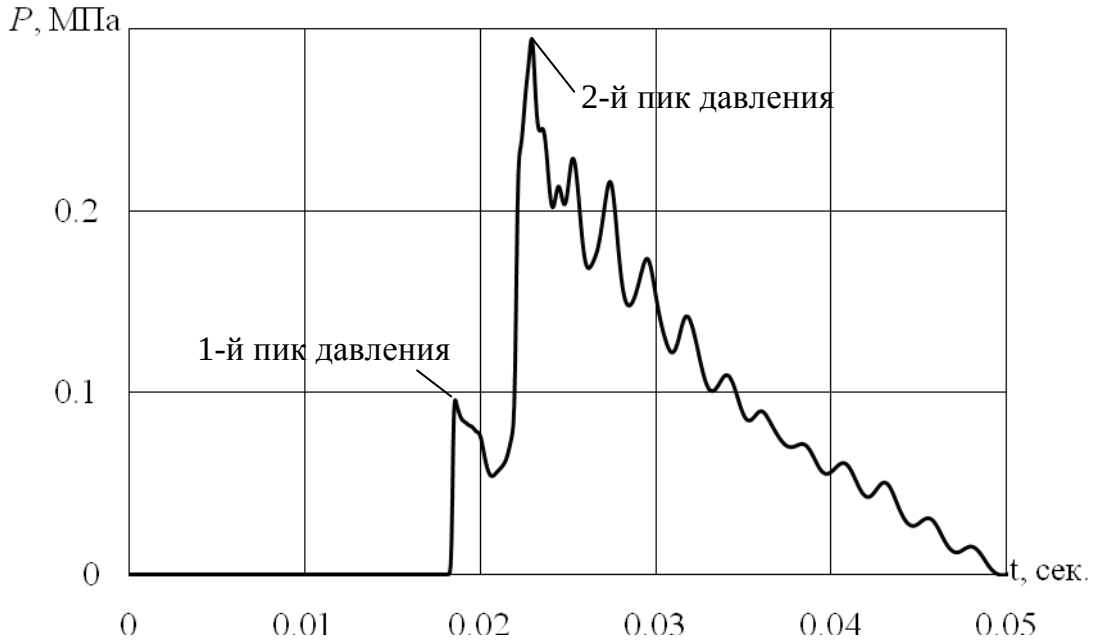


Рис. 4. Изменение давления во времени на днище снаружи контейнера при давлении раскрытия P=6 атм.

В результате двойного отражения прямой волны сжатия от дна ПУ и днища ТПК, давление в ней повышается в 4–5 раз (рис.4) и на днище ТПК образуется наружный перепад давления равный 2,5 атм., приводящий к значительной осевой силе, направленной вверх (рис. 4).

В отличие от методики, основанной на получении среднеобъемных характеристик, которые позволяют проводить анализ нагружения только внутри контейнера и на днище ракета-носителя, алгоритм позволяет получать газодинамические параметры во всей расчетной области с учетом вязкости газа и дает возможность анализировать влияние изменений в конструкции пусковой установки на величину нагрузок, действующих на контейнер и ракету-носитель, не только качественно, но и количественно, без привлечения эксперимента.

Подводя итоги исследованиям, по анализу методик расчета давления на днище контейнера, можно сделать вывод, что в отличие от известных методик, основанных на получении среднеобъемных характеристик, которые позволяют проводить анализ нагружения только внутри контейнера и на днище ракеты, методика решения с использованием программного комплекса *ANSYS FLUENT* позволяет получать газодинамические параметры во всей расчетной области с учетом вязкости газа без привлечения эксперимента. Она позволила выявить ряд особенностей в нагружении конструкции пускового контейнера, связанных с возникновением волн разрежения-сжатия, которые в сумме с отраженной ударной волной, воздействующей на днище снаружи ТПК, дают суммарную силу значительной величины, действующей на контейнер в осевом направлении в сторону движения ракеты. При увеличении давления раскупорки данная осевая сила значительно увеличивается, что в случае пренебрежения данным фактором может привести к неверным результатам нагружения конструкции ТПК и элементов ШПУ.

Библиографический список

1. Алексеев, Е.Р. Scilab: Решение инженерных и математических задач / Е.Р. Алексеев, О.В. Чеснокова, Е.А. Рудченко. – М.: ALT Linux; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 260 с.

2. Колесников, С.Г. Стратегическое ракетно-ядерное оружие / С.Г. Колесников. – М. Арсенал-Пресс. 1996. – 128 с.

3. Конюхов, С.Н. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет / С.Н. Конюхов, П.П. Логачёв. – Днепропетровск: НАН, НКА Украины, Институт технической механики, ГКБ «Южное», 1997. – 211 с.

4. Сергеев, И.Д. Оружие России. Т. 4: Вооружение и военная техника Ракетных войск стратегического назначения / И.Д. Сергеев. – М. Военный парад, 1997. – 404 с.

5. ANSYS FLUENT User’s Guide. 2011. Fluent Inc. Central Source Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA.

К содержанию

УДК 631.3.004.67

НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ 80-ПРОЦЕНТНОГО РЕСУРСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НЕЗАВЕРШЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Л.И. Королькова, Н. Машрабов

В статье рассматривается случай прекращения испытаний (наблюдений) по различным причинам, результатом которых является цензурированная выборка. Авторами решена задача нахождения областей применения оценок функций распределения по цензурированным выборкам для оценивания 80-процентного ресурса в зависимости от структуры выборки, то есть расположения на числовой оси отказов и цензурирований, а также от доли последних в выборке.

Ключевые слова: цензурированная выборка, критерии различимости, 80-процентный ресурс, статистический эксперимент.

На момент сбора информации о наработках и отказах изделий часть из них обычно оказывается исправной. Что касается испытаний объектов, то они нередко завершаются раньше, чем все изделия достигнут предельного состояния. Таким образом, имеет место или приостановка в поступлении информации о наработке до предельного состояния (ресурсного отказа), или приостановка испытаний (эксплуатации). В обоих случаях изделие проработало определенное время, и относящуюся к этому времени наработку принято называть наработкой до цензурирования. Она является частью рассматриваемой неизвестной наработки до ресурсного отказа и всегда будет меньше ее. Наработки до цензурирования бывают столь значительны, что в практике при оценке надежности качественно всегда учитываются.

В частности, эксплуатационные испытания техники на надежность характеризуются большим рассеиванием ресурсов деталей, узлов, машин, так что на проведение полных (до ресурсного отказа последнего объекта в выборке) испытаний требуется не менее трех лет, часто до 8…10 лет. Так что через год, два и т.д. результатами испытаний будут цензурированные выборки, состоящие из наработок исследуемых объектов до предельного состояния и наработок до цензурирования.

К настоящему времени предложено значительное число оценок функции распределения наработки до отказа по цензурированной выборке. Авторами доказана идентичность ряда из них оценке, предложенной Е. Капланом и П. Мейером [1]. Вместе с тем авторами также предложен способ построения оценок функции распределения. Способ основывается на том, что в случае выборки объемом N изделий каждый (ресурсный) отказ увеличивает накопленную частость на $1/N$, то есть вклад в функцию распределения k_i отказавших изделий равен k_i/N. Пусть до момента t_i было приостановлено (снято с

испытаний) m_i изделий. Если бы эти изделия продолжали работать, то какая-то часть из них могла отказать до момента t_i. Обозначим долю таких изделий φ_i, тогда для функции распределения можно записать следующее выражение: $F_L(t_i) = (k_i + m_i\varphi_i)/N$.

Предлагаются следующие весовые функции [2]:

$$\varphi_i^{(1)} = \left(\frac{k_i}{k_i + m_i} + \frac{k_i + m_i}{N}\right)\cdot 0{,}5; \qquad \varphi_i^{(2)} = \frac{K}{N}\cdot\frac{k_i + m_i}{N};$$

$$\varphi_i^{(3)} = \left(\frac{K}{N} + \frac{k_i}{K}\right)\cdot 0{,}5; \qquad \varphi_i^{(4)} = \frac{k_i}{k_i + m_i}\cdot\frac{k_i + M}{N};$$

$$\varphi_i^{(5)} = \left(\frac{k_i}{k_i + m_i} + \frac{k_i + M}{N}\right)\cdot 0{,}5; \qquad \varphi_i^{(6)} = \frac{k_j}{N};$$

$$\varphi_i^{(7)} = \left(\frac{k_i}{k_i + m_i} + \frac{k_i}{K}\right)\cdot 0{,}5; \qquad \varphi_i^{(8)} = \frac{k_i}{k_i + m_i}\cdot\frac{k_i}{K};$$

$$\varphi_i^{(9)} = \left(\frac{K}{N} + \frac{k_i + M}{N}\right)\cdot 0{,}5 \qquad \varphi_i^{(10)} = \frac{K}{N}\cdot\frac{k_i + M}{N};$$

$$\varphi_i^{(11)} = \left(\frac{K}{N} + \frac{k_i + m_i}{N}\right)\cdot 0{,}5 \qquad \varphi_i^{(12)} = \left(\frac{k_i + M}{N}\right)$$

где K – число отказавших изделий в выборке, M – число цензурирований в выборке; $K+M = N$.

Представляется невозможным однозначно определить весовую функцию φ. Можно предположить, что для различных цензурированных выборок необходимы разные выражения для φ, чтобы обеспечить достаточную точность вычисления показателей надежности (средней наработки до отказа, среднего ресурса, гамма-процентного ресурса).

К настоящему времени предложено значительное количество оценок функции распределения по цензурированным выборкам, из которых, как показывают результаты обработки данных эксплуатационных испытаний и наблюдений, ни одна оценка не может быть отвергнута как непригодная. Поэтому возникает задача установления областей их применения. Последние не могут быть выявлены без существования способов различения цензурированных выборок, без отнесения выборок к какому-либо классу, множеству и т.п.

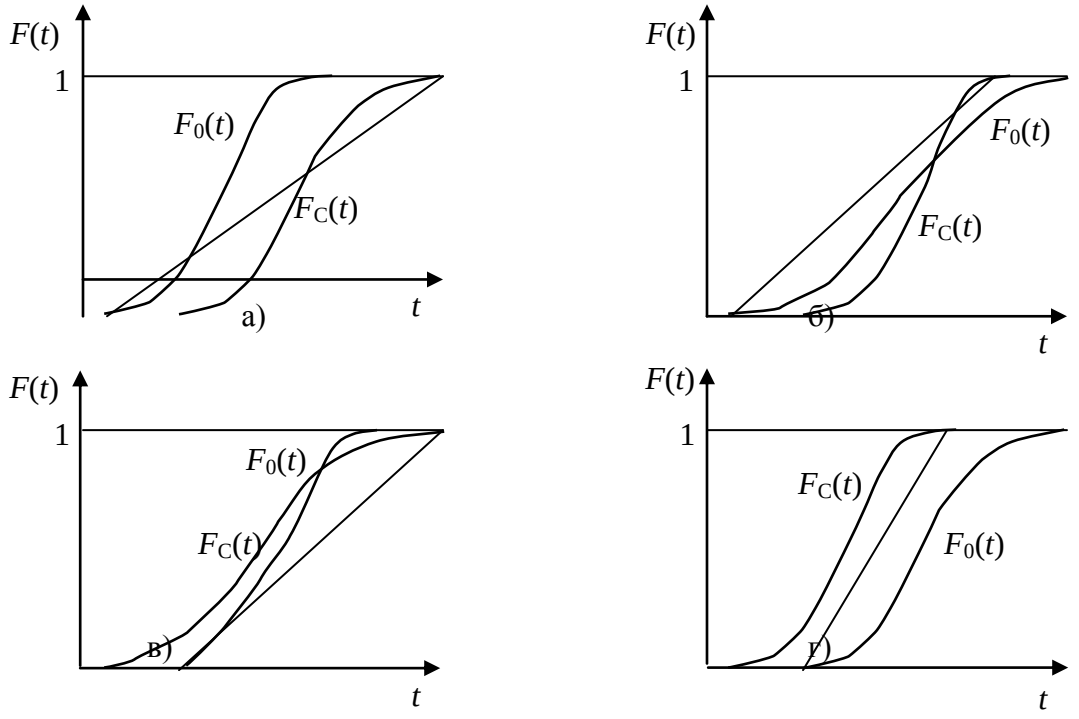
Для характеристики свойств цензурированной выборки воспользуемся тем, что составляющие ее наработки до отказа и до цензурирования – это случайные величины, которые можно описать с помощью их функций распределения и числовых характеристик. Распределение наработок до отказа (предельного состояния) имеет сдвиг относительно начала отсчета. Однако

по цензурированной выборке нельзя определить параметр сдвига c даже просто полагая $c = t_{\min}$, если наименьшей является наработка до цензурирования. Во все же числовые характеристики, кроме среднеквадратического отклонения, параметр сдвига входит. С другой стороны, площадь под кривой распределения от сдвига не зависит. Поэтому для идентификации цензурированных выборок введены следующие критерии различимости:

$$R_1 = (t_N - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_N} (F_0(t) - F_C(t))dt, \qquad R_2 = (t_N - t_1)^{-1} \int_{t_1}^{t_N} (F_0(t) - F_P(t))dt,$$

где t_1, t_N – минимальное и максимальное значение наработок в выборке; $F_0(t)$, $F_C(t)$ – функции распределения соответственно наработок до отказа и наработок до цензурирования; $F_P(t)$ – функция равномерного распределения на интервале, ограниченном минимальной наработкой до отказа и максимальной наработкой до цензурирования.

Варианты расположения функций распределения $F_0(t)$, $F_C(t)$ и соответствующие знаки критериев R_1, R_2 показаны на рис. 1, из которого следует, что преимущественному расположению наработок до отказа в начале общего вариационного ряда, состоящего из наработок до ресурсного отказа и до цензурирования, соответствуют положительные значения критериев R_1 и R_2, а расположению наработок до отказа ближе к концу вариационного ряда – отрицательные значения критериев.



Варианты расположения функций распределения отказов и цензурирований в выборке а) $R_1>0$, $R_2>0$; б) $R_1>0$, $R_2<0$; в) $R_1<0$, $R_2>0$; г) $R_1<0$, $R_2<0$

Кроме того, выборки различаются по доле неотказавших изделий – коэффициенту цензурирования $Y=M / N$.

Были вычислены критерии различимости более ста цензурированных выборок, полученных при испытании промышленных и сельскохозяйственных тракторов и их узлов. Анализ значений критериев показал, что любому значению Y соответствуют все возможные сочетания знаков критериев R_1 и R_2.

Для ряда технических объектов нормируется 80-процентный ресурс, t_{80}. Выбор лучших из множества оценок функции распределения по цензурированной выборке для вычисления t_{80} осуществлялся по результатам статистического эксперимента, где в качестве законов распределения наработок до ресурсного отказа и до цензурирования использовались нормальное и Вейбулла с параметрами формы 1,5; 2; 3. Каждая полученная при моделировании выборка идентифицировалась по значениям критериев различимости Y, R_1, R_2.

С учетом результатов сравнения оценок функции распределения, для восстановления последней по выборке применялись методы, предложенные Е. Капланом и П. Мейером (F_{KM}), Л. Джонсоном (F_D), В. Нельсоном (F_N) [3], Ф.И. Фишбейном и оценки F_L (L=1…12), предложенные авторами.

В частности, В. Нельсоном [3] предложен метод оценивания интегральной интенсивности отказов:

$$\Lambda(\tau_i) = \Lambda(\tau_{i-1}) + \frac{1}{N+1-N_i},\ \Lambda(\tau_0) = 0,$$

где τ_i – i–ая наработка до отказа.

Функция распределения рассчитывается только по наработкам до отказа:

$$F_N(\tau_i) = 1 - \exp(-\Lambda(\tau_i)).$$

По каждой из 16 оценок функции распределения определялись 80-процентный ресурс и относительные погрешности вычисления t_{80}. По выборочным распределениям последних вычислялись среднее, среднеквадратическое отклонение и вероятности того, что относительные погрешности вычисления t_{80} не превысят δ, δ=0,05; 0,10; 0,15; 0,20. Из-за отсутствия во многих случаях оценок, обеспечивающих одновременно наименьшие смещение и разброс оценивания показателя t_{80}, лучший метод выбирался по наибольшему значению вероятности $P_{80}(\delta)$. Получено, что ряд оценок обеспечивает примерно одинаковую точность оценивания t_{80}. Учитывая, что каждое значение $P_{80}(\delta)$ получено с некоторой погрешностью, в качестве лучших выбирали чаще встречающиеся оценки, что упрощает использование метода.

При $R_1 < 0$, когда наработки до цензурирования преимущественно расположены в начале и в середине вариационного ряда, оценивание «хвоста» функции распределения и t_{80} оказывается затруднительным по сравнению со случаем $R_1 > 0$, когда таким образом располагаются наработки до предель-

ного состояния. Анализ материалов исследования, относящихся к случаям $R_1 < 0$, $Y > 0{,}6$ позволил обнаружить возможность улучшения метода оценивания за счет разбиения области на две: $R_1 \le -0{,}2$ и $-0{,}2 < R_1 < 0$, для которых лучшими оказались соответственно оценки $F^{(1)}$ и $F_{\text{КМ}}$.

Результаты обработки данных статистического эксперимента для выбора лучших оценок сведены в таблицу.

Таблица

Рекомендуемые функции распределения для оценки t_{80}

Y	$R_1>0$	$R_1<0$, $R_2>0$	$R_1<0$, $R_2<0$
0,01…0,60	F_{N}	F_{N}	$F^{(2)}$
0,60…0,99	$F^{(2)}$	$R_1 \le 0{,}2$ $F^{(1)}$ $-0{,}2 < R_1 < 0$, $F_{\text{КМ}}$	$R_1 \le 0{,}2$ $F^{(1)}$ $-0{,}2 < R_1 < 0$, $F_{\text{КМ}}$

В принятых обозначениях $F_{KM}(t_i) = \prod_{l=1}^{i} (N_l - 1)/N_l$, где N_l – количество работоспособных изделий до l-го отказа в общем вариационном ряду, состоящем из наработок до отказа и до цензурирования.

Методика была проверена, в частности, на результатах эксплуатационных испытаний капитально отремонтированных тракторов ДТ–75. Все 16 тракторов достигли предельного состояния в течение четырех лет. Оценка 80-процентного ресурса $\hat{t}_{80} = 3850$ моточ. За 1,5 года до окончания испытаний было зафиксировано два ресурсных отказа и оценка t_{80}, рассчитанная по рассматриваемой методике, составила 3990 моточ., т.е. с относительной ошибкой 4 %.

Аналогичные проверки методики по результатам испытаний двигателей и тракторов показали, что относительная погрешность оценивания t_{80} не превышает 7 %. Снижение длительности эксплуатационных испытаний составляет не менее года и определяется разбросом ресурса изделий и интенсивностью использования техники.

Библиографический список

1. Kaplan, E.L. Nonparametric estimation from incomplete observations / E.L. Kaplan, P. Meier // J. of the American Statistical Association. – 1958. – V. 53. – Pp. 457–481.

2. Королькова, Л.И. Оценивание функции распределения наработки до отказа по цензурированной выборке / Л.И. Королькова, И.В. Корольков // Обозрение прикл. и промышл. Матем. – 2004. – Т. 11. – Вып. 4. – С. 614–615.

3. Nelson, W.B. Hazard plotting for incomplete failure data / W.B. Nelson. // J. of Quality Technology. – 1969. – V. 1. – P. 27–52.

К содержанию

УДК621.316.3.08

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ ВАФЕЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Е.С. Онучин, Ю.М. Хищенко

Решены задачи линейной динамики элементов вафельной цилиндрической оболочки, проведен качественный анализ результатов, сделаны выводы о необходимости использования нелинейной теории для получения корректного поведения конструкции, проведен качественный анализ уравнений нелинейной динамики стержня и оболочки.

Ключевые слова: поперечный удар, динамическая устойчивость, тонкостенная подкрепленная конструкция, параметрический резонанс.

В качестве объекта исследования выберем цилиндрическую вафельную оболочку, имеющую следующую геометрию вафельной клетки (рис. 1).

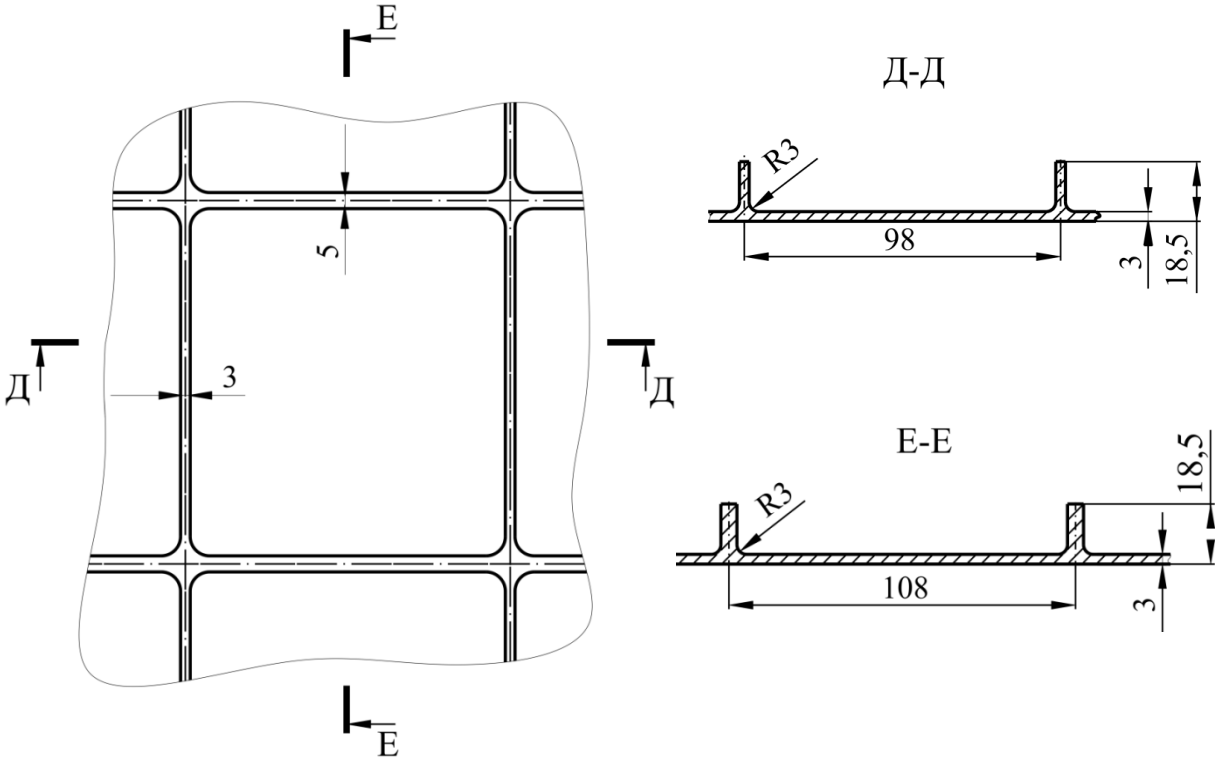


Рис. 1. Геометрия вафельной клетки

Для исследования динамики цилиндрической вафельной оболочки, с целью получения аналитического решения, удобного для анализа, разобьем конструкцию на составляющие её элементы: стержни силового набора и полотно вафельной клетки.

Для исследования ударного взаимодействия воспользуемся соотношениями контактной теории Герца, аппроксимируя ударный импульс во времени полуволной синуса:

$$p = p_0 \sin\frac{\pi t}{\tau}. \qquad (1)$$

где p_0 – амплитуда контактного давления, τ – время действия ударной нагрузки.

Рассмотрим линейную задачу динамического поведения сжатой пластины при ударном воздействии.

Дифференциальное уравнение движения прямоугольной пластины постоянной толщины, нагруженной силами в ее плоскости и импульсной поперечной нагрузкой по части ее поверхности, имеет вид [2]:

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p(x, y, t) + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \qquad (2)$$

где $w(x, y, t)$– прогибы пластинки; D – цилиндрическая жесткость; h – толщина; N_x, N_y – погонные силы, действующие в плоскости пластинки; $p(x, y, t)$ – поперечное давление.

Пластина нагружается равномерно распределенной по поверхности прямоугольника со сторонами u и v поперечной нагрузкой, координаты центра которого ξ и η. Сама пластина имеет размеры a и b вдоль осей x и y соответственно. Пластина также нагружается силами N_x и N_y, действующими в ее плоскости (рис. 2). В качестве граничных условий примем шарнирное опирание.

Решение дифференциального уравнения движения пластины будем искать в виде разложения по собственным формам колебаний [2]:

$$w(x, y, t) = \sum_{m=1}^{\infty}\sum_{n=1}^{\infty} w_{mn}(t) \cdot \sin\frac{m\pi x}{a} \cdot \sin\frac{n\pi y}{b}. \qquad (3)$$

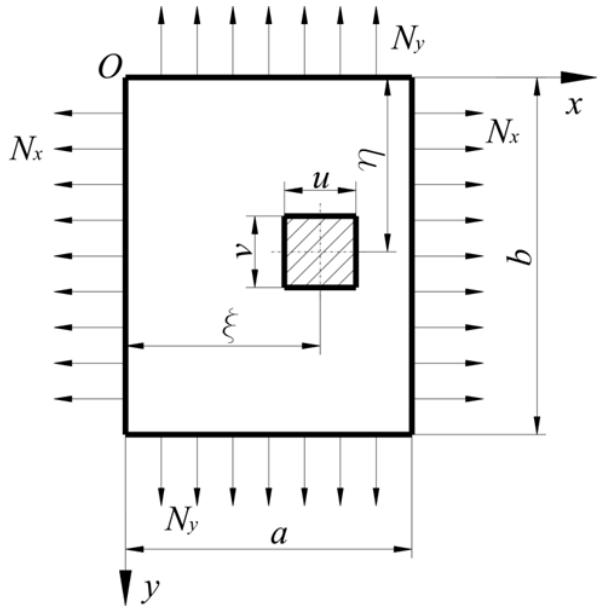


Рис. 2. Расчетная схема пластины, нагруженной силами
в ее плоскости и поперечной нагрузкой

Выражение для коэффициентов w_{mn} примет вид [2]:

$$w_{mn}(t)=\begin{cases}\dfrac{\dfrac{p_{mn}}{\rho h}}{\left(\lambda_{mn}^2-\left(\dfrac{\pi}{\tau}\right)^2\right)}\left(\sin\left(\dfrac{\pi t}{\tau}\right)-\dfrac{\left(\dfrac{\pi}{\tau}\right)}{\lambda_{mn}}\cdot\sin\left(\lambda_{mn}\cdot t\right)\right), & t\le\tau \\ -\dfrac{\dfrac{p_{mn}}{\rho h}\dfrac{\pi}{\tau}}{\lambda_{mn}\left(\lambda_{mn}^2-\left(\dfrac{\pi}{\tau}\right)^2\right)}\left(\sin\left(\lambda_{mn}\cdot\left(t-\tau\right)\right)+\sin\left(\lambda_{mn}\cdot t\right)\right), & t>\tau\end{cases}, \qquad (4)$$

где коэффициенты p_{mn} и λ_{mn} определяются по формулам:

$$p_{mn}=\frac{16p}{\pi^2 mn}\sin\frac{m\pi\xi}{a}\sin\frac{n\pi\eta}{b}\sin\frac{m\pi u}{2a}\sin\frac{n\pi v}{2b}; \qquad (5)$$

$$\lambda_{mn}^2=\frac{\pi^2}{\rho h}\left[D\pi^2\cdot\left(\frac{m^2}{a^2}+\frac{n^2}{b^2}\right)^2+N_x\frac{m^2}{a^2}+N_y\frac{n^2}{b^2}\right]. \qquad (6)$$

Исследуем зависимость динамических прогибов шарнирно опертой пластины, соответствующей полотну вафельной клетки рассматриваемой оболочки. Используя подход, изложенный в [2], получим следующие результаты:

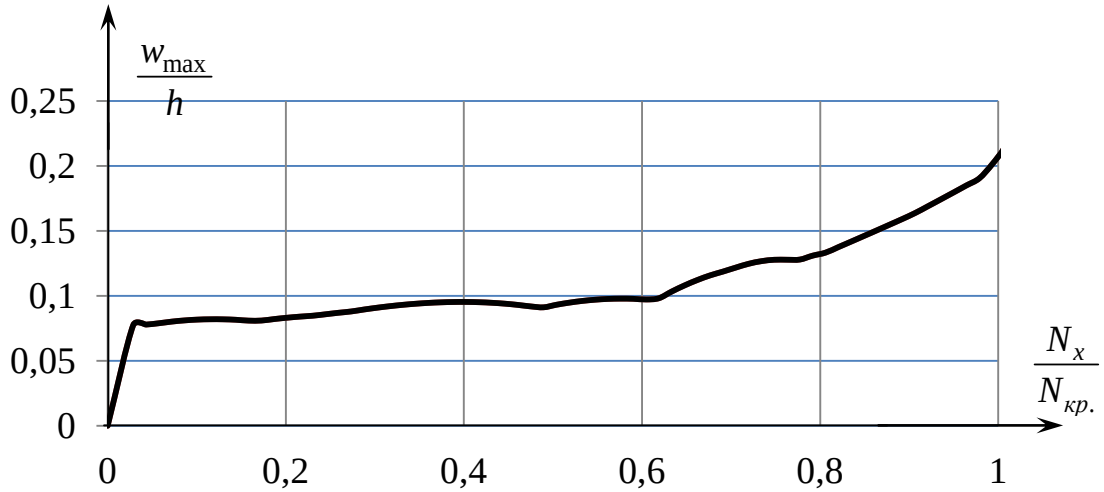


Рис. 3. Зависимость максимального динамического прогиба от сжимающего усилия при скорости ударника V=10 м/с

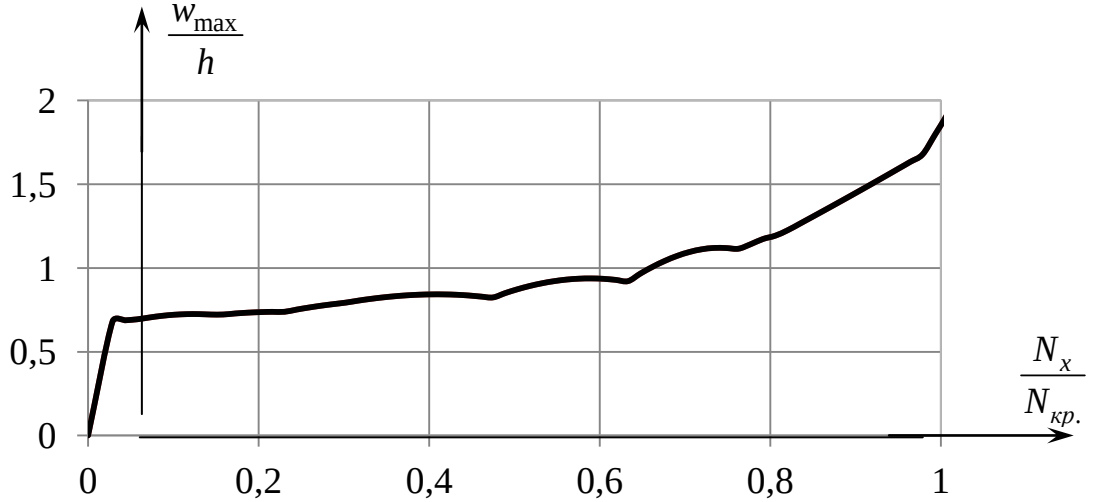


Рис. 4. Зависимость максимального динамического прогиба от сжимающего усилия при скорости ударника V=30 м/с

Из сравнения полученных графиков видно, что при приближении к критическому значению сжимающей силы прогибы значительно возрастают, но момент большого возрастания прогибов не зависит от интенсивности ударного воздействия. Теоретически при сжимающей нагрузке, равной критической, прогибы должны стать бесконечными, что видно из того, что коэффициент λ_{mn} обращается в нуль, что приведет к появлению бесконечно больших членов в ряде коэффициентов прогиба. Это фактически соответствует потере устойчивости пластины.

Рассмотрим линейную задачу динамического поведения шарнирно опертого стержня при поперечном ударе.

Изогнутую форму стержня представим в виде разложения по собственным формам колебаний:

$$w = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \cdot X_n(x), \tag{7}$$

где w – прогиб стержня, как функция времени и координаты, $X_n(x)$ – n-ая форма собственных колебаний стержня, удовлетворяющая условиям закрепления, $T_n(t)$– соответствующие n-ой форме колебаний искомые функции времени. Для сжатого шарнирно опертого стержня формы собственных колебаний имеют вид:

$$X_n(x) = \sin\frac{n\pi x}{l}. \tag{8}$$

Для решения задачи воспользуемся динамической моделью Тимошенко. Анализ уравнения проведем, используя метод Бубнова-Галеркина. Использование модели, учитывающей сдвиговые деформации, обосновывается тем, что в случае исследования динамики силового набора мы имеем дело с короткими стержнями, для которых вклад сдвига в общие перемещения становится значительным.

Податливость стержня для случая жесткой заделки обоих концов:

$$\frac{1}{c_1} = \frac{l^3}{192EI} + \frac{1,2l}{4GF}. \tag{9}$$

Податливость стержня для случая шарнирного опирания концов:

$$\frac{1}{c_2} = \frac{l^3}{96EI} + \frac{1,2l}{4GF}. \tag{10}$$

Например, для рассматриваемого стрингерного ребра (рис. 1) в случае жесткой заделки сдвиговые перемещения составляют 27 % от изгибных, а в случае шарнирного опирания – 13 %.

Поперечную нагрузку будем считать равномерно распределенной по длине b в середине балки. Форму импульса нагружения примем в виде полуволны синуса:

$$p = p_0 \sin\frac{\pi t}{\tau}. \tag{11}$$

Уравнение динамической модели Тимошенко [3] с учетом сжимающего усилия имеет вид:

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - P\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \rho I\left(1+\alpha\frac{E}{G}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\alpha\rho^2 I}{G}\frac{\partial^4 w}{\partial t^4} + \\ + \rho S\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = p(x,t) - \alpha\frac{EI}{GF}\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + \frac{\alpha\rho I}{GF}\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}. \quad (12)$$

После применения процедуры Бубнова-Галеркина для первой формы колебаний получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение относительно искомой функции времени (независимо от количества учитываемых форм уравнения для функций $T_n(t)$ будут независимыми):

$$T_1^{\mathrm{IV}}\frac{\alpha\rho^2 I}{G} + \ddot{T}_1\left(\rho I\left(1+\alpha\frac{E}{G}\right)\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 + \rho S\right) + T_1\frac{\pi^2}{l^2}\left(P + EI\frac{\pi^2}{l^2}\right) = \\ = p_0\frac{4}{\pi}\left(1 - \frac{\alpha\rho I}{GF}\left(\frac{\pi}{\tau}\right)^2\right)\sin\frac{\pi b}{2l}\sin\frac{\pi t}{\tau}; \quad (13)$$

Характеристическое уравнение будет иметь вид:

$$\gamma\lambda^4 + \beta\lambda^2 + \delta = 0, \quad (14)$$

где $\gamma = \frac{\alpha\rho^2 I}{G}$, $\beta = \left(\rho I\left(1+\alpha\frac{E}{G}\right)\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 + \rho S\right)$, $\delta = \frac{\pi^2}{l^2}\left(P + EI\frac{\pi^2}{l^2}\right)$.

Отсюда $\lambda^2 = \frac{-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 4\gamma\delta}}{2\gamma}$. Полученные значения квадрата корня характеристического уравнения будут положительными при $P \le -EI\frac{\pi^2}{l^2}$.

То есть при сжимающей нагрузке, превышающей значение статической критической нагрузки, будут возникать экспоненциальные корни, приводящие к неограниченному возрастанию прогибов.

Качественный анализ результатов показывает, что исследование динамического поведения элементов вафельной конструкции с помощью линейной теории дает весьма ограниченную информацию о поведении конструкции:

приведенный выше подход позволяет оценить динамические прогибы, деформации и перемещения, но не дает качественного описания явлений динамической потери устойчивости. Также не отмечается никакого взаимовлияния поперечной ударной нагрузки на величину критического сжимающего усилия. Целесообразно, для понимания физической сущности подобных явлений провести нелинейный анализ простого объекта – шарнирно опертой стойки. Уравнения, получаемые для данного объекта, более наглядны и просты для исследования.

Качественное исследование уравнений показывает, что искомое явление носит характер параметрического резонанса, возникающего вследствие взаимодействия продольных и поперечных волн деформации в стержне. Система уравнений динамики стержня, учитывающих поперечное ударное воздействие и действие постоянной сжимающей нагрузки, имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\left(1-\frac{P_0}{nFG}\right)-\left(\frac{1}{c^2}\left(1-\frac{P_0}{nFG}\right)+\frac{1}{c_1^2}\right)\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial t^2}+\frac{1}{c^2}\frac{1}{i^2}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}+\\
&+\frac{1}{c^2 c_1^2}\frac{\partial^4 w}{\partial t^4}+\frac{P_0}{EI}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}-\underline{\frac{1}{i^2}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\frac{\partial w}{\partial x}}-\underline{\frac{1}{i^2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\frac{\partial u}{\partial x}}-\frac{1}{i^2}\frac{3}{2}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\\
&=\frac{1}{c^2}\frac{1}{nFG}\frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial t^2}-\frac{1}{nFG}\frac{\partial^2 q(x,t)}{\partial x^2}+\frac{q(x,t)}{EI}.
\end{aligned} \tag{16}$$

Из качественного анализа слагаемых, входящих в уравнения можно сделать вывод, что поперечные колебания являются нелинейным источником продольных волн деформации (15), которые в свою очередь параметрическим образом влияют на поперечные колебания, так как в (16) функции продольных перемещений входят перед функциями поперечных перемещений в виде параметра. Это позволяет сделать вывод, что ожидаемая потеря несущей способности конструкции при ударном воздействии физически представляет собой внутренний параметрический резонанс и предположительно должна проявиться в большом возрастании прогибов при сжимающей нагрузке меньшей ее статического критического значения. Подобные (15, 16) уравнения приводятся в [4]. Приведенные в [4] результаты расчетов позволяют наглядно увидеть, что продольные волны могут возбуждать поперечные колебания стержня и приводить к динамическому выпучиванию. Наиболее полный вариант нелинейных уравнений динамики стержней приведен в [5]. Уравнение (16) отличается от приве-

денного в [4] дополнениями в виде учета постоянной сжимающей силы и поперечного распределенного воздействия, что позволяет рассмотреть задачу нелинейной динамики сжатого стержня при поперечном ударном воздействии, который является моделью стрингера сжатой вафельной оболочки.

Предполагаемый вид движения отличается от внешних резонансов тем, что по своей сути оно являет собой следствие взаимодействия продольных и поперечных волн деформации конструкции. Решение задачи параметрического возбуждения поперечных колебаний периодически изменяющейся нагрузкой рассмотрено в [6] для стержня и в [7] для гладкой цилиндрической оболочки, но в нашем случае имеет место возбуждение поперечных колебаний за счет продольных волн деформации, в свою очередь возбуждаемых поперечным ударом.

В случае оболочечной конструкции будет сказываться влияние и окружных волн, которые аналогично продольным волнам параметрическим образом возбуждают поперечные колебания. Это видно из уравнений для колебаний гладкой оболочки в перемещениях [7]. Подчеркнутые слагаемые в (19) описывают взаимное влияние волн деформации и их параметрическое взаимовлияние:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}-\frac{\mu}{R}\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+$$
$$+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{1-\mu^2}{Eh}p_x-\rho\frac{1-\mu^2}{E}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=0; \quad (17)$$

$$\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}-\frac{1}{R}\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+$$
$$+\frac{1+\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}+\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{1-\mu^2}{Eh}p_y-\rho\frac{1-\mu^2}{E}\frac{\partial^2 v}{\partial t^2}=0; \quad (18)$$

$$\frac{h^2}{12}\nabla^4 w-\frac{\mu}{R}\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{1}{R}\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{w}{R^2}-\frac{\mu}{2R}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2-\frac{1}{2R}\left(\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2-$$
$$-\frac{\partial}{\partial x}\left[\underline{\frac{\partial w}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\mu\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{\mu}{R}w\right)}+\underline{\frac{1-\mu}{2}\frac{\partial w}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)}\right]-$$
$$-\frac{\partial}{\partial y}\left[\underline{\frac{\partial w}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{1}{R}w\right)}+\frac{1-\mu}{2}\underline{\frac{\partial w}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)}\right]- \quad (19)$$
$$-\frac{1-\mu^2}{Eh}q+\rho\frac{1-\mu^2}{E}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}=0.$$

Из этих уравнений видно, что физически ситуация аналогична явлениям в стержнях.

Резонансное движение может иметь место при определенном соотношении параметров, входящих в уравнение, но получение границ областей неустойчивости связано с математическими трудностями. Для получения областей неустойчивости конструкции необходимо либо преодолеть громоздкость систем уравнений и перебором параметров получить примерные результаты, либо методами качественного анализа нелинейных уравнений получить искомые области изменения параметров.

По результатам анализа требуется установить, будет ли влияние предполагаемого явления значительным для исследуемой конструкции, и в каких условиях его стоит опасаться и учитывать.

Библиографический список

1. Андреев, Л.В. Динамика тонкостенных конструкций с присоединенными массами / Л.В. Андреев, А.И. Станкевич, А.Л. Дышко, И.Д. Павленко. – М.: Издательство МАИ, 1995. – 209 с.

2. Меркурьев, А.В. Пластинка под действием импульсной поперечной нагрузки и сил в ее плоскости / А.В. Меркурьев // Труды центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского. Расчеты напряженно-деформированного состояния и рациональное проектирование авиационных конструкций: Сборник статей. – М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1992. – 346 с.

3. Ершов, Н.Ф. Прочность судовых конструкций при локальных динамических / Н.Ф. Ершов. – Л.: Судостроение, 1989. – 200 с.

4. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – 2-е изд. – М.: Наука, 1967. – 984 с.

5. Ерофеев, В.И. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность / В.И. Ерофеев, В.В. Кажаев, Н.П. Семерикова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 208 с.

6. Болотин, В.В. Динамическая устойчивость упругих систем / В.В. Болотин. – М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1956. – 593 с.

7. Кубенко, В.Д. Нелинейные колебания цилиндрических оболочек: Учебное пособие / В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчук, Н.П. Подчасовой. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 208 с.

К содержанию

УДК 629.762.2

РАСЧЕТ НАГРУЖЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ РАКЕТЫ И ПУСКОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ СТАРТЕ С УЧЁТОМ КОНТАКТНЫХ СВЯЗЕЙ РАКЕТЫ, КОНТЕЙНЕРА И ШАХТЫ

С.В. Махнович, И.С. Лисин

В рамках методики расчёта динамических нагрузок при старте ракеты из транспортно-пускового контейнера сформирована конечно-элементная балочная модель конструкции ракетного комплекса. Для расчёта параметров ветрового воздействия на ракету используется модель нестационарного аэродинамического обтекания. Показано влияние жесткости контейнера и поперечных связей на динамику движения ракеты-носителя и нагруженность корпуса.

Ключевые слова: динамические нагрузки, старт ракеты, нелинейное взаимодействие, конечно-элементная модель.

Одним из основных расчётных случаев с точки зрения нагруженности конструкции ракеты и пусковой установки является миномётный старт ракеты-носителя (РН) из транспортно-пускового контейнера (ТПК) [1]. Под действием донного давления, создаваемого, например, пороховым аккумулятором давления, ракета в вертикальном положении выталкивается из транспортно-пускового контейнера. Вышедшая из ТПК часть ракеты подвергается поперечному ветровому воздействию. С момента отрыва от стартового стола и до момента выхода последнего опорно-ведущего пояса (ОВП) ракету-носитель и ТПК связывают упругие связи ОВП системы поперечной амортизации. Поперечные и продольные колебания конструкции ТПК и РН, обусловленные изменением ветровой аэродинамической нагрузки и донного давления, а также сходом поясов амортизации с края контейнера, приводят к появлению пиковых значений поперечных динамических реакций в ОВП и действующих напряжений в корпусе РН и ТПК.

Для определения нагрузок, действующих на конструкцию ракеты и пусковой установки, на начальных этапах проектирования наименее трудозатратными при приемлемой точности являются балочные и упруго-массовые расчётные модели.

В работе рассматриваются особенности балочной конечно-элементной модели для расчёта нагрузок на конструкцию РН и ТПК при старте на примере ракеты-носителя «Днепр».

Методика расчёта нагрузок с использованием балочной конечно-элементной расчётной модели включает.

1. Анализ компонентного состава исследуемой системы с целью ограничения количества элементов расчётной модели, а также определение характера связи между ними.

В случае «минометного старта» в компонентную модель входит ракета-носитель; транспортно-пусковой контейнер; система опорно-ведущих поясов горизонтальной амортизации ракеты в контейнере; системы горизонтальной и вертикальной амортизации ТПК; имитаторы колебаний жидких компонентов топлива в баках.

РН и ТПК находятся в контактном взаимодействии через пояса ОВП до момента выхода последнего ОВП ракеты за срез контейнера.

2. Формирование исходных данных для расчёта нагрузок.

В состав исходных данных для расчёта входят: габаритные размеры ракеты и элементов стартовой установки; массовые и жесткостные характеристики конструкции РН и ТПК; характеристики жесткости элементов вертикальной и горизонтальной амортизации ТПК; упругие характеристики опорно-ведущих поясов РН; параметры диссипативных свойств моделируемой системы, её отдельных элементов; характеристики внешнего воздействия (ветровой нагрузки и диаграммы изменения давления на донную часть в зависимости от времени).

Типовая зависимость [1] изменения давления *P(t)*, действующего на донную часть РН, от времени движения ракеты в контейнере показана на рисунке 1.

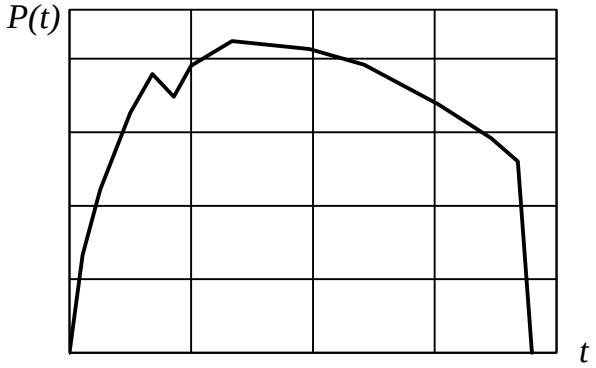


Рис. 1. Типовая диаграмма изменения давления, действующего на донную часть РН

В соответствии с рекомендациями «Руководства для конструкторов» [2] на всех тонах собственных колебаний исследуемой системы величина логарифмического декремента затухнаия колебаний в рассматриваемой модели принята равной 0,05.

3. Определение возможности и целесообразности уточнения динамических моделей для расчёта нагрузок при старте, в частности, применения модели нестационарного аэродинамического нагружения для расчёта параметров ветрового воздействия, а также параметры механических аналогов для моделирования колебаний жидких компонентов топлива в баках.

Аэродинамическое воздействие от ветровой нагрузки на ракету в процессе старта имеет нестационарный характер. Возникающие срывы потока ветра, вихри из-за оживальной формы обтекателя, поперечные колебания РН вызы-

вают появление пиковых значений аэродинамического давления на отдельных участках корпуса РН, вышедших за срез ТПК. В работе расчётная модель ветрового воздействия формируется с помощью программного комплекса численного моделирования *ANSYS CFD* с использованием динамических перестраиваемых сеток. Результатом этого численного моделирования являются эпюры поперечных равнодействующих сил от ветрового воздействия в расчётных узлах модели РН в различные моменты времени в процессе выхода РН из ТПК. Для расчёта механических нагрузок, действующих на конструкцию РН и ТПК, используется эпюра распределения максимальных значений поперечного равнодействующего усилия по длине Q_{Yi} в каждый момент времени. Вид этой эпюры показан на рисунке 2.

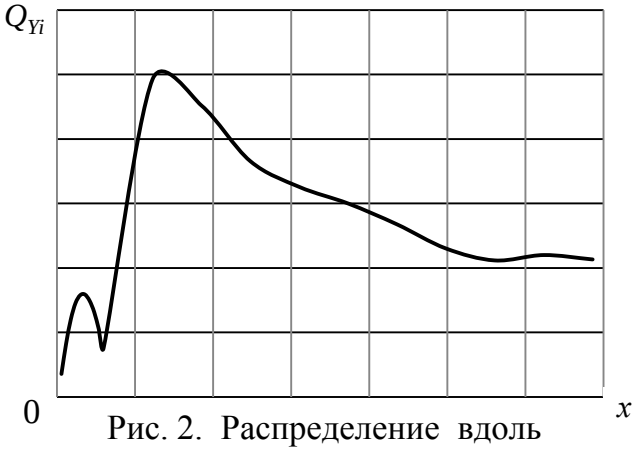


Рис. 2. Распределение вдоль продольной оси x ракеты максимальной поперечной равнодействующей силы Q_{Yi} ветрового давления

Для учёта особенностей колебаний конструкции с баками, частично заполненными жидкостью, в расчётных моделях используются их механические аналоги. При этом в основу динамической схемы отсеков, содержащих жидкие компоненты РН положен эквивалентный упругий стержень с присоединенными к нему осцилляторами и мятниками.

В работе [3] показана возможность независимого решения задачи об осесимметричных колебаниях отсеков с жидкостью, из решения которой определяются параметры рассматриваемых имитаторов колебаний. Расчёт параметров, характеризующих механические аналоги колебаний жидкости (для осцилляторов – массы и жесткости, а для маятников – массы и длины), связан с определением массы жидкости, вовлекаемой в движение в баке при продольных и поперечных колебаниях. С учётом исследований [4] величина этой массы, а также характеристики осцилляторов определяются из анализа собственных колебаний баков с жидкими компонентами.

4. Формирование балочной конечно-элементной модели РН и ТПК с учётом их контактного взаимодействия для решения нелинейной задачи динамики движения упругой конструкции с помощью программного комплекса MSC.Nastran.

Схема балочной расчётной модели РН и ТПК, связанных упругими контактными связями, представлена в плоскости *xy* на рисунке 3.

Расчётная схема представляет собой РН как упругую балку с четырьмя парами поперечных упругих связей ОВП1, ОВП2, ОВП3 и ОВП4, скользящими по упругой балке-контейнеру. Ветровое воздействие распределено по длине вышедшей из ТПК части ракеты в виде равнодействующих поперечных усилий $Q_{Yi}(x)$ в расчётных узлах. К нижним расчётным узлам РН и контейнера в противоположных направлениях приложена выталкивающая сила $P(t)$.

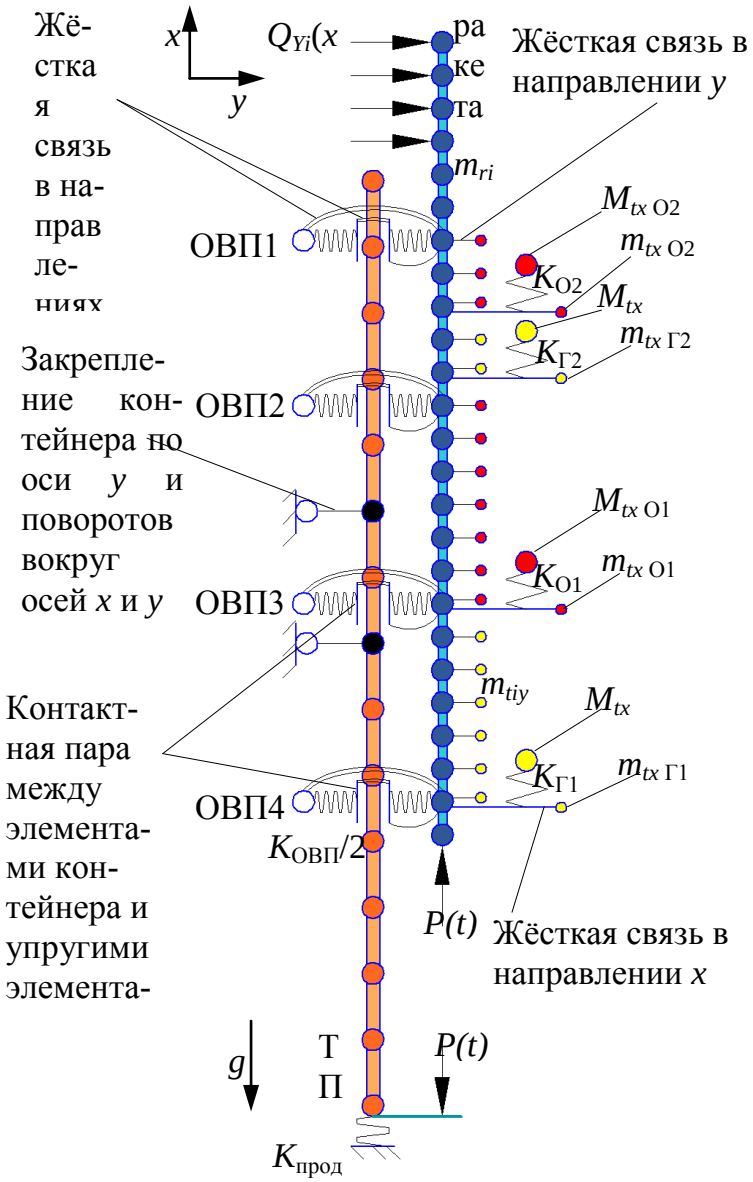


Рис. 3. Упруго-массовая расчётная модель конструкции ракеты и контейнера

Нижний узел контейнера удерживается в продольном направлении упругим амортизатором с постоянной жёсткостью $K_{прод}$. Действие поперечных опор ТПК моделируется закреплением соответствующих узлов в месте установки поперечной связи по направлениям *y*, *z* и запрещением поворотов относительно осей *x*, *y*.

Конечно-элементная модель ракеты и контейнера формируется с использованием балочных двухузловых конечных элементов BAR2. Поперечные связи ОВП моделируются в виде четырёх пар упругих элементов SPRING. Суммарная жёсткость каждой пары равна жёсткости пояса амортизации $K_{ОВП}$. Расчётная схема ОВП в контакте с РН и ТПК показана на рисунке 4. Упругие элементы SPRING находятся в плоскости *xy* по обе стороны балки-контейнера перпендикулярно её оси. Элемент, находящийся со стороны ракеты, имеет с ней общий узел. Элемент, находящийся по другую сторону от оси контейнера, связан с тем же узлом ракеты при помощи жёсткой связи RBE2 по направлениям *x* и *y* (на рис. 3 и 4 эта связь обо-

значена дугами). При помощи такой же функции жёсткой связи RBE2 по направлениям *x* и *y* связаны между собой контактирующие с контейнером узлы каждой пары упругих элементов, моделирующих действие всех четырех поясов ОВП1…ОВП4. Для обеспечения продольного движения упругих элементов, один из пары скользящих узлов связан в продольном направлении *x* с узлом ракеты. «Скольжение» этих элементов по элементам балки-контейнера выполнено заданием опции SLIDELINE.

Из рис. 4 видно, что смещение ведущего узла ракеты в поперечном направлении *y* вызывает появление усилий в упругих элементах: в одном элементе сжимающее, в другом – растягивающее. Направление действия этих усилий совпадают. Их суммарная сила, приходящаяся как на узлы РН, так и на ТПК, равна результирующей реакции ОВП РН.

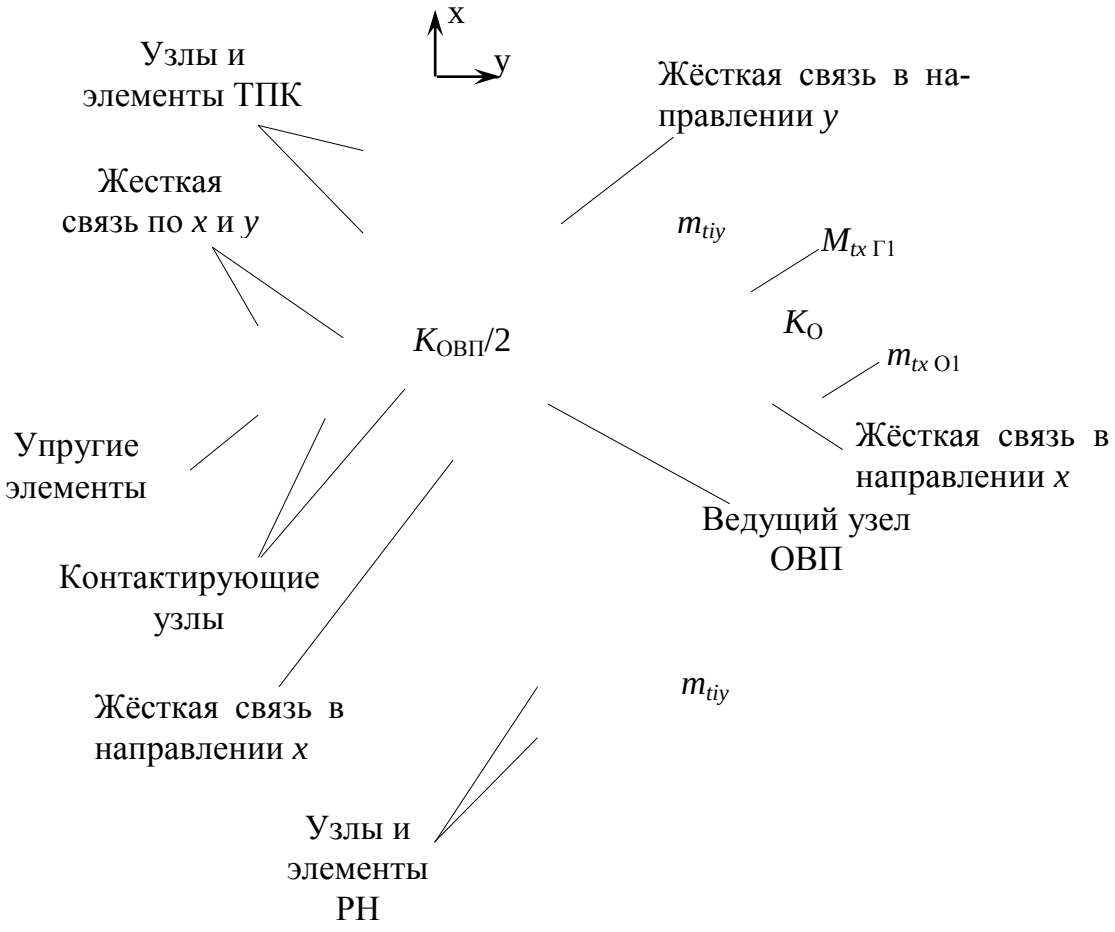


Рис. 4. Расчётная схема опорно-ведущего пояса ракеты в конечно-элементной модели РН и ТПК

Массово-инерционные характеристики в конечно-элементной модели задаются через свойства балочных элементов в виде распределенной массы и с помощью одноузловых элементов COMN2. Масса топлива моделируется

элементами COMN2 и в поперечном направлении равномерно распределена по узлам m_{tiy}, расположенным между нижним днищем и зеркалом жидкости в каждом баке. В продольном направлении массы компонентов топлива действуют только на узлы, соответствующие нижним днищам баков (m_{tix}).

Решение задачи динамики движения РН и ТПК при старте выполняется с помощью последовательности решений SOL 129, которая применяется для нелинейного анализа переходных процессов прямым методом интегрирования уравнений равновесия находящейся в движении конечно-элементной структуры.

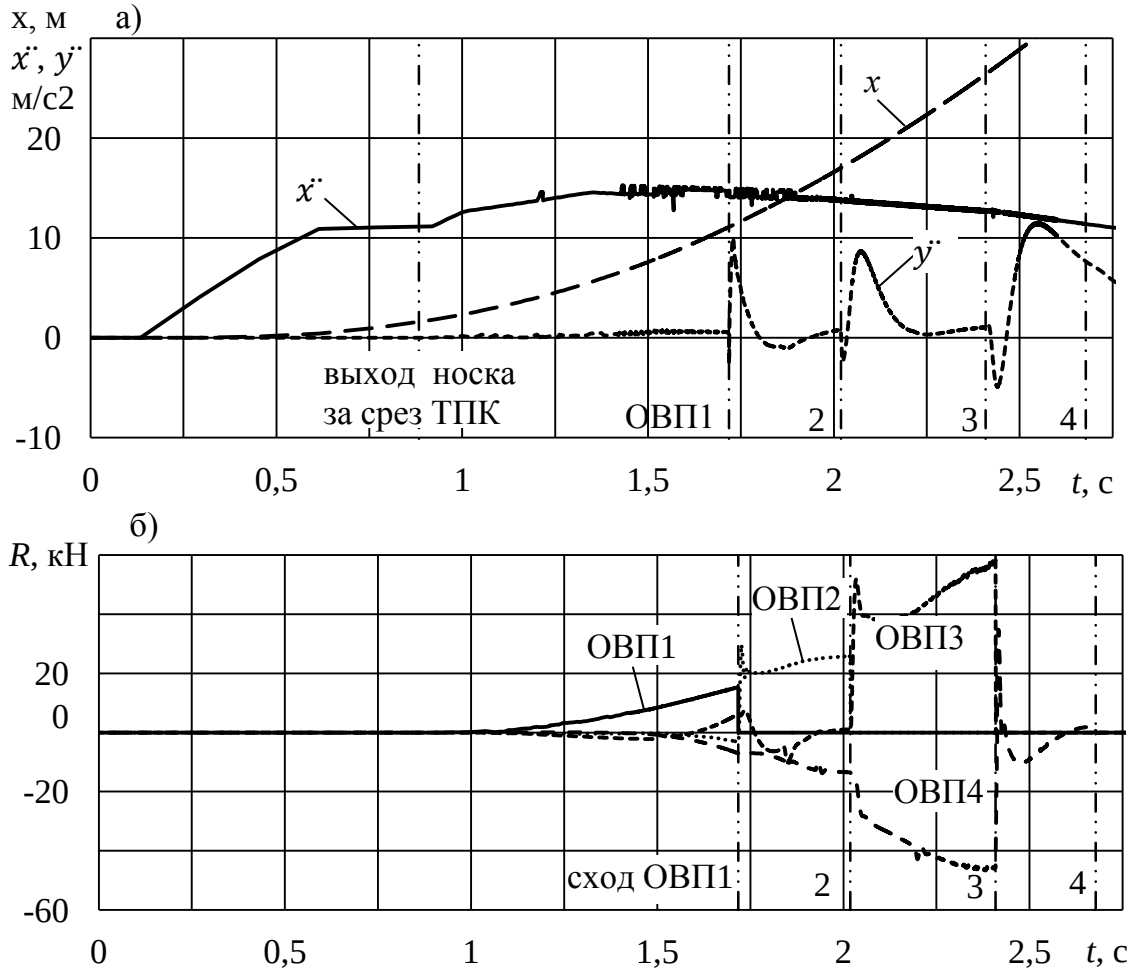


Рис. 5. Динамические характеристики движения РН:
а) продольное перемещение x и ускорение $\ddot{x}$, $\ddot{y}$;
б) поперечных реакций в ОВП РН во времени

На рисунке 5 а и б показано изменение во времени расчётных продольного $\ddot{x}$, поперечного $\ddot{y}$ ускорений носка РН и реакций поясов ОВП. Обозначен момент выхода носка ракеты-носителя за срез контейнера (с этого момента на ракету начинает действовать ветровая нагрузка), а также моменты схода

поясов ОВП1, 2, 3 и 4. Максимальное продольное ускорение составляет 15 м/с^2 и действует в момент схода первого ОВП. Сход опорно-ведущих поясов со среза контейнера вызывает скачки сил реакций и поперечного ускорения до 11 м/с^2 после выхода третьего ОВП.

Несмотря на значительные упрощения, балочная упруго-массовая модель является эффективным средством анализа динамической нагруженности РН на начальных этапах проектирования. Однако в рассматриваемой задаче с учётом контактного характера связей РН, ТПК и шахтной пусковой установки и это решение требует значительных ресурсов и времени ЭВМ. Особенно значительным это обстоятельство становится в параметрическом анализе при выборе жесткостных характеристик связей РН и ТПК с целью снижения нагруженности проектируемой РН.

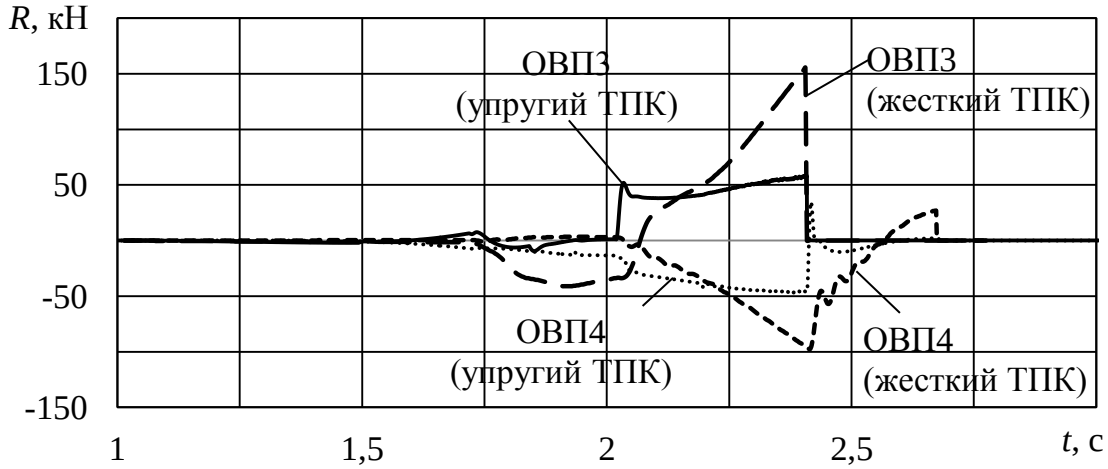


Рис. 6. Изменение реакций в 3-м и 4-ом ОВП РН во времени для моделей старта ракеты с учётом и без учёта упругости ТПК

Практический интерес представляет оценка возможности упрощения этой задачи. Полагая, например, ТПК абсолютно жестким, выигрываем во времени решения более чем на порядок. Однако максимальные расчётные значения реакций ОВП при этом возрастают в 2,6 раза, что показано на рисунке 6. Этот результат можно считать верхней оценкой, в запас.

На рисунке 7 показаны зависимости смещения осей РН и ТПК для крайних точек осей корпуса ракеты и контейнера – поперечное смещение оси среза ТПК и оси торцевого шпангоута поддона РН. Штриховыми линиями на рис. 7 обозначено возможное смещение оси РН с учётом величины зазора между РН и ТПК. Зависимость поперечного перемещения верхнего среза контейнера и «хвоста» РН выведена в отрезке времени от начала старта до выхода ракеты из транспортно-пускового контейнера (от 0 до 2,75 с). Видно, что поперечное смещение хвостовой части лежит внутри допустимого коридора, безударность выхода РН из ТПК обеспечивается.

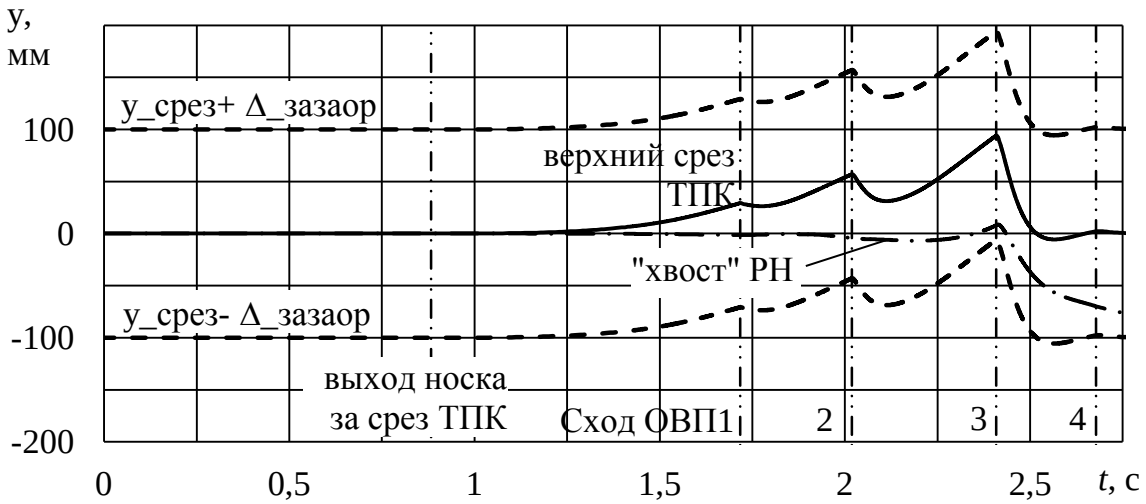


Рис. 7. Поперечное смещение центра сечения верхнего среза контейнера и центра нижнего сечения («хвоста») РН

Очевидным преимуществом разработанной модели для расчёта динамических нагрузок перед общепринятыми является реализация контактного взаимодействия между ракетой-носителем и транспортно-пусковым контейнером. Вместо построения двух отдельных моделей РН и ТПК для расчёта продольных и поперечных нагрузок достаточно проведения динамического анализа модели старта РН из ТПК, сформированной по вышеописанной методике. Как было показано на примере анализа старта РН «Днепр», в результате динамического расчёта сформированной модели получены кинематические и силовые характеристики для всех элементов системы, необходимые при проектировании в первую очередь стартовой установки, элементов системы амортизации РН и ТПК. С точки зрения применения полученных результатов при проектировании корпуса РН, стартовые нагрузки обычно не бывают определяющими. Известно, что для ракеты определяющими являются полётные нагрузки. В процессе старта продольное сжимающее усилие превалирует над изгибающим моментом и перерезывающим усилием. Поэтому с точки зрения проектирования РН по полученным результатам стоит судить об ударности стартовых нагрузок, о величине локальных нагрузок, приходящихся на оболочки корпуса РН.

На основе перемещений РН относительно контейнера можно судить о безударности выхода ракеты из ТПК.

Получение результатов расчёта динамических нагрузок, наиболее приближенных к реальным их значениям, важно в процессе проектирования изделий ракетно-космической отрасли. Ведь, чем более точно будут определены нагрузки, тем с большей точностью будет «обсчитана» проектируемая конструкция. Будет получена её минимальная масса при меньшем числе её расчётных приближений.

Библиографический список

1. Минометный старт межконтинентальных баллистических ракет / С.Н. Конюхов, П.П. Логачев. – Днепропетровск.: НАН НКА Украины, Институт технической механики, ГКБ «Южное», 1997. – 211 с.

2. Руководство для конструкторов. Т. 7. Методические основы определения нагрузок изделий РКТ и нормирования прочности. – ЦНИИмаш, 2010. – 91 с.

3. Рабинович, Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов / Б.И. Рабинович. – М.: Машиностроение, 1975. – 416 с.

4. Клейменов, Г.Б. Расчетно-экспериментальный метод создания динамических моделей ракетно-космических конструкций: автореф. дис. … канд. техн. наук / Г.Б. Клейменов. – М., 2011. – 28 с.

К содержанию

УДК 629.762.2 + 539.42

РАСЧЁТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОФРИРОВАННОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

С.В. Махнович, А.М. Овчинников

В статье рассмотрен процесс формирования расчётной модели деформирования гофрированной оболочки. Проведено исследование влияния частоты сетки КЭ модели на точность решения. Выполнено сравнение результатов расчёта перемещения жёсткого центра мембраны с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гофрированная оболочка, нелинейное деформирование.

В связи с ограничениями накладываемыми на габаритные размеры, а также массовые характеристики конструкций в ракетной технике широко используются разворачивающиеся, оболочки. В начальный момент времени такие конструкции находятся в свёрнутом компактном состоянии и в нужный момент принимают требуемую форму. Выполняемые при этом задачи могут быть различными. Из литературы известны примеры использования таких механизмов для увеличения закритической части сопла РД в полёте, механического разделения компонентов топлива, разворачивания головного обтекателя БР и др.

За частую в основе создания конструкций ракетной техники лежит не теоретическое исследование, а сложная и дорогостоящая экспериментальная отработка. В связи с этим, в виду отсутствия методических материалов по расчётам и проектированию, создание аналогичных конструкций наталкивается на такие же сложности.

Основной проблемой проектирования гофрированных оболочек является описание нелинейных процессов деформирования. Все нелинейные процессы, возникающие в условиях сложного нагружения оболочки, можно разделить на геометрически нелинейные и физически нелинейные. Первый тип выражается в нелинейной зависимости деформаций от перемещений. Второй тип нелинейности выражается в появлении в материале при определённых условиях неупругих деформаций, которые начинаются при достижении некоторого напряжения – предела текучести материала.

Для решения нелинейных задач используются, в основном, численные методы. Среди них особое место занимает метод конечных элементов (МКЭ) в силу его универсальности в программной реализации и возможности создания полностью автоматизированного цикла расчёта.

В работе рассмотрен расчёт разворачивания гофрированной оболочки с 5 гофрами, внешним радиусом R=150мм, толщиной h=0,18мм, углом при вершине гофра β=126º40` и высотой гофра H=3.93мм при помощи конечно-элементного комплекса MSC NASTRAN. Расчётная схема оболочки показана на рис. 1.

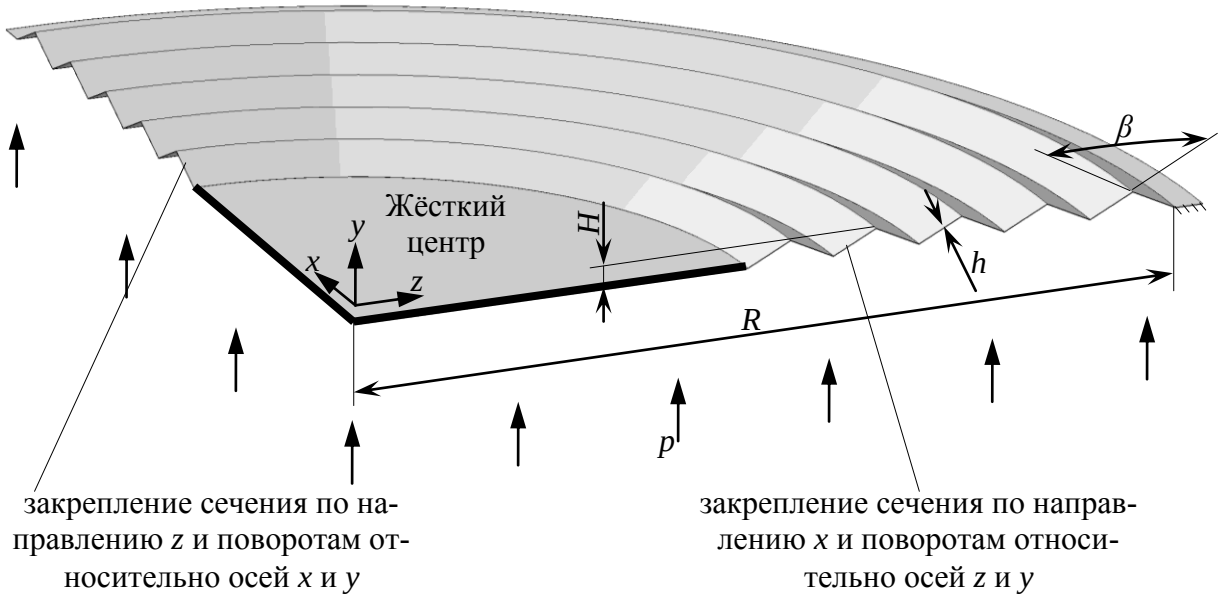


Рис. 1. Расчётная схема деформирования гофрированной оболочки

Осевая симметрия граничных условий и геометрии позволяет рассматривать в расчётной модели четверть оболочки. Это упрощение не влияет на результаты расчёта, однако значительно сокращает время его выполнения. На сечения симметрии наложены соответствующие граничные условия. По внешнему контуру оболочка закреплена по всем направлениям. Избыточное давление p плавно повышается от 0 до 40 кПа со скоростью 10кПа/с.

Для расчёта принята упруго – пластическая модель материала 12Х18Н10Т с упрочнением диаграмма деформирования которого показана на рис. 2. Модуль Юнга материала принят равным $E=2{,}05\cdot10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu=0{,}34$.

Конечно-элементная модель, показанная на рис. 3, сформирована из оболочечных четырёхузловых элементов типа CQUAD4 с пятью степенями свободы в каждом узле.

Из опыта решения подобных задач известно, что большое влияние на результаты расчётов имеет размер элементов, особенно в областях сгущения напряжений, таких как вершины гофров. Поэтому проведено исследование влияния количества элементов на гофре (N= от 2 до 7) в радиальном направлении на точность определения одной из основных характеристик деформирования – перемещение жёсткого центра. Результаты расчётов представлены на рис. 4. В процессе деформирования оболочки можно выделить три основных участка:

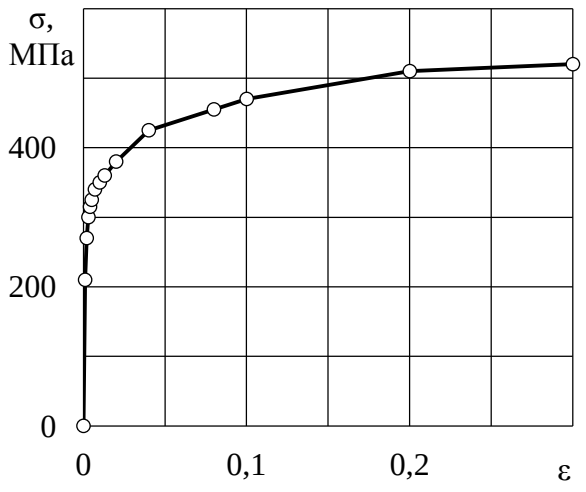


Рис.2. Диаграмма деформирования материала Х18Н10Т

1) упругое деформирование. Характеризуется линейным участком в начале диаграммы. При этом напряжения в оболочке не превышают предела текучести;

2) упруго-пластическое деформирование. Имеет явно не линейный характер на диаграмме и оканчивается резким разворачиванием последнего гофра. Напряжения в вершинах гофр превышают предел текучести;

3) «додавливание» оболочки с развёрнутыми гофрами.

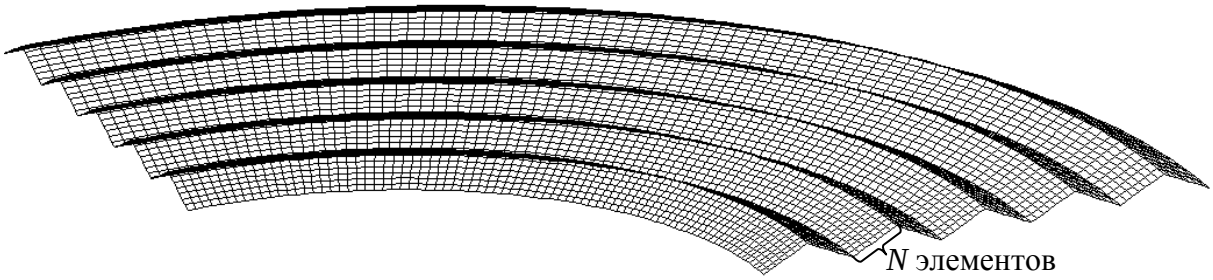


Рис. 3. Конечно-элементная модель гофрированной оболочки

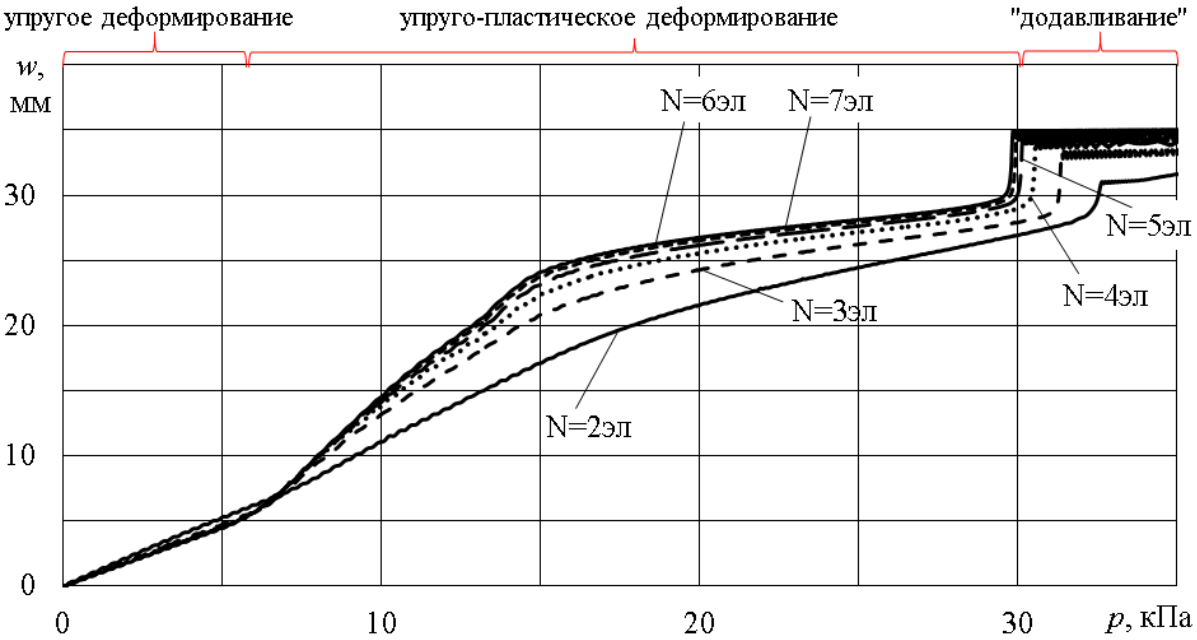


Рис. 4. Зависимость перемещения жёсткого центра мембраны w от избыточного давления p

Расчёты показали, что при малом количестве (до 4) элементов на гофре жёсткость расчётной модели оболочки увеличивается от 14 до 23 %. Таким образом, для расчёта деформирования гофрированной мембраны с большим углом вершины гофра достаточно 5…7 элементов на гофре.

На рис. 5 показаны результаты расчёта перемещения жёсткого центра с изменением давления в сравнении с результатами эксперимента, проведённого на кафедре ЛАиАУ ЮУрГУ [1].

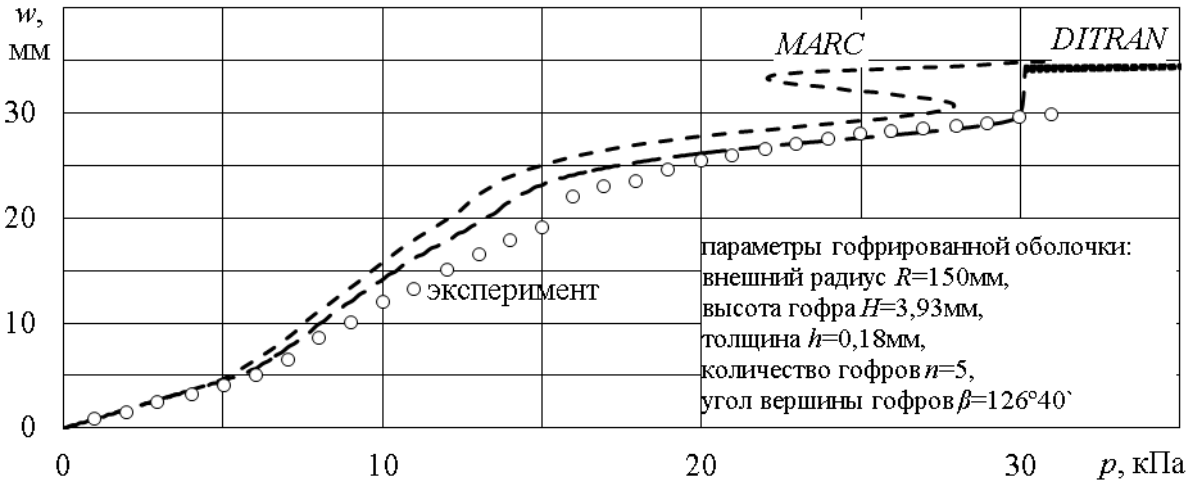


Рис. 5. Перемещение жёсткого центра гофрированной оболочки при увеличении избыточного давления

Максимальное отклонение расчётной кривой от эксперимента составило 20 % на этапе упруго – пластического деформирования. Вероятнее всего это связано с наличием в реальной модели начальных несовершенств материала и формы, которые ведут к образованию местных потерь устойчивости как показано на рис. 6.

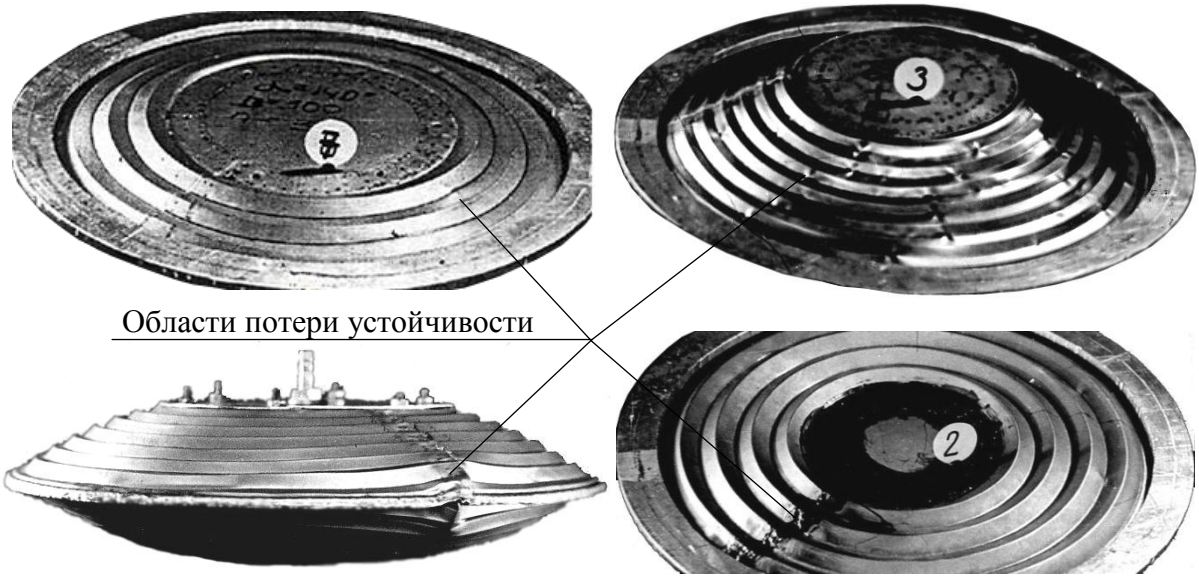


Рис. 6. Формы потери устойчивости при испытании

В испытаниях потеря устойчивости (выхлоп) для каждого гофра начинается с наиболее слабой с точки зрения жёсткости области. Такое одностороннее выпучивание приводит к образованию поперечных складок во впадинах и увеличению общей жёсткости оболочки.

Таким образом, сформированная модель позволяет с достаточной точностью описывать изменение формы гофрированной мембраны при увеличении избыточного давления. Максимальное отклонение расчёта перемещения жёсткого центра от эксперимента составило 20 % на этапе упруго – пластического деформирования.

При отработке расчётной модели установлено, что для уменьшения погрешности расчёта связанной с пространственной дискретизацией геометрии гофрированной оболочки с большим углом вершин гофра достаточно 5–7 элементов на стенке гофра.

Библиографический список

1. Волошина, И.А. Расчет больших перемещений гофрированных мембран / И.А. Волошина, С.В. Махнович // Вестник ЮУрГУ. – 2002. – Вып. № 6(15). – С. 50–59.

К содержанию

УДК 681.3

РАЗРАБОТКА РАСЧЕТНОЙ ТРЕХМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕТЫРЕХКОЛЕСНОГО МОБИЛЬНОГО МАРСОХОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ LMS

П.А. Тараненко, В.В. Анчуков, А.А. Шакиров

Разработан и изготовлен опытный образец шасси мобильного марсохода, проведены натурные ходовые испытания, показавшие необходимость его доработки. Предложена новая конструкция шасси. С использованием пакета проведены сравнительные виртуальные ходовые испытания двух прототипов шасси. Такой подход позволил усовершенствовать конструкцию и оценить ее эффективность без изготовления опытного образца.

Ключевые слова: планетоход, динамика движения колесного транспортного средства, имитационное компьютерное моделирование, робототехника.

Одним из актуальных вопросов развития современной науки является освоение космического пространства. Соответственно возникает потребность в определенном оборудовании для выполнения исследовательских работ, наблюдения и сбора информации. В частности, начиная с конца XX века, поверхность Марса изучают с помощью марсоходов.

Однако известные на сегодняшний день марсоходы обладают рядом недостатков, ограничивающих их применение. Сюда можно отнести высокую стоимость, низкую скорость передвижения и недостаточную проходимость по пересеченной местности. Таким образом, появляется необходимость в создании нового сегмента недорогих универсальных мобильных планетоходов.

Мобильный марсоход представляет собой четырехколесное транспортное средство. Создаваемый прототип состоит из трех взаимодействующих подсистем: механической части, электропривода и системы управления с обратной связью.

Первый образец шасси марсохода создан опытным путем, конструкция приведена на рис. 1. Результаты натурных полевых испытаний подтвердили общую работоспособность системы, однако вместе с этим были выявлены некоторые недостатки, в частности неспособность преодолевать некоторые естественные препятствия. Эти результаты показали необходимость доработки опытного образца, выполнение которой было решено проводить расчетным путем с трехмерной динамической модели без изготовления нового опытного образца.

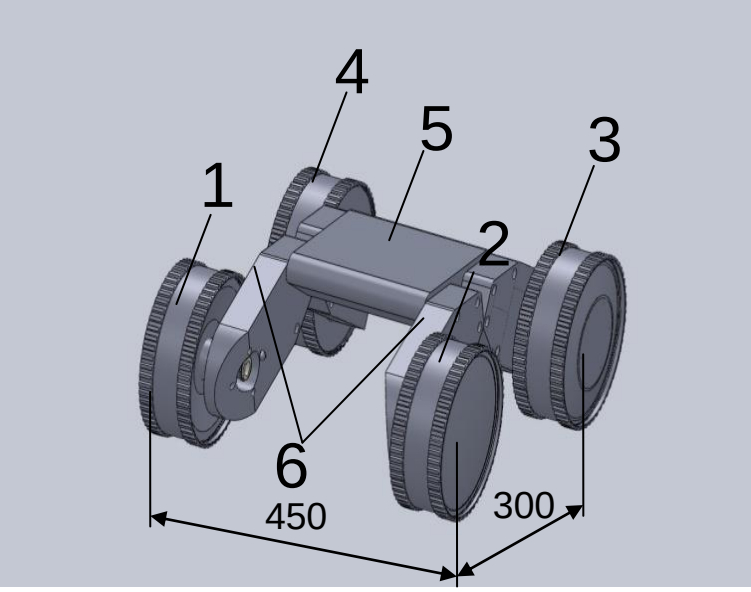


Рис. 1. Общий вид шасси мобильного робота (1, 2 – приводные модули;
3, 4 –неприводные модули; 5 – платформа крепления оборудования;
6 – корпусы расположения плат системы управления и аккумуляторов)

Существует два основных метода исследования динамических моделей: аналитический подход (позволяет получить точное решение дифференциальных уравнений) [1], [2], [3] и численный (с применением прикладных CAE и CAD пакетов). Создаваемая система даже с учетом упрощающих допущений уже является настолько сложной, что ее аналитическое решение становится невозможным. Поэтому сопоставлять аналитическое и численное решения удается только на простейшей модели, свойства которой достаточно далеки от реального изделия.

Расчетная динамическая модель рассматриваемого мобильного робота создана в среде пакета LMS Virtual.Lab. Данный пакет обладает очень широкими возможностями для решения задач динамики движения, вибрации, шума изделий аэрокосмической и автотракторной техники. Так, применительно к разрабатываемому транспортному средству LMS Virtual.Lab позволяет создавать трехмерные модели (в том числе сборки) проектируемого изделия из абсолютно жестких тел, задавать характеристики материалов, задавать условия взаимодействия и сочленения конкретных элементов модели как между собой, так и с окружающей их средой. Основное преимущество пакета LMS Virtual.Lab заключается в том, что он позволяет проводить виртуальные испытания и совершенствовать изделие еще на стадии разработки, не прибегая к изготовлению опытных образцов, что помогает существенно экономить финансовые средства и сокращать общие сроки процесса создания изделия и вывода его в серию.

Для создания в LMS Virtual.Lab корректной расчетной модели была проведена ее верификация путем сравнения с аналитическим решением для упрощенной двухколесной тележки сопоставлением следующих результатов расчета: траекторий движения центра масс, продольных сил, действующие на каждом колесе. Режимы движения тележки в обоих случаях одинаковы: на одном колесе задан постоянный во времени крутящий момент. В этом случае одно из колес неподвижно (на котором крутящий момент отсутствует), а центр масс тележки вращается вокруг этого колеса. Массы и моменты инерции всех элементов тележек идентичны в обоих случаях. Таким образом, траектория движения центра масс представляет собой окружность. Результаты сопоставления приведены на рис. 3.

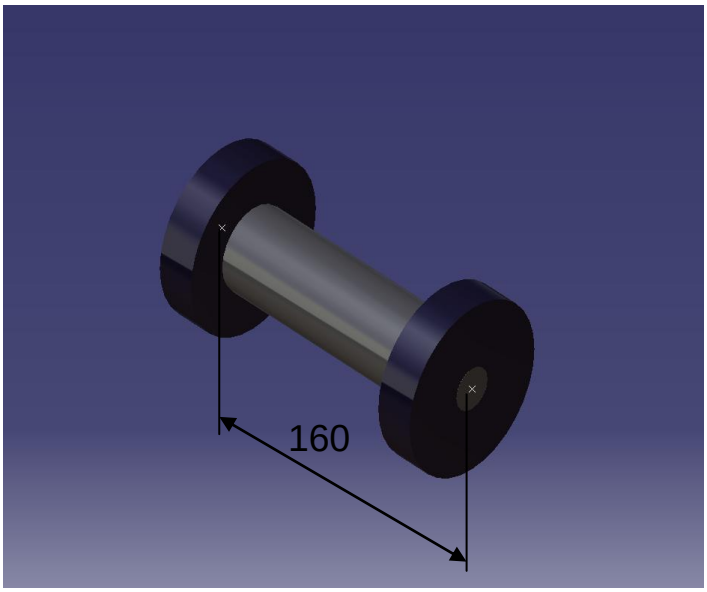


Рис. 2. Упрощенная модель двухколесной тележки

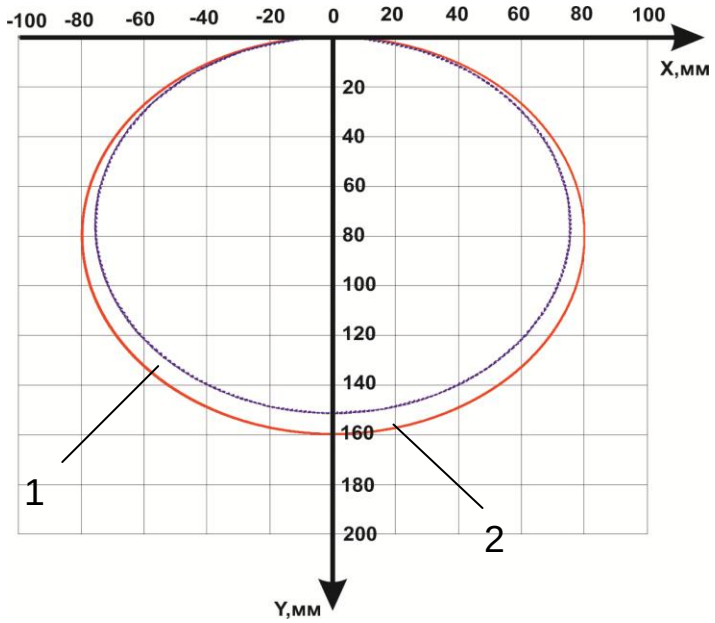


Рис. 3. Траектория движения центра тяжести тележки:
1 – аналитическое решение;
2 – результат моделирования в LMS Virtual.Lab

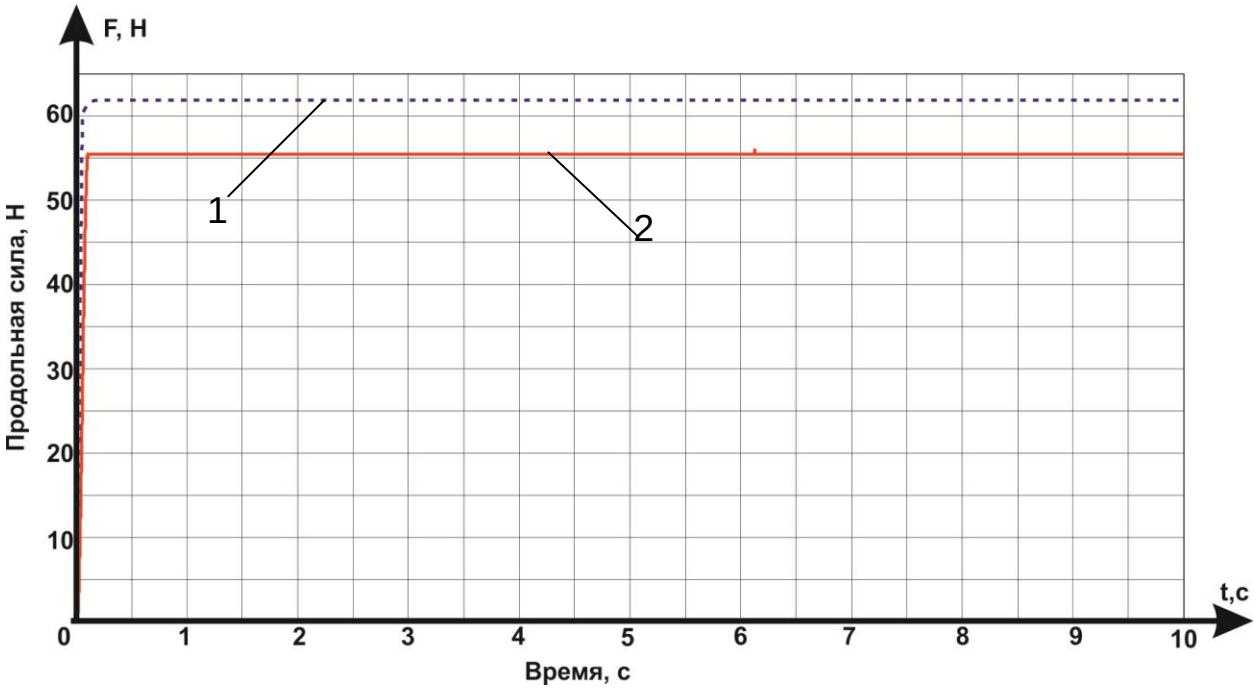


Рис. 4. Изменение значения продольной силы на правом колесе тележки:
1 – аналитическое решение; 2 – результат моделирования в LMS Virtual.Lab

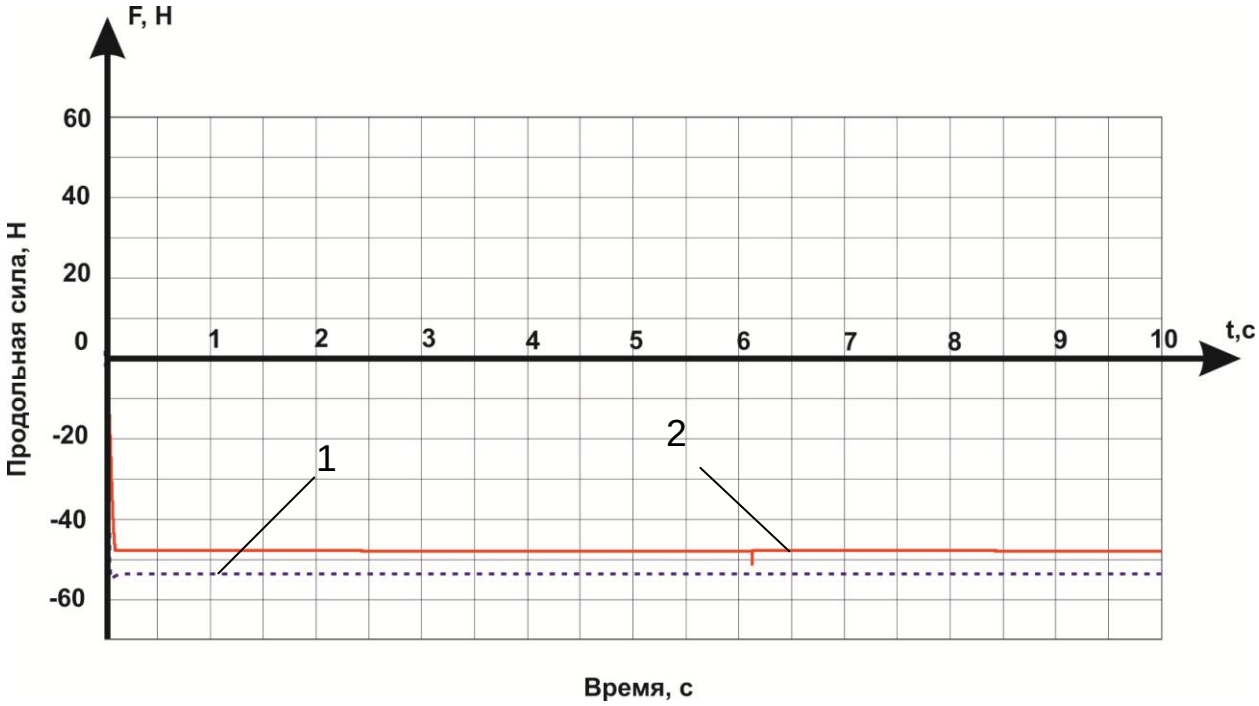


Рис. 5. Изменение значения продольной силы на левом колесе тележки:
1 – аналитическое решение; 2 – результат моделирования в LMS Virtual.Lab

Различие полученных результатов объясняется тем, что аналитическая модель не позволяет учесть все физические явления, которые имеют место при взаимодействии реального колеса транспортного средства с опорной поверхностью. Для создания данного взаимодействия в виртуальной среде пакета LMS Virtual.Lab была использована функция создания модели шины, характеризующейся следующими параметрами: вертикальная и угловая жесткости, коэффициент трения между шиной и дорожным покрытием, демпфирование.

Между шиной и дорожным покрытием образуются следующие силы: нормальная (направлена из точки контакта к оси вращения колеса), продольная (направлена по направлению движения из точки контакта) и поперечная (направлена из точки контакта, перпендикулярно продольной). Продольная и поперечная силы лежат в одной плоскости и являются функциями от нормальной силы.

Основной целью создания расчетной модели был поиск конкретных конструкторских решений по улучшению проходимости прототипа. В процессе разработки было рассмотрено две конфигурации шасси мобильного робота с последующей оценкой их эффективности.

Первоначальный вариант исполнения шасси робота включал в себя жесткую раму, по результатам виртуальных экспериментов было принято решение о признании этой конструкции непригодной к реализации, так как она не позволяла роботу преодолевать препятствия определенного характера (подъем по наклонной поверхности правых колес).

В качестве альтернативного варианта исполнения шасси было предложено использование шарнира в мосте задней рамы, обеспечивающего дополнительную степень свободы соответствующей повороту задней рамы относительно продольной оси. После анализа виртуальных экспериментов были сделаны выводы о существенном улучшении проходимости.

На графике можно наблюдать перемещение центра масс системы по направлению движения виртуальной модели (вдоль оси X).

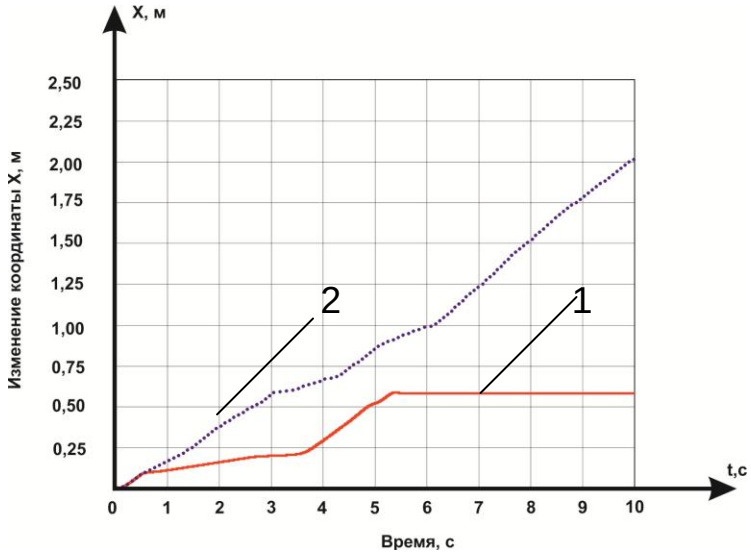


Рис. 6. Перемещение центра тяжести вдоль оси X (1 – движение шасси с жесткой рамой, 2 – движение шасси с шарниром в заднем мосте)

Результаты виртуальных ходовых испытаний показали, что предложенная конструкция шасси обладает существенно более высокой проходимостью при одинаковых режимах движения. Заметим, что этот вывод сделан по результатам ходовых испытаний расчетной трехмерное модели, без изготовления опытного образца, что позволило существенно сократить затраты и значительно снизить сроки разработки новой конструкции.

Библиографический список

1. Бурдаков, С.Ф. Системы управления движением колесных роботов / С.Ф. Бурдаков, И.В. Мирошник, Р.Э. Стельмаков. – СПб.: Наука, 2001. – 228 с.

2. Колесников, К.С. Курс теоретической механики / К.С. Колесников. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2005. – 736 с.

3. Неймарк, Ю.И. Динамика неголономных систем / Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – М.: Наука, 1967. – 521 с.

К содержанию

УДК 629.7.07

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ШУМА РЕАКТИВНОЙ СТРУИ НА КОРПУС ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

М.В. Бухмастов, Р.В. Сидельников

Рассмотрен вопрос оценки влияния шума реактивной струи на корпус головной части ракеты-носителя, методы моделирования, используемые в ANSYS Fluent, и отмечен рациональный метод моделирования для решения данной задачи.

Ключевые слова: шум, ракета, источник шума, реактивная струя, методы моделирования, аэроакустика, турбулентность.

Как известно [1], ракета во время старта и полета подвергается вредным акустическим воздействиям. Самым уязвимым элементом конструкции РН к акустическим воздействиям является головной аэродинамический обтекатель (ГАО), где размещается командно-измерительный комплекс. Проходящее внутрь акустическое излучение высокого уровня – 150…160 дБ – существенно влияет на бортовую аппаратуру и командно-навигационные приборы. Таким образом, чтобы оценить степень риска ухудшения паспортных характеристик и тактико-технических характеристик ракет в целом, необходимо изучение причин появления шумов, их структуры и природы упругого взаимодействия с механическими системами.

Одним из основных источников шума является реактивная струя (рис. 1). Установлено, что наибольшей величины акустические нагрузки от шума реактивной струи достигают на Земле и во время старта РН (рис. 2).

В последние годы задачи расчёта шума, создаваемого реактивными струями, становятся все более актуальными в связи с необходимостью снижения уровня шума в ракетостроении и авиации.

Вследствие сложности детального моделирования процессов генерации шума турбулентностью до недавнего времени для решения задач такого рода использовались методы, основанные на эмпирических корреляциях и теории подобия. К сожалению, такие методы оказываются практически неприменимыми вне изученного экспериментального диапазона изменения режимных и геометрических параметров, а, следовательно, и для оценки новых конструкций, предлагаемых для снижения шума. Положение изменилось в конце 90-х годов XX века, когда, благодаря развитию компьютерной техники и совершенствованию вычислительных алгоритмов, стали развиваться новые подходы, свободные от эмпиризма (основанные на «первых» принципах аэродинамики и аэроакустики [2]), в рамках которых для моделирования генерации

шума применяются так называемые «вихреразрешающие» методы моделирования турбулентности – прямое численное моделирование (DNS), метод моделирования крупных вихрей (LES) и гибридные RANS/LES методы (DES, и др.).

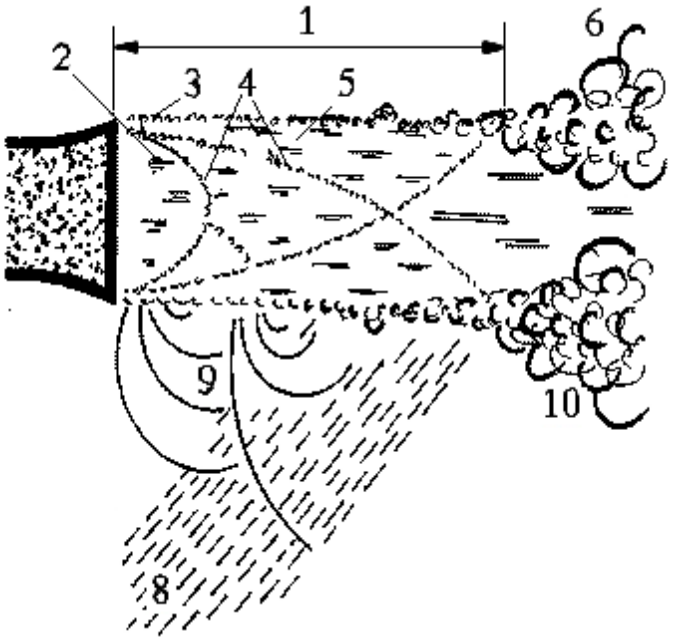


Рис. 1. Схематическое изображение потока (1–7) и звукового поля вблизи сопла ракеты (8–10). 1 – сверхзвуковая зона перемешивания, быстрое увеличение скорости потока, 2 – зона температурной неоднородности, вызванная горением и перемешиванием, 3 – медленно распространяющийся турбулентный пограничный слой со сдвигом, максимальный градиент скорости; 4 – ячеистая структура ударных волн; 5 – турбулентные вихри конвертирующие со сверхзвуковой скоростью; 6 – дозвуковая зона перемешивания, турбулентные вихри конвертируют с дозвуковой скоростью, интенсивная турбулентность, умеренные градиенты скорости; 7 – сопло двигателя ракеты; 8 – остронаправленные интенсивные волны Маха, излучаемые турбулентными вихрями, конвертирующими со сверхзвуковой скоростью; считается что это основной источник шума ракет; 9 – сферические звуковые волны, возникающие вследствие взаимодействия турбулентного потока с ударными волнами, этот шум не слишком интенсивен; 10 – звук, возникающий из-за интенсивной турбулентности зоны дозвукового течения, составляет максимальную часть общего излучения струи ракетного двигателя

Это привело к возникновению и бурному развитию нового направления в аэроакустике, получившего название вычислительной аэроакустики.

Для численного моделирования сверхзвуковой струи, дальнего и ближнего акустического поля было выбрано CFD приложение ANSYS Fluent. Данное приложение является одним из передовых инструментов в мире, для решения CFD задач.

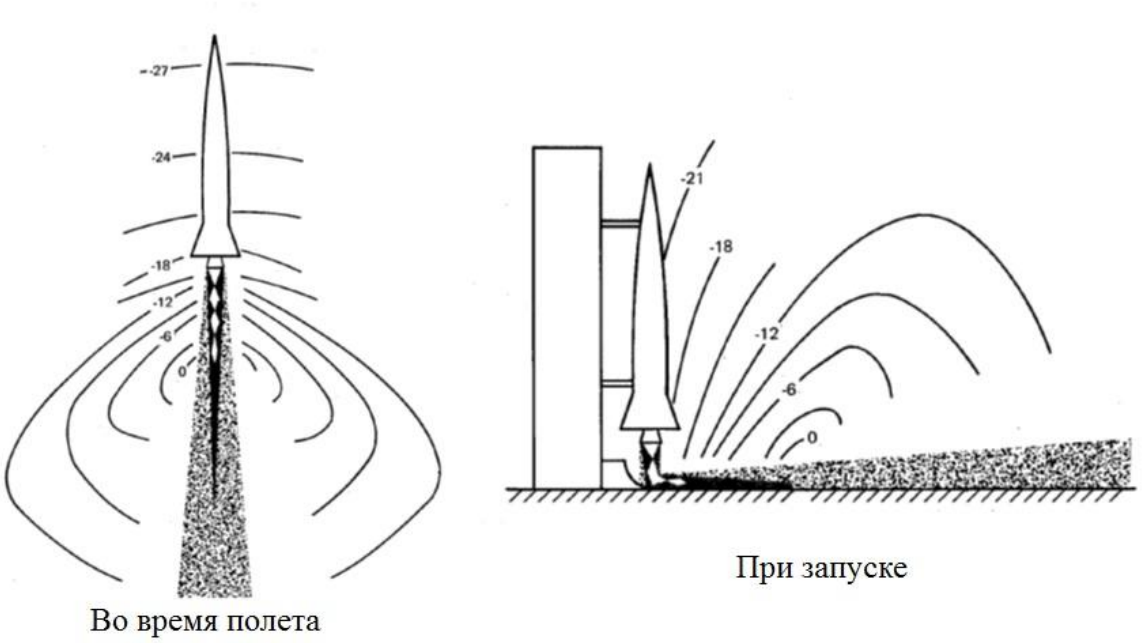


Рис. 2. Акустическое воздействие шума при запуске и во время полета ракеты

Из методов расчета шума во Fluent можно выделить эмпирические методы и методы, свободные от эмпиризма. Первые основаны на эмпирических корреляциях и теории подобия или на решении стационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) в сочетании со специальными эмпирическими моделями источников звука, например как модель шума реактивной струи (во Fluent – jet noise). Такие методы неприменимы вне изученного диапазона изменения режимных и геометрических параметров. Но вполне подходят для качественной оценки источника шума. В отличие от прямого и интегрального FW-H методов вычисления, модели источников широкополосного шума не требуют нестационарных решений для основных уравнений жидкости и газа. Все модели источников запрашивают обычные RANS модели, такие как область средней скорости, турбулентная кинетическая энергия и скорость диссипации. По этой причине использование моделей источников широкополосного шума требует минимальных расчетных ресурсов.

Второй подход базируется на «вихреразрешающих» методах моделирования турбулентности – прямом численном моделировании (DNS), методе моделирования крупных вихрей (LES) и гибридных RANS/LES методах.

Вихреразрешающие методы расчета шума можно разделить на две категории: прямое моделирование и интегральные методы.

Прямое моделирование заключается в совместном расчёте генерации звука турбулентными структурами и распространения звуковых волн за пределы турбулентной области вплоть до положения наблюдателя в рамках единой системы газодинамических уравнений.

Интегральные методы расчета шума – это двухэтапные методы, основанные на раздельном расчёте генерации шума и его распространения. В соответствии с этим на первом этапе производится гидродинамический расчёт, в процессе которого информация о нестационарных характеристиках потока сохраняется на так называемых контрольных поверхностях. На втором этапе с использованием этой информации производится расчёт распространения звука до положения наблюдателя с помощью соответствующих интегральных формул.

Наиболее существенно преимущество интегральных методов при расчете акустических характеристик на больших расстояниях от источника шума. Действительно, в рамках прямого моделирования, приходится использовать большие расчетные области, тем не менее, сетки должны оставаться достаточно подробными для разрешения акустических волн вплоть до положения наблюдателя. Это влечет за собой огромные вычислительные затраты, которые можно существенно сократить при использовании интегральных методов.

Наиболее известными интегральными методами являются метод Кирхгофа и метод Фокса Вильямса-Хокингса (Ffowcs Williams & Hawkings, ФВХ). Следует отметить, что последний метод обладает рядом существенных преимуществ с вычислительной точки зрения. Контрольная поверхность в данном методе может располагаться в непосредственной близости к границам зоны турбулентности потока, что позволяет ограничить зону мелкой сетки, необходимой для разрешения широкого спектра турбулентности и генерируемых ею звуковых волн, непосредственно турбулентной областью. По этой причине метод ФВХ становится все более популярным и реализован во многих расчетных кодах.

Все рассмотренные методы обладают как плюсами, так и минусами (рис. 3), для задачи оценки влияния шума реактивной струи на корпус головной части ракеты-носителя более подходит метод ФВХ.

Рис. 3. Выбор оптимального метода для решения задачи

В настоящее время большинство промышленных задач, в том числе и акустических, решается с использованием коммерческих кодов общего назначения). Одним из наиболее известных и широко используемых кодов является ANSYS FLUENT, в котором реализован метод ФВХ. Несмотря на большой ряд работ, где расчет проводится с использованием этого пакета, до сих пор не существует базы данных, в которых систематически бы были протестированы и продемонстрированы возможности данного кода применительно к задачам вычислительной аэроакустики. Обсуждения тестирования предполагаются в следующей работе.

Библиографический список

1. Карачун, В.В. Основные причины шума ракет носителей / В.В. Карачун, В.Н. Мельник // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9(45). – 11 с.

2. Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically: I. General theory. Proceedings of Royal Society. Vol. A211, 1952, pp. 564–587.

К содержанию

УДК533.6.011.32

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ БОКОВЫХ СИЛ

А.А. Сергеева, Р.В. Сидельников

Настоящая работа рассматривает решение нестационарного поперечного обтекания цилиндра с моделированием явления периодического отрыва вихрей, именуемого вихревой дорожкой Кармана. Кроме того, проводится исследование влияния дорожки Кармана на соотношение боковой (подъёмной) силы и силы сопротивления в зависимости от числа Рейнольдса. Получены предварительные результаты в виде графика зависимости от указанного соотношения (а если быть более точным, то от коэффициентов этих сил).

Ключевые слова: асимметричная вихревая система; вихревая дорожка Кармана; боковая сила.

Современная вычислительная техника и численные методы позволяют в настоящее время тщательно и точно моделировать любой нестационарный физический процесс. Однако интерес вызывает не столько само явление, сколько то, при каких обстоятельствах оно возникает, т.е. зависимость возникновения явления от определяющих параметров задачи, таких как числа Маха, Рейнольдса и т.д.

Принципиальной особенностью течений жидкости и газа является то, что математическая размерность решения прогнозируемого процесса не всегда соответствует размерности (числу переменных) учтённых исходных данных. Примером являются нестационарные проявления при стационарных исходных данных (дорожка Кармана за неподвижным препятствием, явление турбулентности и др.). С математической точки зрения здесь есть проблема корректности постановки задачи, а также проблема единственности решения поставленной задачи. Ещё более сложным, можно считать случай, в котором эволюционный процесс проходит несколько достаточно устойчивых стадий: симметричное течение, нарушение симметрии, периодическое течение, нерегулярное нестационарное течение, хаотическое течение. Получение характеристик такого течения в конкретный момент времени (экспериментально или расчётными методами) вообще-то возможно, но данные мгновенные характеристики не будут отражать всех особенностей процесса течения.

Образование в следе за поперечно обтекаемым цилиндром вихревой системы приводит к возникновению нестационарной составляющей подъёмной силы. Т. Карман математически показал, что при докритических значений числа Рейнольдса устойчивой является одна схема течения с вихрями. Это хорошо известная дорожка Кармана – явление возникновения периодических вихрей, отрывающихся от поверхности обтекаемого тела вследствие действия трения в приграничном слое и градиента давления, образующегося при этом. Асимметричный характер вихревой системы способствует созданию боковой (подъёмной) силы, соизмеримой с силой сопротивления.

При расчётах аэродинамических характеристик ракет для определения нормальной силы на осесимметричных телах довольно часто используется аналогия для поперечной компоненты течения. Иными словами применяется существование аналогии между нормальной к оси вращения компонентой течения и двумерным потоком около цилиндра с осью, нормальной к плоскости течения, причём характеристики набегающего потока эквивалентны характеристикам поперечного потока вокруг тела, расположенного под углом атаки.

В настоящей работе рассмотрена задача поперечного обтекания цилиндра с получением картины периодического отрывного течения, упомянутой выше вихревой дорожки Кармана для исследования её влияния на соотношение боковой силы и силы сопротивления. Целью данного исследования является последующая разработка учебного пособия по исследованию соотношения боковой силы и силы сопротивления в зависимости от чисел Маха, Рейнольдса и Струхаля.

Значительные боковые силы возникают только при дозвуковых скоростях поперечного течения. Из этих соображений, моделирование нестационарного поперечного обтекания цилиндра производилось потоком воздуха с постоян-

ными свойствами, принятыми при 15 °С (288,16 К), в дозвуковом диапазоне чисел Маха. Геометрические размеры расчётной области указаны на рисунке 1 и представляют собой 30 диаметров обтекаемого тела по длине и 17 диаметров по ширине области.

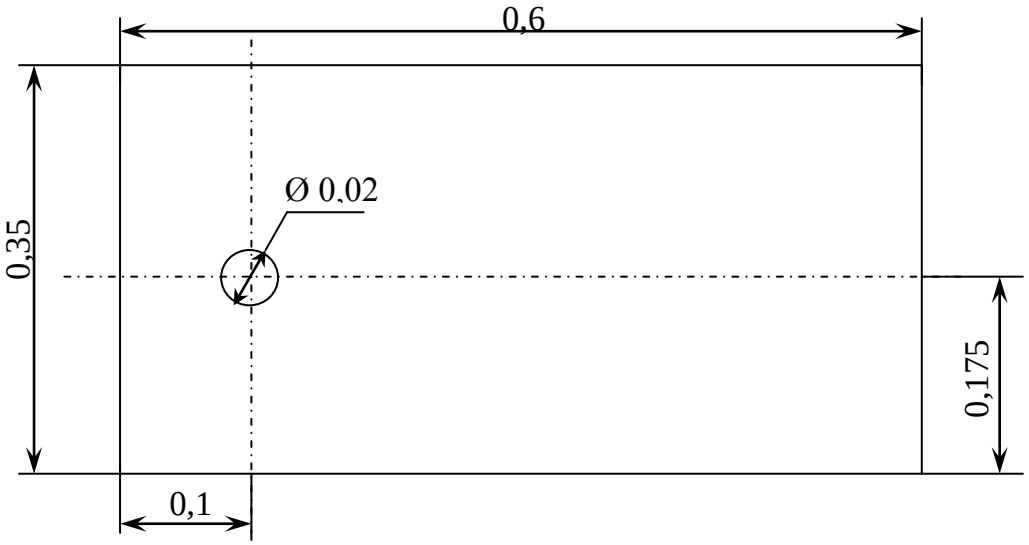


Рис. 1. Геометрические характеристики расчётной области, м

Решение любой инженерной задачи, связанной с расчётом какого-либо процесса в общем случае состоит из следующих основных компонентов:

1) постановка задачи;

2) построение геометрии расчётной области;

3) построение расчётной сетки;

4) создание расчётной модели (описание условий расчёта, приложение начальных и граничных условий);

5) проведение расчёта;

6) анализ и оценка результатов.

Для решения поставленной выше задачи определение начальных и граничных условий, а также выбор уравнений, которые будут описывать исследуемый процесс, и методов их решения, производилось в программном блоке *ANSYS Fluent*. Программа считает силы, действующие на тело автоматически. Моделирование происходит по времени. Необходимо корректно задавать исходные данные, в которые входит сетка, параметры решателя, параметры объекта, параметры перестроения сетки, окружающей среды.

В настоящем расчёте использовалась структурированная блочная сетка с четырехугольной ячейкой. Причиной послужил тот факт, что большим удобством таких структурированных сеток является способ хранения и адресации данных, ассоциированных с ячейками – многомерные массивы. Это оз-

начает, что использование структурированных сеток (по сравнению с неструктурированными) позволяет, как правило, уменьшить продолжительность расчёта и необходимый объём оперативной памяти компьютера [5].

Общий вид расчётной сетки можно увидеть на рисунке 2.

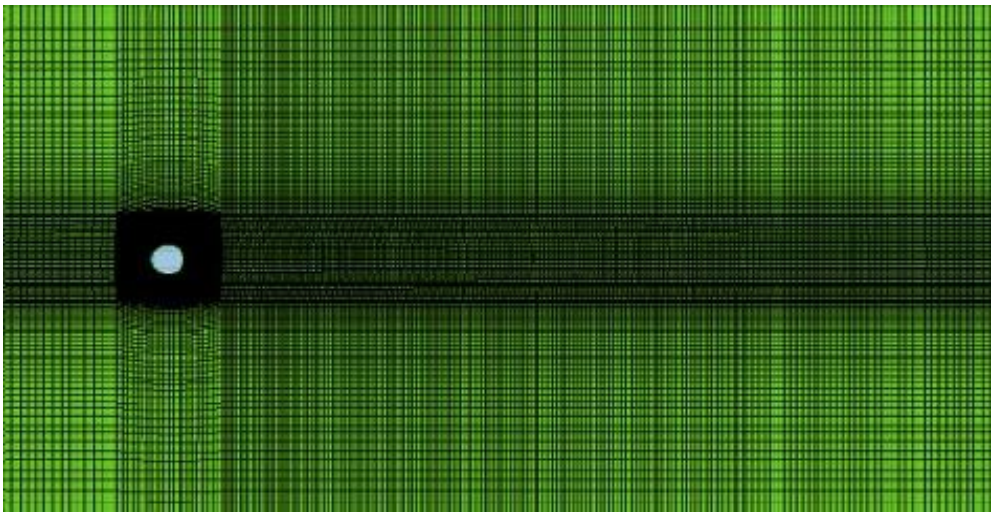


Рис. 2. Общий вид предварительной сетки

Хорошо заметно, что наиболее густая сетка построена вокруг поверхности сферы и сразу за ней, так как сетка должна иметь сгущение в тех областях, где возможно появление больших градиентов искомых функций (т.е. в нашем случае возникают и отрываются вихри).

Выбор модели турбулентности также оказывает существенное влияние на корректность получаемых в ходе моделирования результатов. Для настоящего расчёта была выбрана модель турбулентности *k*-ω *SST*, так как хорошо описывает пристеночные течения и даёт очень точное описание поведения потока (например, отрывы потока от поверхности тела и их периодичность). Это связано с тем, что *k*-ω *SST* является комбинацией моделей *k*-ω Вилкокса и *k*-ε, причём для пристеночного слоя используется *k*-ω, а для внешнего региона *k*-ε. Модель широко используется в инженерной практике и входит во многие пакеты вычислительной гидрогазодинамики.

Анализ полученных результатов работы показал, что максимальное значение соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления ($C_{lp}/C_d \approx 2{,}8$) для случая двумерного обтекания бесконечного цилиндра реализуется в области критических значений числа Рейнольдса Re_d (рис. 3), так как именно здесь достигают максимума среднеквадратичное значение подъёмной силы и отношение максимального значения подъёмной силы к среднеквадратичному, а аэродинамическое сопротивление минимально.

Максимальное стационарное значение C_{lp}/C_d реализуется тогда, когда на одной стороне цилиндра имеет место докритический отрыв потока, а на другой критический.

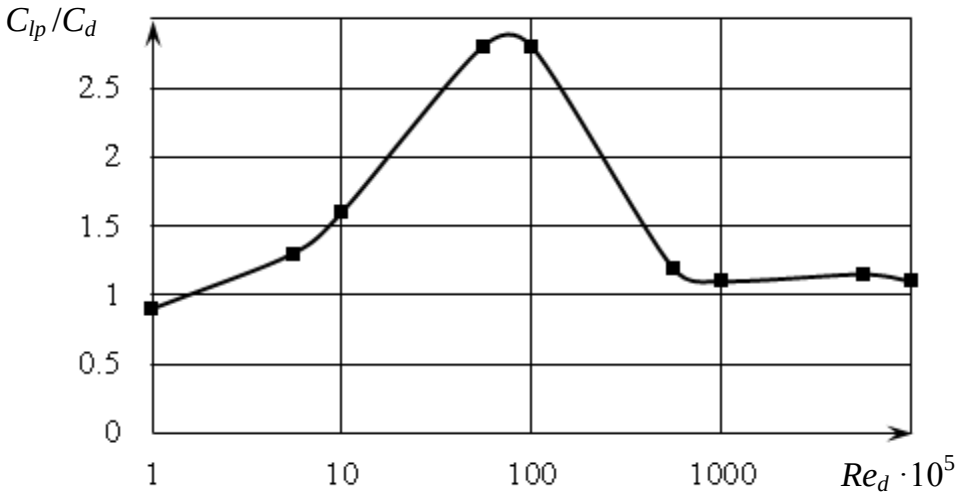


Рис. 3. Зависимость значений соотношения коэффициентов боковой силы и силы сопротивления от числа Рейнольдса

Таким образом, можно говорить о том, что величина боковой силы чувствительна к значению числа Рейнольдса. Кроме того, установлено, что в критическом диапазоне чисел Рейнольдса находится максимальное значение C_{lp}/C_d.

Помимо влияния числа Рейнольдса на соотношение боковой силы и силы сопротивления, интерес также представляет зависимость указанного соотношения от чисел Маха и Струхаля. В настоящее время получены некоторые результаты, публикация которых предполагается в следующей работе, где и будут рассмотрены вопросы влияния этих параметров, а кроме того и влияние конечности длины цилиндра, на соотношение C_{lp}/C_d.

Библиографический список

1. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 124 с.

2. Годунов, С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики / С.К. Годунов. – М.: Наука, 1976. – 400 с.

3. Лапин, Ю.В. Внутренние течения газовых смесей / Ю.В. Лапин, М.Х. Стрелец. – М.: Наука, 1989. – 368 с.

4. Липницкий, Ю.М. Нестационарная аэродинамика баллистического полета / Ю.М. Липницкий, А.В. Красильников, А.Н. Покровский, В.Н. Шманенков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.

5. Молчанов, А.М. Построение сеток в задачах авиационной и космической техники / А.М. Молчанов, М.А. Щербаков, Д.С. Янышев и др. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2013. – 260 с.

К содержанию

УДК 620.115.85

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБРАЗЦОВ С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ КОНСОЛЬНОМ ИЗГИБЕ

А.В. Ерпалов, С.В. Махнович, Л.А. Шефер, П.Н. Усков

Выбраны рациональные размеры образцов с концентраторами напряжений листового алюминиевого сплава для усталостных испытаний при консольном изгибе. Показано, что изменяя ширину образца, с соблюдением рекомендаций ГОСТ 25.502-79, можно добиться такого соотношения этой ширины и ширины шейки, при котором разрушение будет гарантировано в области концентратора напряжения.

Ключевые слова: усталостные испытания; консольный изгиб; размеры образцов.

По рекомендациям ГОСТа 25.502-79 [1] для усталостных испытаний материалов при консольном изгибе выбираются образцы III, IV или VII типа, форма которых показана на рис. 1.

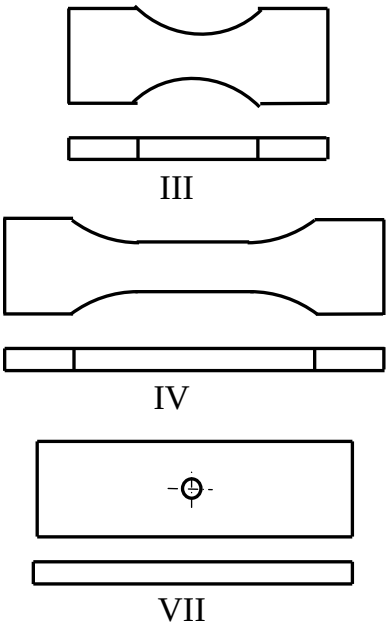


Рис. 1. Типы образцов по ГОСТ 25.502-79

Чаще всего в качестве металлических образцов без концентраторов напряжений используют плоские образцы с галтелью III типа. Галтели локализуют зону, в которой будет наиболее вероятным разрушение образца.

Однако расчеты показывают, что выбор образцов такой формы даже с размерами, назначенными в пределах и соответствиях, рекомендуемых ГОСТом, еще не гарантирует, что максимальное напряжение и разрушение при консольном изгибе будут развиваться именно в сечении с наименьшей площадью поперечного сечения, в середине галтели.

Для примера сравним напряжения для образцов с разной шириной H, геометрические размеры которых приведены в таб. 1. Размеры выбирались согласно рекомендуемым соотношениям ГОСТа 25.502-79. Материал образцов – сплав АМг6 с пределом прочности $\sigma_в$ = 430 МПа.

Таблица 1

Геометрические размеры образцов без концентратора напряжения, мм

Номер образца	h	b	R	H	l
1	2	20	40	40	52,92
2	2	20	40	45	58,09
3	2	20	40	50	62,45
4	2	20	40	55	66,14
5	2	20	40	60	69,28
6	2	20	40	65	71,94

Параметры напряженно-деформированного состояния образцов определялись с помощью конечно-элементного пакета *ANSYS*. Расчетная модель образца ограничена краями захватов, как показано на рисунке 2. Модель сформирована из четырехузловых плоских элементов *SHELL*63 с 6 степенями свободы в каждом узле. Модель включает 2684 элемента. Одна сторона образца по краю захвата закреплена от всех смещений и поворотов, а на другой – задается поперечное перемещение по оси z, при котором развивается напряжение 300 МПа, выбранное как σ_{max} = 0,7 $\sigma_в$. Продольное перемещение узлов этого края образца вдоль оси x и повороты относительно оси y остаются свободными, а линейное смещение по оси y, а так же повороты относительно осей z и x запрещены. Таким образом, моделируется жесткое нагружение образца при консольном изгибе. Поперечное смещение свободного края образцов 1, 2, 3, 4, 5 и 6 составило соответственно 4,41; 5,31; 6,28; 7,22; 7,58 и 8,09 мм.

На рис. 3 показаны изолинии расчетных значений осевого напряжения σ_x на симметричной половине 1, 3 и 5 образцов. Максимальное напряжение на поверхности первого и второго образца развивается в средней части заделки. В третьем образце напряжения в заделке и в зоне среднего сечения галтели одинаковы. В четвертом, пятом и шестом образцах максимальное напряжение развивается в зоне среднего сечения галтели, а в заделке оно ниже. Для пятого образца это снижение напряжения составляет 19 %.

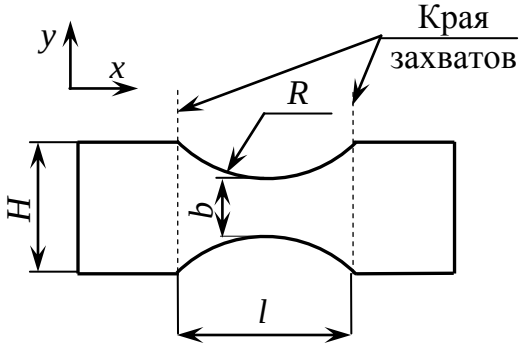
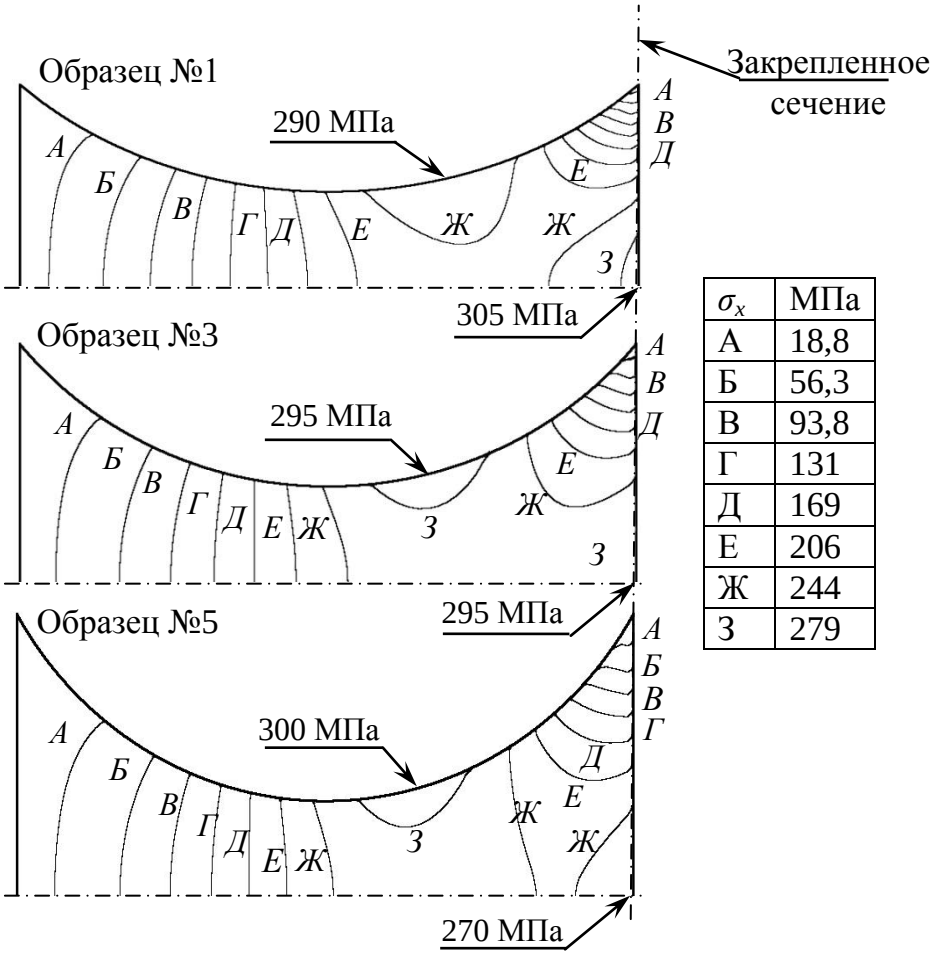


Рис. 2. Основные размеры образца при консольном изгибе

На рис. 4 показано изменение растягивающего напряжения σ_x по ширине образца в двух характерных сечениях, на краю (2) и в области галтели (1). Напряжения по ширине галтели изменяются незначительно, не более 10 %. Вследствие неравномерного распределения напряжений по ширине образца, поперечное перемещение точек вдоль оси *z* по ширине будет так же неравномерным. На рис. 5 показана форма изгиба средней линии сечения шейки галтели образца. Как видно при перемещении середины сечения шейки на 0,17 мм края этого сечения смещаются относительно его середины на 0,008 мм.



σ_x	МПа
А	18,8
Б	56,3
В	93,8
Г	131
Д	169
Е	206
Ж	244
З	279

Рис. 3. Изолинии осевого напряжения σ_x на поверхности образцов

При усталостных испытаниях наиболее вероятной зоной разрушения образца можно считать зону наибольших растягивающих напряжений. С этой точки зрения целесообразно для испытаний выбирать образцы с размерами № 4, 5 и 6, у которых наибольшее растягивающее напряжение развивается именно в средней части галтели.

Для проверки этого вывода выполнены усталостные испытания образцов, изготовленных из сплава АМг6 с рассмотренными размерами. Нагружение образцов осуществлялось на электродинамическом вибростенде *LDS V*780, схема установки показана на рис. 6. Образцы закреплялись в приспособлениях для усталостных испытаний при консольном изгибе, показанных на рис. 7. С помощью системы управления вибростенда с обратной связью постоянно поддерживалось заданное гармоническое перемещение на вибростоле с амплитудой 4,41; 5,31; 6,28; 7,22; 7,58 и 8,09 мм для 1, 2, 3, 4, 5 и 6 образцов соответственно. Значения этих перемещений были получены при расчете напряженно-деформированного состояния каждого типоразмера образцов при максимальном уровне напряжения 300 МПа.

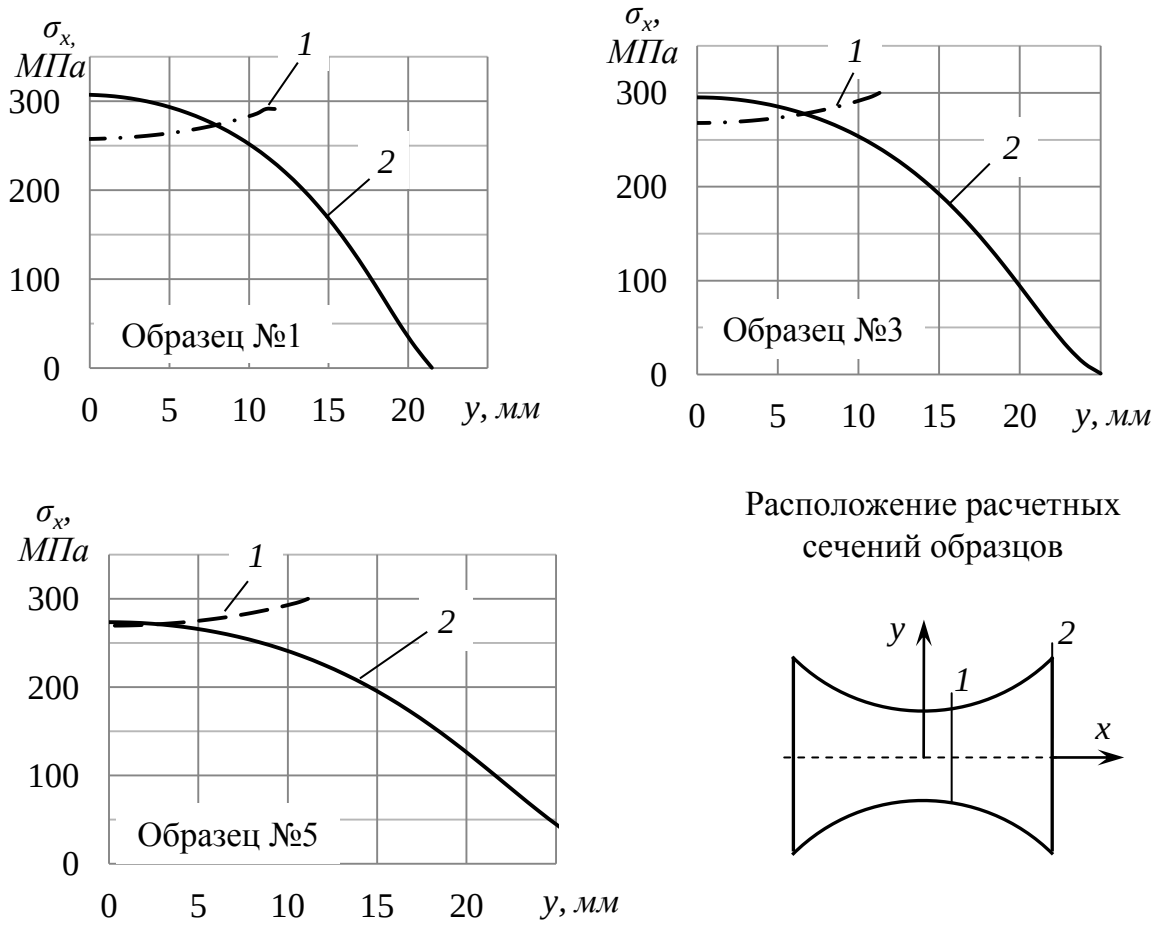


Рис. 4. Распределение растягивающих напряжений σ_x по ширине образца:
1 – в шейке галтели; 2 – в заделке

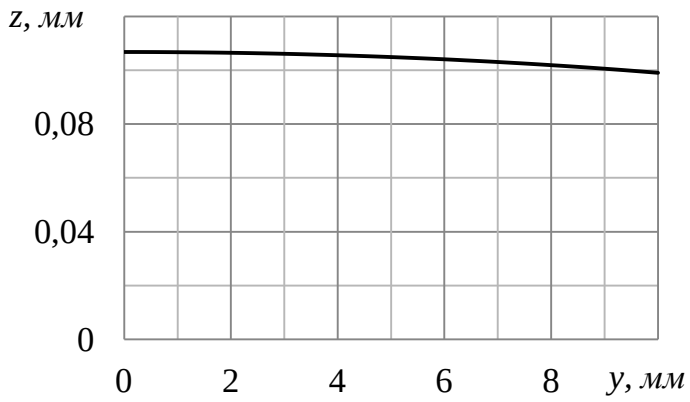


Рис. 5. Изгиб среднего сечения шейки
в поперечном направлении для образца № 5

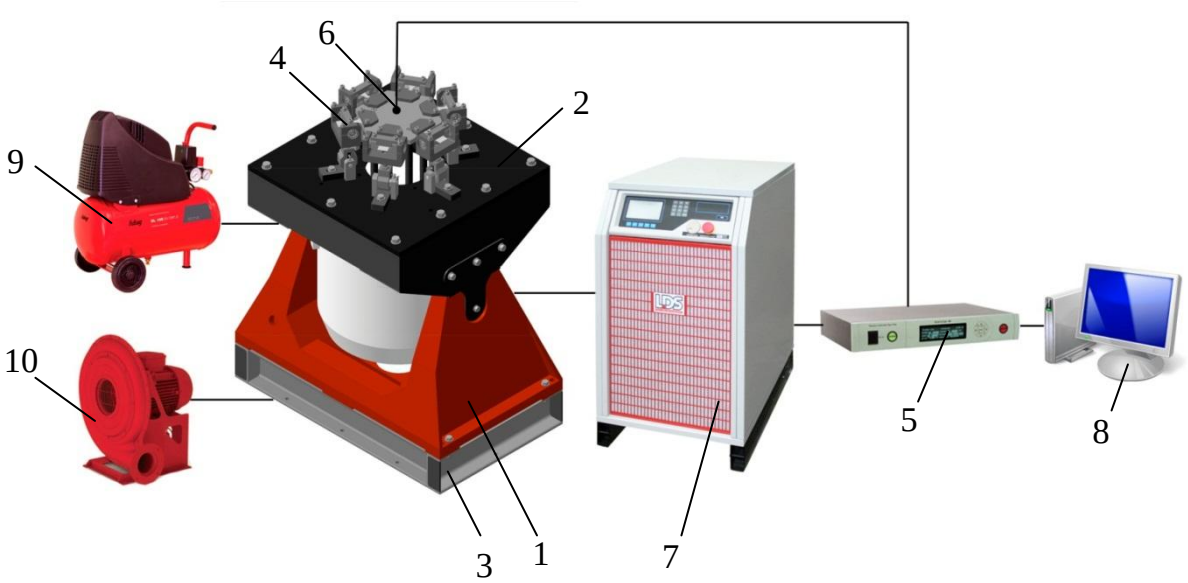


Рис. 6. Схема стенда для усталостных испытаний материалов
на усталостную долговечность при консольном изгибе:
1 – вибростенд *LDS V*780; 2 – переходная рама; 3 – платформа;
4 – нагружающие приспособления; 5 – система управления;
6 – акселерометр; 7 – усилитель; 8 – ПК; 9 – компрессор;
10 – система охлаждения

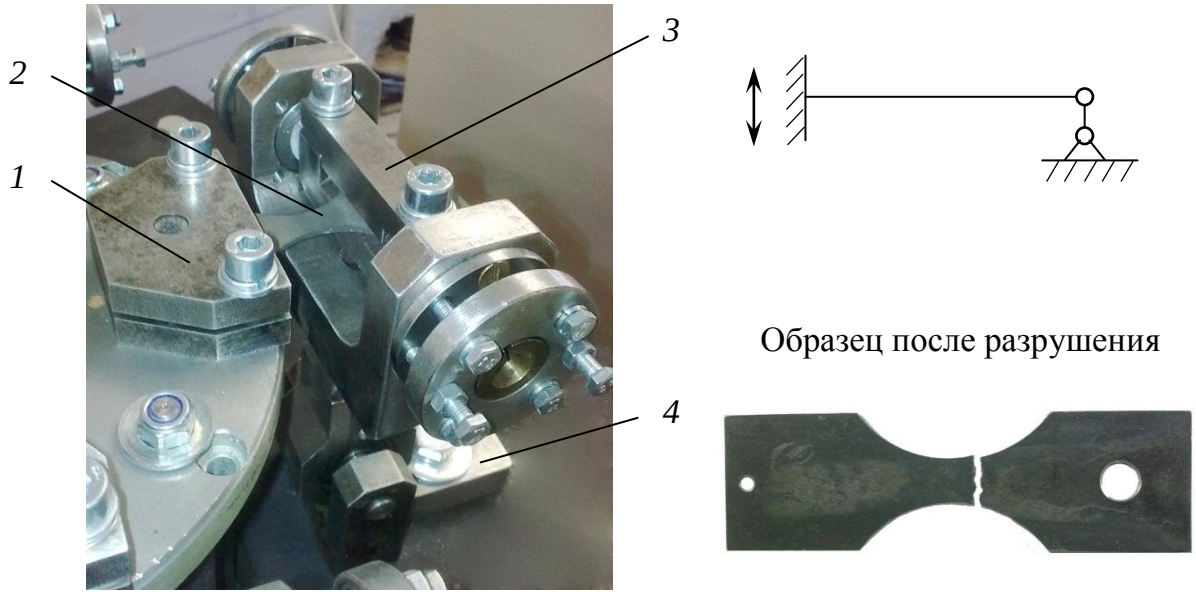


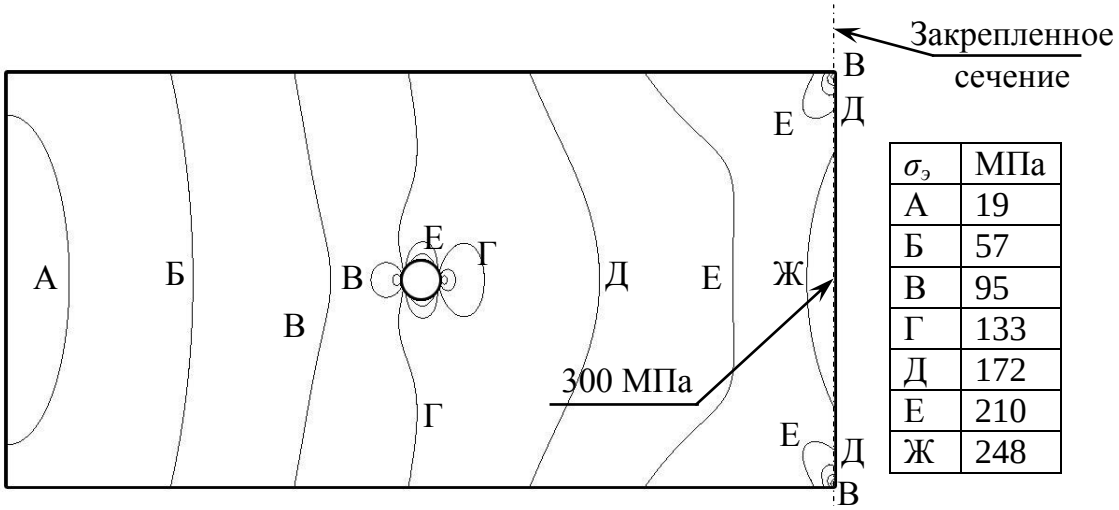
Рис. 7. Конструкция и схема приспособления для консольного изгиба:
1 – жесткий зажим на подвижном вибростоле; 2 – образец;
3 – шарнирный зажим; 4 – неподвижное основание

При испытаниях разрушение образцов произошло в прогнозируемых местах: образцы № 1, 2 и 3 разрушились в заделке, образцы № 4, 5 и 6 – в среднем сечении. На рис. 7 показан вид образца № 5 после усталостных испытаний. Долговечность этого образца составила 7200 циклов.

Таким образом, при выборе рациональных геометрических параметров образцов без концентраторов напряжений для усталостных испытаний при консольном изгибе необходимо учитывать влияние ширины образца H на его НДС. Для рассмотренного случая можно рекомендовать при выборе соотношения ширины образца H и ширины галтели b, выдерживать условие $H/b > 2{,}5$.

Для образцов с концентратором напряжений ГОСТом предусмотрен VII тип. Однако при консольном изгибе наличие отверстия на образце с постоянной шириной не гарантирует разрушение в зоне этого концентратора напряжений.

Для примера рассмотрим напряженно-деформированное состояние такого образца с толщиной $h = 2$ мм и длиной $L = 40$ мм. Для этой толщины, согласно рекомендациям ГОСТа, ширина образца $H = 20$ мм, а диаметр отверстия $d = 2$ мм. Расчетная модель образца ограничена краями захватов и сформирована из четырехузловых плоских элементов *SHELL*63 с 6 степенями свободы в каждом узле. Модель включает 24560 элементов. Возле отверстия сетка сгущена – по его окружности задано 200 узлов. Граничные условия задавались такими же, как и в расчетной модели образцов без концентратора напряжений.



$\sigma_э$	МПа
А	19
Б	57
В	95
Г	133
Д	172
Е	210
Ж	248

Рис. 8. Изолинии эквивалентных напряжений $\sigma_э$ в образце с концентратором напряжения

На рисунке 8 показаны изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу. Максимальное растягивающее напряжение на поверхности образца действует в средней части заделки. Чтобы избежать этого, можно рекомендовать комбинировать образцы IV и VII типов, как показано на рисунке 9. Для выбранной толщины h образца, по рекомендациям ГОСТа определяются радиусы галтелей R и ширина шейки b, как для IV типа образцов. В зависимости от выбранной ширины шейки b выбирается диаметр отверстия d по рекомендациям ГОСТа для VII типа образцов.

В таблице 2 приведены размеры образцов, выбранные в соответствии с этими рекомендациями. Материал образцов – сплав АМг6 с пределом прочности $\sigma_в$ = 430 МПа.

Таблица 2

Геометрические размеры образцов с концентратором напряжения, мм

Номер образца	h	b	R	H	l	d
1	2	20	40	25	35,73	2
2	2	20	40	30	35,73	2
3	2	20	40	40	35,73	2
4	2	20	40	60	35,73	2

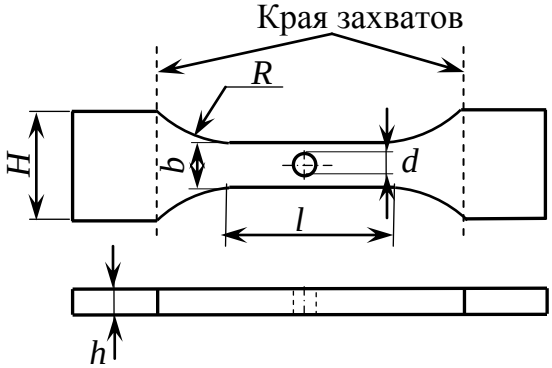
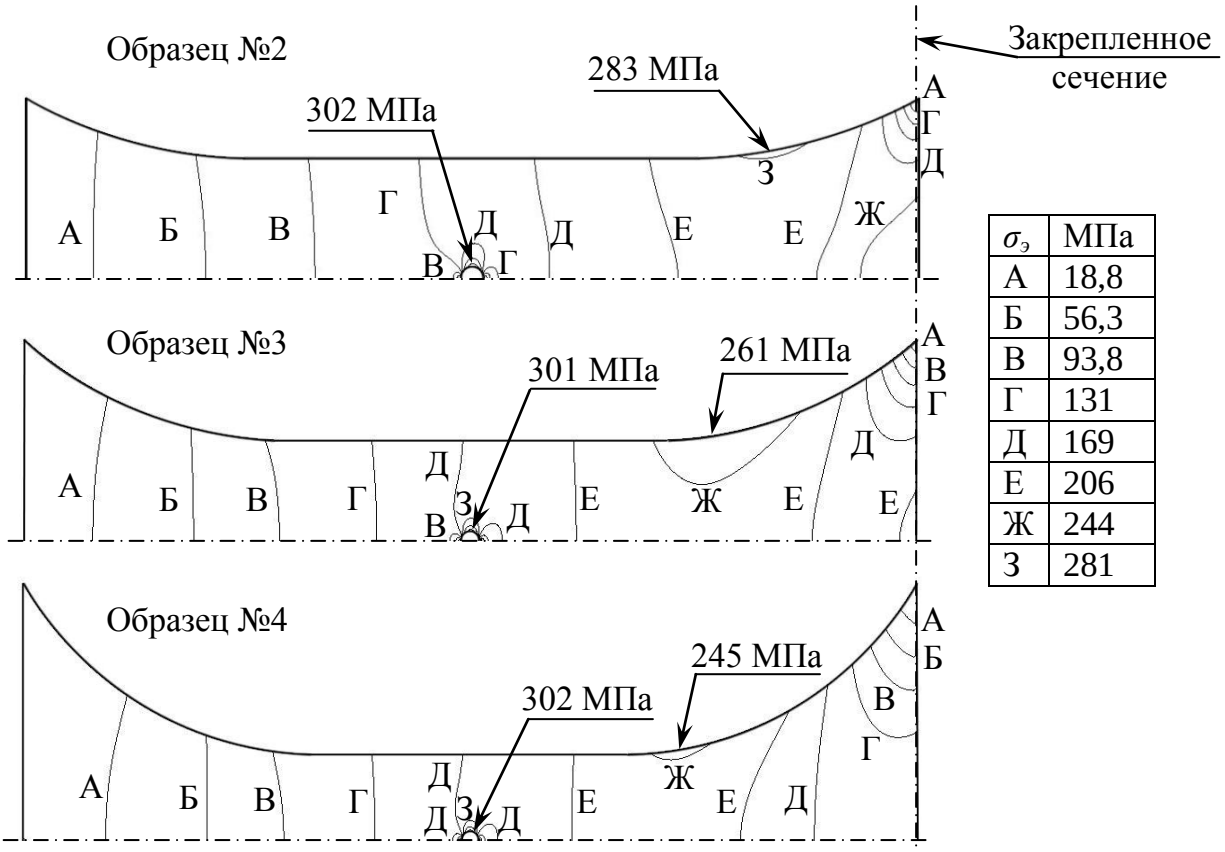


Рис. 9. Образец с концентратором напряжений

На рис. 10 показаны изолинии эквивалентных напряжений по Мизесу для образцов № 2, 3 и 4 и отмечены точки наибольших напряжений на контуре отверстия и вне его на образце. Из рисунка видно, что максимальное напряжение на поверхности всех трех образцов сосредоточено в зоне отверстия. Разница напряжений в местах концентрации напряжений – на контуре отверстия и галтели составляет 6 %, 13 % и 19 % для второго, третьего и четвертого образцов соответственно. Для первого же образца напряжения на контуре отверстия и галтели практически одинаковы и равны 265 и 260 МПа соответственно, а максимальное напряжение сконцентрировано в средней зоне заделки. Таким образом, можно предположить о поломке первого образца в зоне заделки. Для рассмотренного случая можно рекомендовать выбирать геометрические размеры образцов с учетом соотношения $H/b \geq 2$.



$\sigma_э$	МПа
А	18,8
Б	56,3
В	93,8
Г	131
Д	169
Е	206
Ж	244
З	281

Рис. 10. Изолинии эквивалентных напряжений в образцах
с концентратором напряжения

Для проверки сделанных выводов проведены усталостные испытания образцов с указанными размерами. Образец № 1, как и предполагалось, разрушился в зоне заделки. Образцы № 2, 3 и 4 разрушились в области концентратора напряжений.

Таким образом, при выборе геометрических параметров образцов для усталостных испытаний при консольном изгибе необходимо учитывать влияние ширины образца H на его НДС. Для рассмотренного случая можно рекомендовать при выборе соотношения ширины образца H и ширины шейки b, для образцов без концентратора напряжений выдерживать условие $H/b > 2{,}5$, а для образцов с концентратором напряжений – $H/b \geq 2$.

Библиографический список

1. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость: Государственный стандарт ГОСТ 25.502-79.

К содержанию

УДК 662.62(075.8)

ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ НА КОНСТРУКЦИИ СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ

Ю.Н. Тепляков

Проведенные исследования показали, что взаимодействие струи продуктов сгорания со стальными конструкциями является газовой коррозией металла. Установлены контролирующие стадии и энергии активации, а также, кинетическое уравнение процесса, позволяющее прогнозировать поведение металла в окислительных средах при высоких температурах и позволяющее определять ресурс работы элементов конструкции.

Ключевые слова: сверхзвуковая струя, окисление, кинетика, продукты сгорания, оксиды.

Продукты сгорания углеводородных и других топлив содержат химически высокоактивные вещества, такие как пары воды, моно- и диоксид углерода, а иногда и кислород, которые, воздействуя на стальные конструкции стартовых комплексов, вызывают их разрушение.

Знание закономерностей взаимодействия газовой струи с металлическими конструкциями позволяет определить кинематические уравнения химических реакций, что, в свою очередь, позволяет обоснованно подходить к выбору материалов и определять ресурс работы таких устройств как газоотражатели, газоотводные каналы и т.д.

Исследования проводились на лабораторном воздушно-реактивном прямоточном двигателе. Компоненты топлива: автомобильный бензин АИ-92 и воздух. Воздух в двигатель подавался компрессором, горючее подавалось с помощью газовытеснительной системы. Расход воздуха и горючего регулировался дроссельными вентилями. Двигатель позволял получать сверхзвуковую струю продуктов сгорания длиной 350 мм и диаметром 40 мм. Коэффициент избытка окислителя α изменялся в пределах от 0,3 до 1,4. Температура газов на срезе сопла T_a = 1650 °С, скорость истечения W_a = 1300 м/с при α = 1.

Исследовались образцы углеродистой стали, содержащей 0,19 % углерода, прямоугольной формы, размерами 3 х 20 х 50 мм^3. Образцы предварительно полировались и обезжиривались. На аналитических весах типа ВЛР–200 определялась масса образцов до и после испытаний. В результате воздействия газовой струи на образец, на его поверхности образовывалась окалина, и масса образца увеличивалась (за счёт присоединения кислорода). По полученным данным строились кинетические зависимости в координатах $\Delta m/S = f(\tau)$, где $\Delta m/S$ – увеличение массы образца на единицу поверхности, τ – время экспозиции образца в окислительной струе. Также исследовался фазовый состав оксидных слоёв, образовавшихся в результате окисления железа. Для этой цели использовался рентгеновский дифрактометр Дрон-3. По полученным данным определялись константы окисления и энергии активации процесса.

Исследуемый образец погружался в струю продуктов сгорания перпендикулярно или параллельно её оси и выдерживался в течении некоторого времени. После экспозиции образец взвешивался и подвергался рентгенофазовому анализу. Температура образца регулировалась расстоянием от среза сопла. В результате взаимодействия газовой струи и поверхности образца, на последнем формировалось оксидное пятно серого цвета. Так при температуре образца 900 °С, времени экспозиции 1 мин и α = 1,0 образовалась оксидная плёнка средней толщиной 7 мкм. По своей структуре плёнка оказалась трёхслойной. Рентгено-фазовый анализ показал, что ближайший к металлу слой состоит из вюстита (FeO), средний – из магнетита (Fe_3O_4), и третий слой, самый тонкий, состоит из гематита (Fe_2O_3). Количественное соотношение оксидов 95 : 4 : 1. Присутствие этих оксидов железа, характер их расположения и количественное соотношение указывает на то, что взаимодействие газовой кислородсодержащей струи и металла является газовой коррозией.

Изменение коэффициента избытка окислителя α ведет к изменению характера окисления. Установлено, что при α ‹ 0,5 окисление стали практически не наблюдается даже при значительных выдержках. Это связано с тем, что горение топлива при α ‹ 0,5 протекает с недостатком кислорода, при этом газовая фаза приобретает восстановительный характер, о чём свидетельствует появление сажи в продуктах сгорания, а также значительное снижение температуры газов.

При горении с α ‹ 1, слой гематита исчезает, что связано с уменьшением парциального давления кислорода. Рост значения α вызывает увеличение скорости окисления, что связано с увеличением температуры потока, а также с увеличением концентрации CO_2 и H_2O. Также установлено, что скорость газового потока не влияет на скорость окисления стали, что подтверждается результатами, приведёнными в работе [1].

Приведенные данные носят качественный характер, так как трудно выявить влияние на окисление какого-либо одного фактора, например, температуры, который определяет и фазовый состав оксида и скорость его образования. Для детальных исследований механизма окисления необходимы стационарные условия. Это было реализовано окислением образцов в печи, в изотермическом режиме, в потоке нагретого водяного пара. Скорость движения пара составляла 5 м/с. В качестве активной среды водяной пар был выбран потому, что из всех компонентов продуктов сгорания химическая активность пара максимальна и примерно в два раза выше, чем у кислорода, поэтому наибольший вклад в процесс окисления даёт пар.

Исследование кинетики окисления образцов проводилось на установке, включающей источник водяного пара (автоклав), пароперегреватель, печь шахтного типа, а также систему измерений и контроля. Исследуемый образец подвешивался в печном пространстве на платиновом подвесе, который, в свою очередь, был связан с датчиком преобразователя перемещения в сигнал постоянного тока типа МП-Л, от которого сигнал поступал на систему измерения. Данная система позволяла фиксировать измерение массы образца. В нижнюю часть печного пространства подавался перегретый водяной пар, скорость которого регулировалась. Скорость движения пара в печном пространстве во много раз превышала критическое значение $V_{кр} = 0{,}2 - 0{,}4$ м/с, [1], что позволило исключить влияние скорости потока на диффузионные процессы в пограничном слое.

Взаимодействие газового потока и металла включает ряд последовательных стадий [2]:

– подвод кислорода и кислородсодержащих молекул к поверхности металла;

– химическая адсорбция кислородсодержащих молекул и их диссоциация на поверхности металла или оксида;

– химическая реакция образования оксида;

– диффузия реагентов в зону химической реакции;

– переход атомов металла в виде ионов и электронов из фазы металла в оксид.

Самая медленная из указанных стадий будет определять скорость всего процесса окисления металла и будет контролирующей процесс стадией. Первая из перечисленных стадий, подвод кислорода к поверхности металла, не может быть контролирующей, так как скорость движения потока выше критической и, кроме того, толщина образовавшейся на образце окалины по ходу движения газа не меняется. Это свидетельствует о том, что количество подведённого к поверхности образца кислорода много больше, чем это необходимо для реакции образования оксида. При исследованных температурах хемосорбция кислорода протекает с большой скоростью, поэтому и эта стадия не может контролировать процесс.

В ходе измерений были получены кинетические зависимости окисления для интервала температур, которые достаточно точно аппроксимируются уравнением:

$$(\Delta m/S)^{n} = K\,\tau\,, \qquad (1)$$

где $\Delta m/S$ – удельное увеличение массы образца; K – константа скорости окисления; τ – время. Значение показателя степени n изменяется в пределах от 1 до 2. Значение $n = 1$ соответствует контролю процесса химической реакцией образования оксида (кинетический контроль). При $n = 2$ скорость реакции будет определяться диффузией реагентов в зону химической реакции. Промежуточное значение $1 < n < 2$ означает, что скорость химической реакции и скорость диффузии примерно одинаковы или соизмеримы (диффузионнокинетический контроль). Представление уравнения (1) в лагорифмических координатах в виде:

$$ln(\Delta m/S) = (lnK) / n + (1/n)\, ln\, \tau \qquad (2)$$

позволит графическим методом определить значение показателя n и константы окисления K. Зависимость показателя степени от температуры достаточно точно описывается уравнением $n = 3{,}38 – 1{,}9 \cdot 10^{-3}\ T$.

Анализ зависимости показывает, что при низких температурах скорость окисления углеродистой стали практически полностью контролируется диффузией ионов железа через оксидную плёнку. С повышением температуры основную роль играет скорость химической реакции образования оксида, и при температуре 1273К окисление протекает практически по линейному закону (при кинетическом контроле).

Значительный объём информации о протекающем процессе даёт зависимость константы окисления от температуры. Эта зависимость выражается законом Аррениуса:

$$K = K_0\, exp(–U/RT), \qquad (3)$$

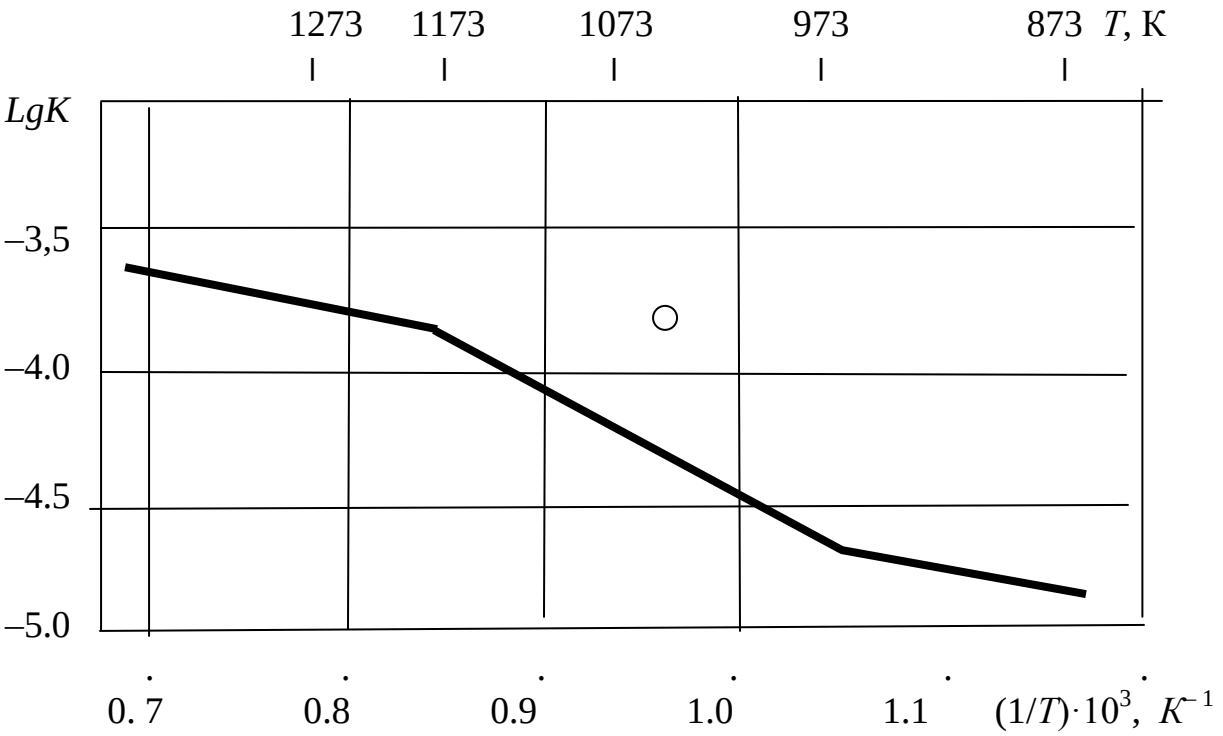
где U – энергия активации процесса окисления; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Логарифмирование уравнения (3) позволяет получить линейную зависимость в координатах $lnK - 1/T$.

$$lnK = ln\ K_0 - U/RT, \quad (4)$$

которая позволит графически определить значение предэкспоненциального множителя K_0 и энергию активации.

Зависимость (4) представлена на рисунке, и её можно разделить на три линейных участка. Изменения характера окисления стали можно объяснить появлением в составе окалины новых фаз, например, температура 848К соответствует появлению в окалине вюстита *FeO* (т. Шадрона). Так как коэффициент диффузии железа в вюстите очень высок, вследствие большого количества в его кристаллической решётке катионных вакансий, поэтому его образование в окалине ведёт к резкому увеличению скорости окисления. При температуре 1043К (точка Кюри) происходит в железе магнитное превращение (железо теряет свои магнитные свойства), что также приводит к значительному увеличению скорости окисления стали. Температура 1173К соответствует окончанию формирования аустенитной структуры, что ведет к снижению скорости окисления.



Зависимость константы окисления от температуры

На основании проведенных исследований было получено уравнение, позволяющее рассчитать угар металла:

$$(\Delta m/S)^{n} = K_0 \, exp\,(-U/RT)\tau \qquad (4)$$

Значения энергий активации выбранных температурных интервалов приведены в таблице.

Таблица

Значения энергий активации

Температура, *К*	Энергия активации Дж.моль$^{-1}$	Предэкспоненциальный множитель
Менее 1003	20600	$1{,}8 \cdot 10^{-1}$
1003–1163	75200	$3{,}2 \cdot 10^{-1}$
1163–1273	22800	$9{,}9 \cdot 10^{-2}$

Также было показано, что, для увеличения стойкости элементов конструкции подвергающихся воздействию высокотемпературных продуктов сгорания, необходимо предупредить образование в окалине вюстита FeO или повысить температуру его образования. Для этого сталь легируют, например, хромом, кремнием и т. д. Кроме того, для этой цели необходимо использовать немагнитные стали аустенитного класса.

Библиографический список

1. Окисление и обезуглероживание стали / под ред. А.И. Ващенко. – М.: Металлургия, 1972. – 335 с.

2. Хауффе, К. Реакции в твёрдых телах и на их поверхности. Ч. 2 / К. Хауффе. – М.: Иностранная литература, 1963. – 250 с.

К содержанию

УДК 621.81(076.5)

МОДЕРНИЗАЦИЯ УЧЕБНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «ДЕТАЛИ МАШИН И ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ» ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Е.П. Устиновский, Е.В. Вайчулис

В рамках Инновационного проекта Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) на 2010–2015 гг. научно-производственным предприятием (НПП) «Учебная техника-Профи» в составе ЮУрГУ разработан ряд новых и модернизированы существующие лабораторные установки по курсу «Детали машин и основы конструирования», которые внедрены в учебном процессе кафедры «Теоретическая механика и основы проектирования машин».

Ключевые слова: учебный процесс; учебная лаборатория; компьютерные технологии в образовании, автоматизированные лабораторные установки, детали машин.

Важное место в конструкторской подготовке студентов занимает курс «Детали машин и основы конструирования». В этом курсе будущий инженер получает основные сведения и навыки, необходимые для проектирования деталей, узлов и машин в целом.

Неотъемлемой частью курса «Детали машин и основы конструирования» является лабораторный практикум, облегчающий изучение физической сущности работы деталей машин и усвоение методов их расчета. В процессе выполнения лабораторной работы студент изучает конструкции деталей и узлов общего назначения, вопросы их обслуживания и регулировки, знакомится с методикой выполнения эксперимента и статистической обработки экспериментальных данных, методами измерения усилий, деформаций, напряжений и др.

В 1989 г. Одесское специальное конструкторское бюро (ОСКБ) выпустило автоматизированную лабораторию по курсу «Детали машин и основы конструирования», в которой использованы элементы компьютерных технологий обучения и автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). На этой базе кафедрой «Теоретическая механика и основы проектирования машин» Южно-Уральского государственного университета созданы две учебные лаборатории по курсу «Детали машин и основы конструирования», одна из которых оснащена автоматизированным лабораторным комплексом конструкции ОСКБ, а другая – установками без использования элементов АСНИ.

Для методического обеспечения лабораторного практикума кафедрой «Теоретическая механика и основы проектирования машин » ЮУрГУ было выпущено в 2004 г. учебное пособие [1] в трех частях с грифом УМО.

К настоящему времени кафедрой «Теоретическая механика и основы проектирования машин» Южно-Уральского государственного университета накоплен определенный опыт проведения лабораторного практикума по курсу «Детали машин и основы конструирования».

В рамках Инновационного проекта Южно-Уральского государственного университета (национальный исследовательский университет) на 2010–2015 гг. научно-производственное предприятие (НПП) «Учебная техника-Профи» в составе ЮУрГУ разработало ряд новых и модернизировало существующие лабораторные установки, которые вошли в издание [2] в трех частях. Пособие рекомендовано Московским государственным техническим университетом им. Н.Э. Баумана в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по машиностроительным направлениям подготовки и специальностям.

Существенному изменению подвергнуты стенды для исследования передач. Одной из альтернатив предложено исследование передач в замкнутом контуре. Одна из таких установок представлена на рис. 1. позволяет испытывать любую из четырех передач замкнутого контура или все передачи одновременно. В этой конструкции установки нагружение в контуре создается дисковой фрикционной муфтой.

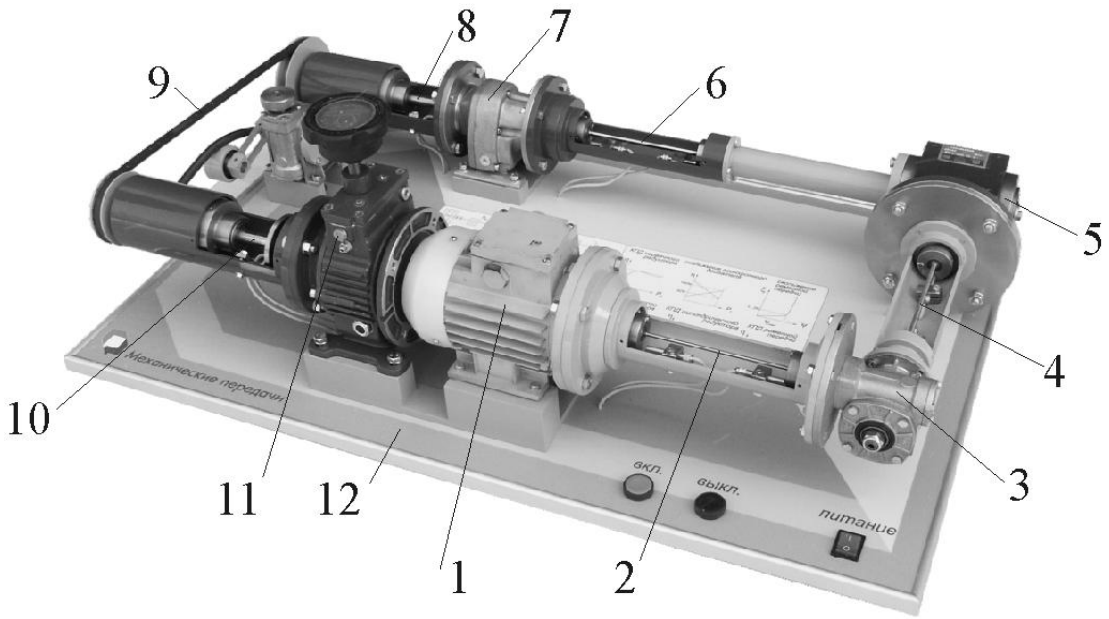


Рис. 1. Универсальная лабораторная установка
для исследования передач в замкнутом контуре

Лабораторная установка содержит электродвигатель 1, нагружающее устройство 11 и четыре исследуемых передачи: червячный редуктор 3, конический редуктор 5, цилиндрический двухступенчатый соосный мультипликатор 7 и клиноременную передачу 9, соединенные между собой и с электродвигателем посредством торсионных валов 2, 4, 6, 8 и 10 в замкнутый контур. Все узлы привода закреплены на плите 12. Управление двигателем осуществляется кнопочной станцией, расположенной с правой стороны плиты.

От электродвигателя 1 вращение подается через торсионный вал 2 на ведущий вал червячного редуктора 3 с передаточным отношением $i_1 = 7$. Червячный редуктор 3 снижает частоту вращения от вала электродвигателя 1 в i_1 раз и через торсионный вал 4 подает вращение на ведущий вал конического редуктора 5. Конический редуктор 5 имеет передаточное отношение $i_2 = 2$, т.о. снижает частоту вращения от ведущего вала к ведомому в i_2 раз. Далее движение подается через торсионный вал 6 на ведущий вал цилиндрического двухступенчатого соосного мультипликатора с передаточным отношением $i_3 = 1/10{,}5$, увеличивая частоту вращения от ведущего вала к ведомому в $1/i_3$ раз. От ведомого вала цилиндрического мультипликатора вращение подается через торсионный вал 8 на больший шкив ременной передачи, имеющей передаточное отношение $i_4 = 1/1{,}4$. Вращение снимается с меньшего шкива ременной передачи и через торсионный вал 10 и нагружающее устройство 11 замыкается на валу электродвигателя 1.

Нагружающее устройство представляет собой дисковую фрикционную муфту в масляной ванне, создающую тормозной момент между валом электродвигателя и торсионным валом 10, вращающимися с разными угловыми скоростями за счет соответствующего подбора передаточных отношений передач установки. Нагрузка действует во всем контуре привода.

Величина тормозного момента изменяется штурвалом нагружающего устройства. На торсионных валах находятся датчики, измеряющие частоту их вращения и вращающие моменты. Сигналы датчиков поступают в память ЭВМ для обработки.

Принципиально можно исследовать одновременно все четыре передачи, снимая показания датчиков на всех торсионных валах.

В учебных целях методически оправдано последовательное исследование каждой из передач привода.

В других лабораторных установках упрощенной конструкции отсутствует фрикционная муфта, а нагружение в контуре создается изменением натяжения ремня ременной передачи, выполняющей роль ленточного тормоза за счет проскальзывания ремня по шкивам при соответствующем подборе передаточных отношений передач контура.

Методически более оправданным вариантом следует считать исследование передач в разомкнутом контуре, где нагрузка гасится нагружающим устройством в виде электромагнитного тормоза. Установка получается более компактной, при ограниченных режимах работает очень плавно. Одна из таких установок представлена на рис. 2. Она предназначена для исследования цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора.

Установка включает фланцевый электродвигатель 1, исследуемый редуктор 4 и нагружающее устройство 7. Передаточное отношение каждого из исследуемых редукторов $i = 25$. Ведущий и ведомый валы редуктора соединены с валом электродвигателя и валом нагружающего устройства через промежуточные валы, расположенные внутри полых валов 2 и 6.

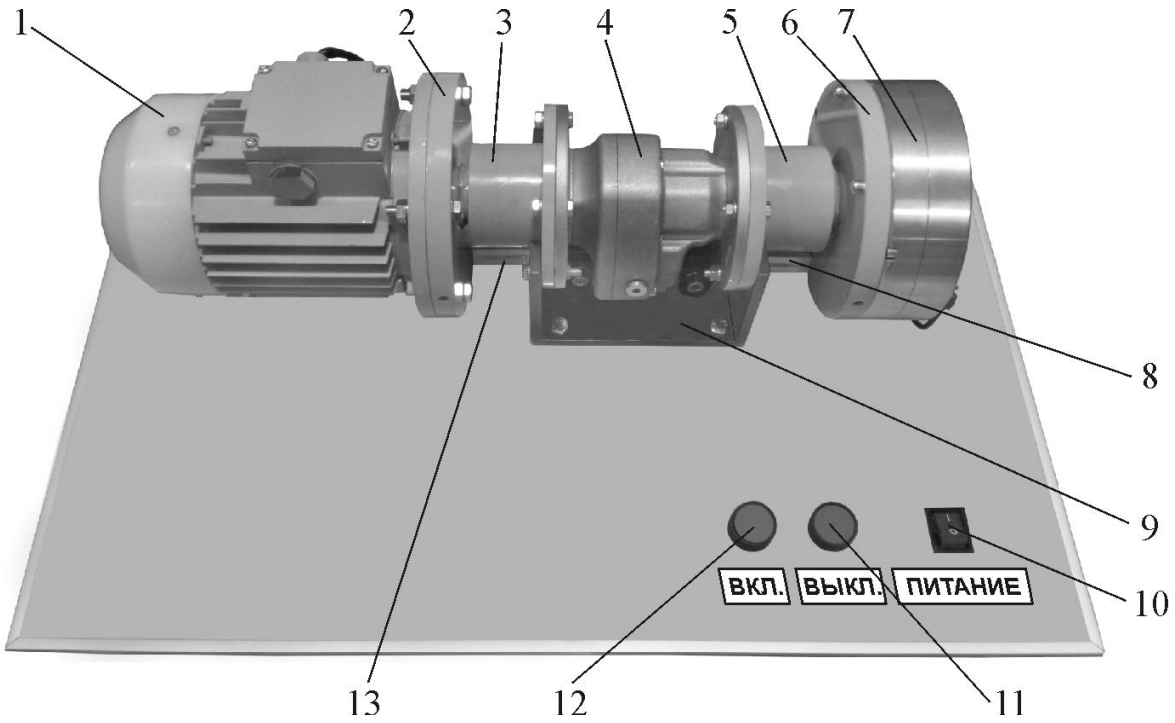


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования
цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора

Электродвигатель и нагружающее устройство своими фланцами соединены с полыми валами 2 и 6 соответственно. Корпуса 3 и 5 промежуточных опор своими фланцами жестко прикреплены к исследуемому редуктору. Редуктор жестко закреплен на основании 9. Корпус электродвигателя 1 вместе с полым валом 2 закреплены шарнирно в опорах корпуса 3 так, что ось вращения вала электродвигателя совпадает с осью поворота корпуса электродвигателя. От кругового вращения корпус электродвигателя удерживается плоской тензометрической балкой 13, закрепленной на основании 9. При переда-

че вращающего момента от вала электродвигателя к редуктору балка создает реактивный момент, приложенный к корпусу электродвигателя. По деформации балки 13 можно судить о величине вращающего момента на валу электродвигателя.

Нагрузочное устройство 7 представляет собой электромагнитный порошковый тормоз. Корпус нагрузочного устройства установлен балансирно относительно корпуса редуктора. Тензометрическая балка 8 удерживает корпус тормоза от кругового вращения. По деформации балки 8 можно судить о величине вращающего момента на тихоходном валу редуктора.

Под кожухом вентилятора электродвигателя находится оптический датчик частоты вращения, определяющий частоту вращения вала электродвигателя.

Управление двигателем осуществляется кнопочной станцией, содержащей тумблер 10 – для включения питания электроустановок и кнопки 11 и 12 выключения и включения электродвигателя.

Данные с тензометрических балок и датчика частоты вращения передаются в контроллер, расположенный внутри каркаса стенда. После обработки данные поступают на ЭВМ, с последующим выводом на дисплей.

Лабораторная работа выполняется с применением компьютера в диалоговом режиме с использованием программного обеспечения, управляющего стендом.

Другие лабораторные установки аналогичного назначения отличаются только конструкцией редукторов и расположением нагружающего устройства.

Лабораторные стенды по исследованию предохранительных муфт и резонанса валов конструктивно мало отличаются от предыдущих конструкций ОСКБ. Отличие состоит в методах измерения величины исследуемых параметров.

Содержание и методика проведения всех работ ориентированы на решение актуальных задач инженерной практики, начиная с относительно простых вопросов анализа конструктивных особенностей натурных образцов и заканчивая глубокими исследованиями с использованием в диалоговом режиме современных компьютеров.

Внедрение в учебный процесс современных автоматизированных лабораторных установок с применением компьютерных технологий позволяет повысить культуру и качество учебного процесса.

Библиографический список

1. Устиновский, Е.П. Лабораторные работы по курсу «Детали машин и основы конструирования»: Учебное пособие / Е.П. Устиновский, Ю.А. Шевцов, Е.В. Вайчулис и др.; под ред. Е.П. Устиновского. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 417 с.

2. Устиновский, Е.П. Детали машин и основы конструирования: Лабораторные работы. Учебное пособие / Е.П. Устиновский, Е.В. Вайчулис, Д.В. Алексушин; под ред. Е.П. Устиновского. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 485 с.

К содержанию

УДК 532.51

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАНАЛАХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК С ГОМОГЕННЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ

Е.В. Вайчулис

Разработана математическая модель течения однофазного потока в обогреваемом канале энергоустановки при различных законах истечения на выходном концевом элементе. Модель ориентирована на низкотемпературный гелий сверхкритического давления систем криостатирования. Отмечено, что данная задача применима для моделирования широкого класса нестационарных теплогидравлических процессов с другими теплоносителями при соответствующей замене замыкающих соотношений.

Ключевые слова: канал, математическая модель, энергоустановка, гомогенный, рабочее тело, нестационарный процесс.

При проектировании энергоустановок различного назначения (парогенераторы (ПГ) с кипящим рабочим телом, с поверхностным кипением, с теплоносителями сверхкритических параметров, конденсаторы, сверхпроводящие циркуляционные системы криогенного обеспечения (ЦСКО), охлаждаемые кипящим гелием или гелием сверхкритического давления (СКД) и т.д.) обычно стремятся обеспечить необходимый расход рабочего тела в теплообменном процессе.

Как правило, при этом ограничиваются изучением только стационарных режимов работы. Возможность потери устойчивости движения потока в большинстве случаев не учитывается.

Важной особенностью термодинамических свойств теплоносителей в указанных условиях работы является существенное уменьшение плотности при возникновении объемного или поверхностного кипения при докритическом давлении или псевдокипения при сверхкритическом давлении.

В каналах с такими потоками теплоносителей при определенных сочетаниях режимных и конструктивных параметров могут возбуждаться низкочастотные колебания, наличие которых недопустимо по соображениям теплотехнической надежности.

Пульсации расхода нежелательны для работы турбины, колебания давления приводят к разрушению стенок канала, колебания расхода приводят к кризисным явлениям, переходу ЦСКО в резистивное состояние с последующей аварией и т.д. [1, 2, 3].

Очевидно, что надежная эксплуатация указанных энергоустановок зависит от обеспечения устойчивого течения рабочего тела в обогреваемых каналах. Поэтому при разработке таких систем, наряду с обычными стационарными тепловыми и гидравлическими расчетами, следует проводить расчеты на устойчивость движения потока теплоносителя по нестационарной математической модели (ММ). При этом расчеты необходимо проводить как «в малом», т.е. в линейном приближении (поверочные расчеты конкретных режимов работы системы и проектные расчеты по определению границ областей устойчивости в координатах стационарных параметров системы), так и «в большом», т.е. при глубоком, свыше 100 % от номинального значения, возмущении внешних управлений.

Устойчивость рабочего процесса в каналах энергоустановок не является единственным динамическим показателем, определяющим их работоспособность. В зависимости от условий работы практический интерес могут представлять такие показатели качества, как монотонность или колебательность переходного процесса, время его затухания, величина перерегулирования, режимы с импульсными тепловыделениями в криогенных системах, переходные режимы их захолаживания и т.д.

При таком характере воздействия на поток возникает задача прогнозирования параметров рабочего тела в условиях глубокого внешнего возмущения и оценки устойчивости конечных режимов работы систем.

Таким образом, суть проблемы состоит в том, чтобы на стадии проектирования циркуляционных теплогидравлических систем исключить возможность возникновения и существования пульсационных режимов и обеспечить рациональный регламент их работы в нестационарных условиях.

Для решения этих актуальных задач необходимо располагать надежными ММ процессов в каналах энергоустановок, адекватно отражающих нестационарные теплогидравлические явления, происходящие при их эксплуатации.

Широкое применение гомогенных (однофазных) теплоносителей обусловлено рядом преимуществ и часто оказывается предпочтительнее вариантов использования рабочих тел в состоянии кипения (двухфазных).

В дальнейшем обоснование преимуществ и предпочтений проведено на примере использования низкотемпературного гелия СКД для криостатирования ЦСКО сверхпроводящих устройств (СПУ).

К этим преимуществам в первую очередь относятся:

1) низкие значения критической температуры ($T_{кр}$ = 5,2 К), и критического давления ($P_{кр}$ = 0,227 МПа) [4, 5];

2) высокая интенсивность теплообмена при турбулентном режиме течения [6];

3) отсутствие фазовых превращений, которые могут приводить к значительному температурному расслоению потока из-за перегрева паровой фазы, ухудшению условий охлаждения и росту гидравлического сопротивления.

Однако результаты экспериментов [2,6] свидетельствуют о том, что, наряду с указанными достоинствами, гелий СКД особенно склонен к тепловым колебаниям потока. Отсюда возникает необходимость моделирования нестационарных процессов при проектировании ЦСКО с гелием СКД.

Основой анализа процессов в сложных многоканальных циркуляционных энергетических системах различного назначения, в том числе и в ЦСКО с гелием СКД, всегда служат результаты исследования отдельных каналов. Поэтому в дальнейшем рассматривается расчетная схема с одиночным обогреваемым каналом, изображенная на рисунке. Размерность всех величин в ММ – СИ.

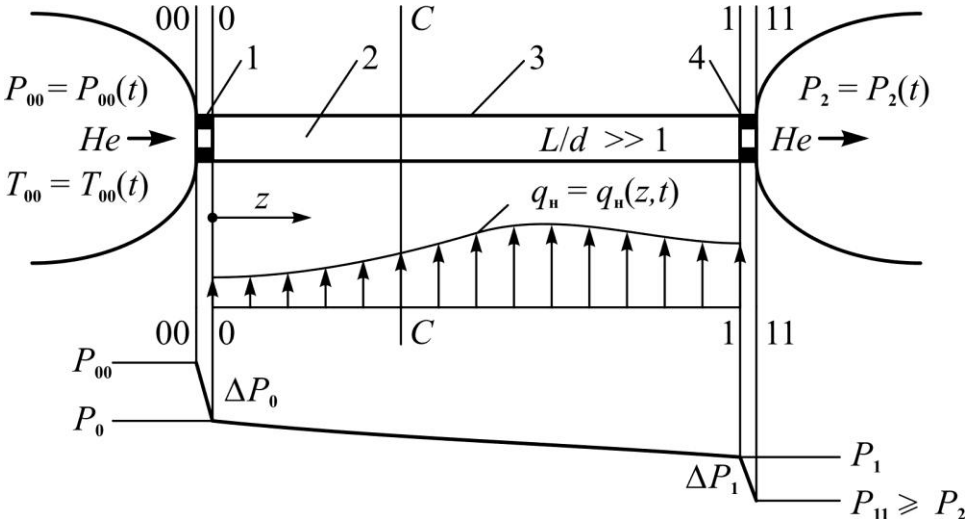


Схема объекта исследования

Низкотемпературный гелий СКД поступает через входной дроссель (концевой элемент) 1 в канал 3 из напорной емкости (раздаточного коллектора) с давлением $P_{00} = P_{00}(t)$ и температурой $T_{00} = T_{00}(t)$.

Плотность теплового потока $q_н = q_н(z, t)$, имитирующего внешнюю тепловую нагрузку, изменяется по известному закону в функции координаты z и времени t.

Из канала 3 поток гелия 2 через выходной дроссель (концевой элемент) 4 поступает в емкость (сборный коллектор) с давлением $P_2 = P_2(t)$.

Потери давления по длине канала в общем случае считаются соизмеримыми по значению с перепадами давления ΔP_0, ΔP_1 на входном 1 и выходном 4 дросселях соответственно.

На выходном дросселе 4 предполагается возможность запирания потока при достижении скорости u в сечении 11-11 местной скорости звука a ($u_{11} = a_{11}$). Такой вариант краевого условия возможен в том случае, когда местная скорость звука незначительна по величине. Для низкотемпературного гелия СКД такое допущение вполне оправдано [5].

Сечение *C-C* определяет границу между псевдожидкостным и псевдогазовым участками (сечение с резким уменьшением плотности потока при псевдофазовом переходе, которое имеет место для теплоносителей околокритических параметров) [4, 5].

При моделировании нестационарных процессов в канале приняты следующие допущения:

1) течение теплоносителя описывается нестационарными гидравлическими дифференциальными уравнениями в частных призводных сохранения массы, энергии, количества движения [1, 3];

2) теплоотдача и гидросопротивление канала описываются квазистационарными зависимостями [1, 3];

3) в каждой точке гидравлической линии поток гелия находится в состоянии локального термодинамического равновесия [1, 3];

4) тепловая инерционность стенки канала не учитывается [4, 5];

5) распределение температуры вдоль потока и стенок канала не зависит от диффузии тепла в осевом направлении [3];

6) гидросопротивление выходного дросселя при околозвуковых скоростях течения гелия ($u_{11} < a_{11}$) и в условиях запирания потока ($u_{11} = a_{11}$) определяются из соотношений, полученных для реального газа в предположении изоэнтропического расширения. При малых скоростях течения ($u_{11} << a_{11}$) зависимость гидросопротивления от массового расхода может быть принята квадратичной;

7) гидросопротивление входного дросселя подчиняется квадратичному закону, а процесс течения предполагается изоэнтальпийным [1].

Для замыкания система дифференциальных гидравлических уравнений ММ дополняется термическим уравнением состояния:

$$\rho = \rho(P, T),$$

краевыми условиями:

$$P(0, t) = P_0(t) = P_{00} - \Delta P_0, \;\; h(0, t) = h_0(t) = h_{00},$$

$$P(L, t) = P_{\boldsymbol{L}}(t) = P_2 + \Delta P_1 \quad (\text{при } P_{11} = P_2 \quad \text{и} \quad u_{11} < a_{11})$$

или

$$u_{11} = a_{11} \quad (\text{при } P_{\mathbf{11}} > P_2),$$

соотношениями по гидросопротивлению канала и концевых элементов, по теплоотдаче, зависимостями для термодинамических и теплофизических свойств рабочего тела.

Состояние внешней среды записывается в виде управлений, заданных в функции времени:

$$P_{00} = P_{00}(t),\ T_{00} = T_{00}(t),\ P_2 = P_2(t),\ K_0 = K_0(t),\ K_1 = K_1(t),\ q_{\text{н}} = q_{\text{н}}(z, t).$$

Здесь h – удельная энтальпия теплоносителя, K_0, K_1 – коэффициенты сопротивления входного и выходного дросселей соответственно.

Численное моделирование динамических процессов в канале зависит от располагаемых средств по расчету термодинамических и теплофизических свойств рабочего тела. Поэтому наличие справочных данных [5] и пакета программ с входными параметрами T–P послужили причиной отказа от вектора искомых функций

$$Y = \{P\ h\ m\}^{\text{T}}$$

и перехода к вектору искомых функций

$$Y = \{P\ T\ m\}^{\text{T}}\ .$$

Здесь m – массовый расход теплоносителя.

Систему преобразованных таким образом рабочих дифференциальных уравнений движения потока удобно записать в матричном виде:

$$A \times \partial Y/\partial t + B \times \partial Y/\partial z = R.$$

Выражения для элементов матриц a_{ij}, b_{ij} и вектора r_i; $i, j = 1,2,3$ являются соответственно коэффициентами при производных (по времени и координате) и свободными членами уравнений неразрывности, энергии и количества движения потока соответственно. Отметим, что матрицы A, B и вектор R правых частей рабочих уравнений являются нелинейными функциями вектора Y.

Для расчета стационарных режимов течения (начальных условий решения нестационарной задачи) в рабочих уравнениях достаточно пренебречь производными по времени в левой части. При этом частная производная вектора Y по координате z становится полной и система рабочих уравнений приобретает вид:

$$B \times dY/dz = R.$$

Уравнение неразрывности вырождается в соотношение $m = const$, и расчет стационарного режима сводится к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений энергии и количества движения:

$$dY/dz = B^{-1} \times R,$$

со свободным параметром m, который в процессе решения определяется заданными граничными условиями.

Краевые условия задачи являются нелинейными функциями вектора Y в начале и в конце канала (рис. 1) и функциями времени:

$$F_0(Y_0, t) = 0, \qquad F_1(Y_1, t) = 0.$$

С математической точки зрения задача динамики течения гомогенного теплоносителя (в т. ч. и гелия СКД) в обогреваемом канале с известным набором замыкающих соотношений сведена к системе трех квазилинейных уравнений с нелинейными краевыми условиями и описывает эволюционный процесс движения сплошной среды в техническом объеме типа «трубопровод» (рис.):

$$A \times \partial Y/\partial t + B \times \partial Y/\partial z = R,$$

$$F_0(Y_0, t) = 0, \qquad F_1(Y_1, t) = 0,$$

$$z \in [0, L], \qquad t \in [0, \infty].$$

Сформулированная задача в рамках принятых допущений может применяться в качестве рабочей модели при численном линейном и нелинейном анализе теплогидравлической неустойчивости, а также при моделировании обширного класса различных нестационарных процессов.

Библиографический список

1. Морозов, И.И. Устойчивость кипящих аппаратов / И.И. Морозов, В.А. Герлига. – М.: Атомиздат., 1969. – 280 с.

2. Дейни, Д. Экспериментальное исследование термоиндуцированных колебаний в потоке гелия при сверхкритическом давлении / Д. Дейни, П. Ладтке, М. Джоунс // Теплопередача. – 1979. – № 1. – С. 7–15.

3. Лабунцов, Д.А. Устойчивость течения гелия сверхкритического давления при неравномерном распределении тепловой нагрузки по длине канала / Д.А. Лабунцов, П.А. Мирзоян // Теплоэнергетика. – 1986. – № 4. – С. 53–56.

4. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович и др. под общ. ред. М.П. Малкова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.

5. Термодинамические свойства гелия / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 319 с.

6. Богачев, В.А. Экспериментальное исследование термоиндуцированных колебаний и теплообмена при подъемном течении гелия сверхкритического давления в вертикальной трубе / В.А. Богачев, В.М. Ерошенко, Е.В. Кузнецов // Инж.-физ. ж. – 1986. – Т. 51. – № 5. – С. 719–722.

К содержанию

УДК 531.4

О ВОЗМОЖНЫХ ОШИБКАХ ПРИ НЕПОЛНЫХ РЕШЕНИЯХ РЯДА ИЗВЕСТНЫХ ЗАДАЧ МЕХАНИКИ

Ю.Г. Прядко, В.Г. Караваев

Авторы обращают внимание на некоторые ошибки, возникающие при решении типовых и нестандартных задач динамики механических систем в ходе учебного процесса или в научно-исследовательской деятельности. Эти ошибки, вызванные возможным непониманием, приводят к неточностям, так как выводы, полученные в ходе решения, чаще всего справедливы только в определенном диапазоне параметров системы. В статье предлагается разбор достаточно часто встречающихся ошибок на примере нескольких типовых задач.

Ключевые слова: динамика тела; нити; трение; маятник Максвелла; общие теоремы динамики; степени свободы.

В ходе многолетней научно-методической практики, при подготовке студентов к участию в олимпиадах по теоретической, прикладной механике [1], авторы неоднократно замечали, что при построении моделей, или постановке физических задач появляются ошибочные результаты, связанные с неполнотой динамического анализа систем, с не учетом всех качественных состояний объекта.

Первый тип ошибок возникает при решении задач динамики систем с одной степенью свободы в тех случаях, когда тела в системе соединены нитями. Проскальзыванием тел и нитей чаще всего пренебрегают.

Рассмотрим типичную задачу, обычно решаемую в курсе теоретической механики в разделах «Теоремы об изменении кинетической энергии» или «Общие теоремы динамики». Примеры будут взяты из сборников семестровых заданий нескольких университетов. Условия их узнаваемы на наш взгляд многими студентами и преподавателями.

Задача 1

Найти ускорение центра масс (угловое ускорение) третьего тела, если известны заданные (активные) силовые факторы, массы и геометрические параметры тел системы (рис. 1а, 1б), [2].

В любой из этих задач ускорение находится многими способами, например, с помощью теоремы мощностей путем деления обобщенной силы заданных сил и реакций связей на приведенный момент инерции при определении углового ускорения или на приведенную массу при определении линейного ускорения точки.

В то же время несколько более полное решение приводит к «парадоксальным» выводам.

Например, определение натяжений нитей по известному ускорению показывает, что некоторые нити имеют отрицательное натяжение, то есть работают на сжатие.

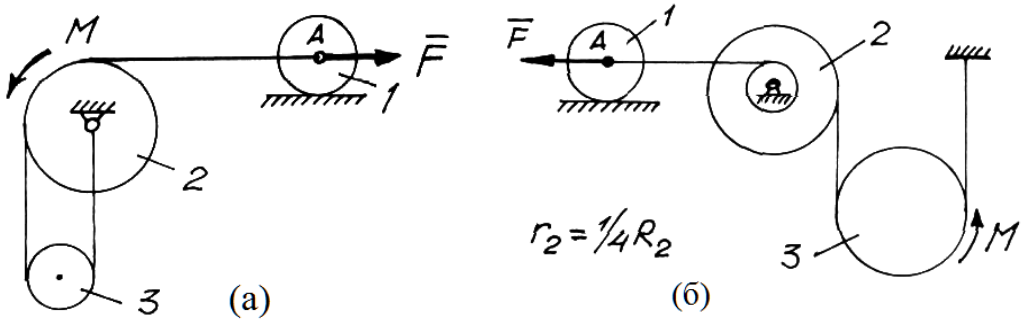
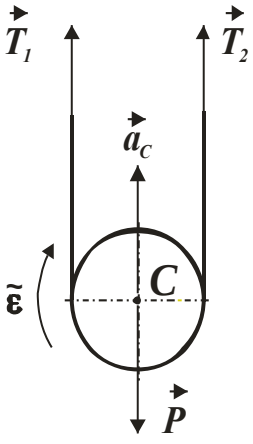


Рис. 1. Примеры систем с одной степенью свободы

Поскольку это невозможно, можно сделать только следующий вывод: в такой механической системе не всегда все тела взаимодействуют, следовательно, механическая система может обладать и иным качеством («разваливается на невзаимодействующие системы или тела»).

Если не определять сил натяжения, что делается часто, увидеть новое состояние системы невозможно.

Проанализируем силы, действующие на третье тело, например, на рис. 1а, 1б, чтобы получить условия, при соблюдении которых все нити напряжены. На данном этапе считаем, что из заданных сил на тела действуют только силы тяжести.



Применяя дифференциальные уравнения плоскопараллельного движения тела (рис. 2), получим:

$$I_{zC_3}\,\varepsilon_3 = (T_1 - T_2)R_3; \qquad \frac{P_3}{g}a_{C3} = T_1 + T_2 - P_3, \tag{1}$$

где $\varepsilon_3 = \dfrac{a_{C3}}{R_3}$, $I_{zC_3} = \dfrac{P_3 R_3^{\,2}}{2g}$. (2)

Или $T_2 = \dfrac{P_3}{2}\left(\dfrac{a_{C3}}{2g} + 1\right)$; $T_1 = \dfrac{P_3}{2}\left(\dfrac{3a_{C3}}{2g} + 1\right)$.

Рис. 2. Подвижный блок

Условием совместности движения 3 и 2 тел и правильности кинемаческих соотношений являются неравенства: $T_2 > 0$; $T_1 > 0$.

Иначе:

$$\frac{a_{C3}}{2g}+1>0\ ,\ \frac{3a_{C3}}{2g}+1>0\ ;\qquad a_{C3}>-2g\ ,\ a_{C3}>-2g/3. \qquad (3)$$

Из (3) видно, если ускорение центра масс такого блока направлено в противоположную сторону (вниз) и по модулю больше $2g/3$, то левая нить будет ослаблена и третье тело не взаимодействует со вторым ($T_1 < 0$). Этот результат в точности совпадает с ускорением центра масс маятника Максвелла (рис. 3). Как известно, в маятнике Максвелла ускорение центра масс цилиндра a_C также равно $2g/3$.

Следовательно, при равенстве ускорения центра масс $2g/3$ третье тело превращается в маятник Максвелла и двигается отдельно от механической системы. Второе неравенство $a_{C3} < -2g$ в условиях этих двух задач недостижимо.

Анализ динамики второго тела (рис. 4) приводит к следующим уравнениям и ограничениям на ускорение центра масс третьего тела:

$$I_{z_2}\,\varepsilon_2 = T_3 r_2 - T_1 R_2\ ,\ \text{где}\ \varepsilon_2 = 2a_{C3}/R_2,\ I_{z_2} = \frac{P_2\,\rho_2{}^2}{g}. \qquad (4)$$

Или $$T_1 = T_3 r_2 / R_2 - I_{z_2}\,2a_{C3}/R_2{}^2\ . \qquad (5)$$

Из условия $T_1 > 0$ получаем $a_{C3} < T_3 R_2 r_2 / 2 I_{z_2}$. (6)

Таким образом, ускорение центра масс третьего тела ограничено не только снизу (3), но и сверху (6), если оно направлено вверх (рис. 2). Из анализа движения первого тела (рис. 5) получаем также $T_3 > 0$, если:

$$a_{C3} < g \sin\alpha\, R_2 / 2 r_2 \qquad (7)$$

Совместное решение неравенств (6) и (7) уточняет верхнюю границу ускорения a_{C3}.

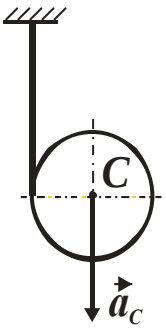


Рис. 3. Маятник Максвелла

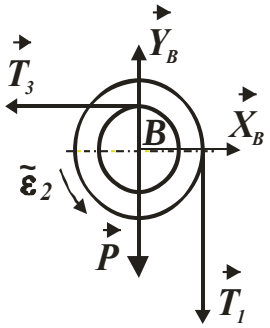


Рис. 4. Блок

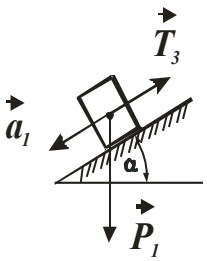
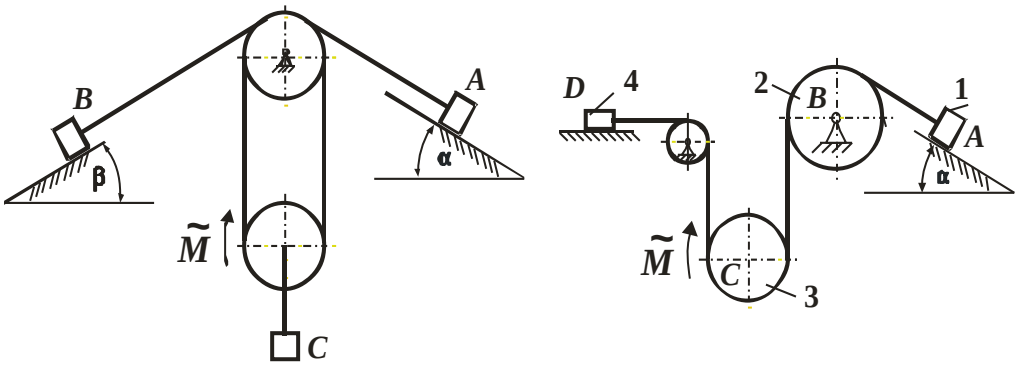


Рис. 5. Груз

Следовательно, если при решении задач указанного типа (с одной степенью свободы) искомое ускорение достигает своей нижней или верхней границы, механическая система меняет свои качественные свойства и может либо распасться на невзаимодействующие части, либо у нее увеличивается число степеней свободы.

И то и другое можно получить, прикладывая дополнительные активные силы и пары сил к телам системы, как это показано на рис. 1, 2. Подобное получится в тех случаях, когда авторы при динамическом анализе системы, находят только ее движение, не проводя подробного силового анализа.

К такому же выводу можно прийти, если провести динамический анализ и систем с несколькими степенями свободы (рис. 6а, 6б) . Эти схемы взяты из сборника задач И.В. Мещерского [2].



(а) (б)

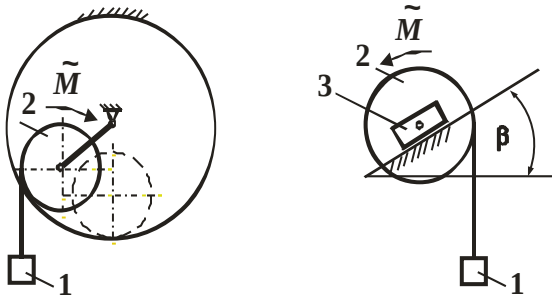
Рис. 6. Системы с двумя степенями свободы

Второй тип неточностей, возникающих из-за отсутствия силового анализа, связан с не учетом дополнительной степени свободы в системах, подобных изображенным на рис. 7а, 7б. Схемы взяты из сборников [3] и [4].

В этих задачах зачастую не учитывают дополнительную степень свободы, связанную с обязательным отклонением нити от вертикального положения во время движения и колебательным (маятниковым) движением груза 1. Более внимательный анализ показывает, что независимо от длины нити и начальных условий у подобных грузов всегда есть горизонтальная составляющая ускорения.

В большинстве случаев это приводит к усложнению задачи, нелинейности дифференциальных уравнений. Такие уравнения имеют только численное решение.

Именно поэтому подобная задача была поставлена на одной из Российских олимпиад для компьютерного конкурса (рис. 8).



(а) (б)

Рис. 7. Механические системы с дополнительными степенями свободы

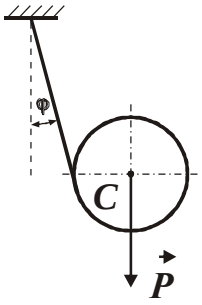


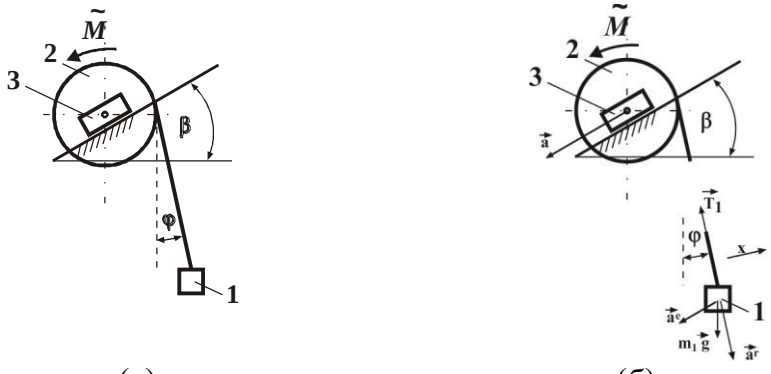
Рис. 8. Задача Российской олимпиады

В то же время во многих механизмах, подобных механизму на рис. 7б, возможно и поступательное движение нити и груза. При этом нить должна быть всегда отклонена от вертикали на угол, соответствующий постоянному ускорению ползуна.

В таких случаях механизм действительно имеет только две степени свободы, а задача имеет аналитическое решение и может быть использована в учебном процессе.

Определим угол отклонения нити от вертикали при постоянных активных силах, действующих на систему, (рис. 9а).

Рассмотрим движение груза 1 с частью нити (рис. 9б) и найдем угол φ, считая известным и постоянным ускорение ползуна $\vec{a}$.



(а) (б)

Рис. 9. Определение угла отклонения нити

Уравнение движения центра масс груза 1:

$$m_1 \vec{a}_1 = m_1 \vec{g} + \vec{T}_1. \qquad (8)$$

Связывая подвижную систему отсчета с ползуном 3, ускорение груза 1 можно разложить на переносное и относительное: $\vec{a}_1=\vec{a}^{\,e}+\vec{a}^{\,r}$, где $\vec{a}^{\,e}=\vec{a}$.

После проецирования (8) на ось x, перпендикулярную нити, получим связь между углом наклона нити к вертикали φ и ускорением ползуна $\vec{a}$:

$$a\cos(\beta-\varphi)=g\sin\varphi\ .$$

При таком соотношении между ускорением ползуна и углом φ угол наклона нити меняться не должен. Реализовать физически это состояние системы затруднительно.

В заключение приведем задачу, предложенную на одной из олимпиад. В этой задаче неполный анализ также приводит к парадоксальным выводам.

Задача 2. Какой будет скорость центра обруча 1, катящегося без проскальзывания, после его поворота на угол β. На обруч прикреплен груз массой m_2, масса обруча мала, радиус его равен R . Движение начиналось из состояния покоя и положения, изображенного на рис. 10. В этой задаче, например, из теоремы об изменении кинетической энергии можно определить скорость груза после поворота катка на угол β:

$$V_2^{\,2}=2gR\left(\sin\alpha-\sin(\alpha-\beta)\right),$$

скорость центра обруча:

$$V_C^{\,2}=V_2^{\,2}/2\left(1-\sin(\alpha-\beta)\right).\ \text{При}\ \beta=\alpha+90^0\ \ V_2^{\,2}=2gR\left(\sin\alpha+1\right).$$

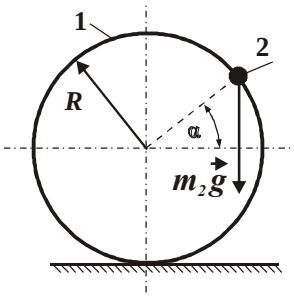


Рис. 10. Качение при наличии трения

Этот результат противоречит условию задачи. Груз, находящийся в нижней точке обруча, должен иметь нулевую скорость, т. к. по условию обруч не скользит.

Следовательно, движение без проскальзывания невозможно. Задача усложняется, для ее решения необходимы дополнительные данные и учет возможности проскальзывания обруча.

Выводы

1. Указанные выше свойства механических систем, по-видимому, не являются «существенно» новыми для многих преподавателей и научных сотрудников. В то же время и в учебном процессе, и в большом количестве вновь появляющихся сборников, и на олимпиадах периодически появляются такие задачи и их решения, в которых не учитываются все свойства системы, возникающие в широком диапазоне параметров. Это приводит и к неточностям и к существенным ошибкам.

2. Обзор указанных задач все-таки говорит и о том, что такие задачи могут применяться и в учебном процессе, но они требуют обязательного полного динамического анализа, анализа свойств системы во всем возможном диапазоне параметров. Во всяком случае, краткое простейшее рассмотрение всех возможных свойств анализируемой системы необходимо.

Библиографический список

1. Прядко, Ю.Г. Об опыте работы с талантливыми студентами / Ю.Г. Прядко, С.В. Слепова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 10. – С. 289–291.

2. Борисевич, В.Б. Учебно-методический комплекс по теоретической механике / В. Б. Борисевич, Б.М. Додонов. – М: Изд-во МАДИ, 2006. – 260 с.

3. Мещерский, И.В. Задачи по теоретической механике: учеб. пособие для вузов по дисциплине «Теоретическая механика» / И.В. Мещерский; под ред. В.А. Пальмова, Д.Р. Меркина. – СПб. и др.: Лань, 2008. – 447 с.

4. Сборник задач по теоретической механике / под ред. К.С. Колесникова. – М.: Наука, Главная редакция физ.-мат. лит., 1983. – 320 с.

5. Семестровые задания по теоретической механике / под ред. А.Т. Полецкого. – Челябинск. Изд-во ЮУрГУ, 1982.

К содержанию

УДК 531.4

ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ ПРИ КАЧЕНИИ С ТРЕНИЕМ СКОЛЬЖЕНИЯ

В.Г. Караваев, Ю.Г. Прядко

В статье анализируются динамические свойства механических систем с колесами, катящимися по шероховатым поверхностям при наличии трения скольжения. Такие свойства часто не учитываются в решениях, что приводит к ошибкам и парадоксальным выводам, о чем авторы говорят, например, в [1]. На примере одной из задач показывается, что в ходе движения системы на разных этапах возможно возникновение проскальзывания, прилипания и даже отрыва колес от основания.

Ключевые слова: динамика тела; трение скольжения; проскальзывание, общие теоремы динамики; нелинейные дифференциальные уравнения.

Опыт показывает, что некоторые ошибки возникают при решении задач динамики, связанных с движением колес по шероховатым поверхностям. Иногда такие ошибки – следствие непонимания сути происходящего процесса движения, чаще – вынужденные и объясняются невозможностью в конкретной задаче получить точное аналитическое решение.

Особенно это проявляется в нестандартных задачах, когда модули нормальных составляющих реакций поверхностей трения, а значит и максимальных сил трения скольжения меняются с течением времени. Например, если конструкция содержит колесо с прикрепленными на ободе точечными массами.

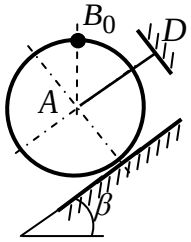


Рис. 1. О качении колеса по шероховатой поверхности

В любой из этих задач скорости и ускорения точек системы можно найти разными способами [2, 3, 4] – например, с помощью теоремы об изменении кинетической энергии или мощностей. Однако, нет гарантии, что решение верно. Более полное исследование основано на силовом анализе: отслеживании поведения нормальных составляющих реакций поверхностей трения и сил трения скольжения, полученных из дифференциальных уравнений движения центра масс системы.

При таких исследованиях, как правило, невозможно ограничиться только аналитическими выражениями. Приходиться применять численные методы вычислений. Внимательный подход уточняет результаты решения задачи и иногда может привести к парадоксальным результатам.

Рассмотрим подробнее на примере качения колеса по шероховатой поверхности (рис. 1).

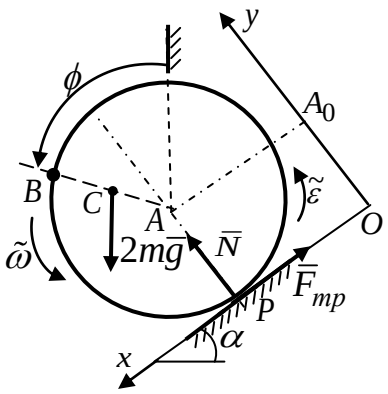


Рис. 2. Расчетная модель

Колесо в виде однородного круглого цилиндра массы m радиуса r, к ободу которого в верхнем положении B_0 жестко прикреплен точечный груз массы m.Колесо удерживается с помощью нити AD в покое в вертикальной плоскости на наклонной шероховатой поверхности (рис. 1). В некоторый момент времени нить сжигается и колесо катится по поверхности без скольжения. Найти закон движения колеса. Трением качения пренебречь; коэффициент трения скольжения $f = 0,6$; $m = 5$ кг; $r = 0,25$м; угол $\alpha = 30^0$.

Решение

Рассмотрим движение механической системы, состоящей из цилиндра и материальной точки, после удаления нити.

На систему действуют сила тяжести $2m\bar{g}$, нормальная составляющая $\bar{N}$ и сила трения скольжения $\bar{F}_{mp}$.

Проверка показывает, что сразу после удаления нити проскальзывания не будет, так как $tg\alpha < f$ и система имеет одну степень свободы.

При условиях:

$$\left|F_{mp}\right| < f\left|N\right|; \quad (1)$$

$$N > 0, \quad (2)$$

колесо начнет совершать плоское движение с мгновенным центром скоростей в точке P касания колеса с наклонной поверхностью (рис. 2 соответствует произвольному моменту времени).

За обобщенную координату примем угол ϕ поворота колеса. В системе координат Oxy, в которой ось Oy перпендикулярна наклонной поверхности и проходит через точку A_0 - начальное положение центра масс цилиндра, координаты центра масс C рассматриваемой механической системы связаны с углом поворота колеса равенствами:

$$x_c = x_A + \frac{r}{2}\cdot\sin(\phi-\alpha) = r\cdot\phi + \frac{r}{2}\cdot\sin(\phi-\alpha);$$

$$y_c = r + \frac{r}{2}\cdot\cos(\phi-\alpha),$$

где x_A – координата центра A цилиндра.

Дифференцируя равенства по времени t, получаем проекции на оси Ox, Oy векторов скорости и ускорения точки C:

$$\dot{x}_c = r\cdot\tilde{\omega} + \frac{r}{2}\cdot\tilde{\omega}\cdot\cos(\phi-\alpha); \qquad \dot{y}_c = -\frac{r}{2}\cdot\tilde{\omega}\cdot\sin(\phi-\alpha); \tag{3}$$

$$\ddot{x}_c = r\cdot\tilde{\varepsilon} - \frac{r}{2}\cdot\tilde{\omega}^2\cdot\sin(\phi-\alpha) + \frac{r}{2}\cdot\tilde{\varepsilon}\cdot\cos(\phi-\alpha); \tag{4}$$

$$\ddot{y}_c = -\frac{r}{2}\cdot\tilde{\omega}^2\cdot\cos(\phi-\alpha) - \frac{r}{2}\cdot\tilde{\varepsilon}\cdot\sin(\phi-\alpha), \tag{5}$$

где $\tilde{\omega} = \dot{\phi},\ \tilde{\varepsilon} = \ddot{\phi}$ – алгебраические угловые скорость и ускорение колеса.

Величины скоростей центра масс A колеса и точки B соответственно равны:

$$V_A = r\cdot\omega;\ V_B = 2r\omega\cos\left(\frac{\phi-\alpha}{2}\right).$$

Воспользуемся тем, что при отсутствии проскальзывания работа сил трения равна нулю и применение теоремы об изменении кинетической энергии системы при повороте колеса из начального положения на угол φ приводит к аналитическим выражениям.

Кинетическая энергия системы в произвольный момент времени равна:

$$T = \frac{1}{2}mV_A^2 + \frac{1}{2}mr^2\cdot\omega^2 + \frac{1}{2}mV_B^2 = mr^2\omega^2\left(1+2\cos^2\left(\frac{\phi-\alpha}{2}\right)\right). \tag{6}$$

Работа внешних сил на этом перемещении составит:

$$\sum A_k^e = 2mgr\phi\sin\alpha + mgr(1-\cos\phi). \tag{7}$$

Приравнивая равенства (6, 7), определяем угловую скорость колеса:

$$\tilde{\omega} = \sqrt{\frac{g}{r} \cdot \frac{2\phi \sin\alpha + 1 - \cos\phi}{0.75 + 2\cos^2\dfrac{\phi - \alpha}{2}}}. \qquad (8)$$

Дифференцируя (8) по времени, находим угловое ускорение колеса:

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{g}{2r} \cdot \frac{(2\sin\alpha + \sin\phi)(0.75 + 2\cos^2\dfrac{\phi - \alpha}{2}) + (2\phi\sin\alpha + 1 - \cos\phi)\sin(\phi - \alpha)}{(0.75 + 2\cos^2\dfrac{\phi - \alpha}{2})^2}. \qquad (9)$$

Законы изменения угла φ в зависимости от времени получаем интегрированием равенства $\varphi(t) = \int \tilde{\omega}(\phi)dt$, координаты x_A – из равенства:

$$x_A(t) = r\,\varphi(t).$$

Результаты, представленные на рис. 5 и 6 получены при условии отсутствия проскальзывания в любой момент времени.

Чтобы выяснить, возможно ли проскальзывание, проведем анализ поведения функций сил $N(\phi), F(\phi)$. Запишем дифференциальные уравнения движения центра масс системы:

$$\begin{aligned} 2m\ddot{x}_c &= 2mg\sin\alpha - F_{mp}; \\ 2m\ddot{y}_c &= N - 2mg\cos\alpha. \end{aligned} \qquad (10)$$

Учитывая равенства (4, 5), получаем выражения для функций $N(\phi)$ ***и*** $F_{mp}(\phi)$***:***

$$N(\phi) = 2mg\cos\alpha - mr\omega^2\cos(\phi - \alpha) - mr\tilde{\varepsilon}\sin(\phi - \alpha); \qquad (11)$$

$$F_{mp}(\phi) = 2mg\sin\alpha - 2mr\tilde{\varepsilon} + mr\omega^2\sin(\phi - \alpha) - mr\tilde{\varepsilon}\cos(\phi - \alpha). \quad \textbf{(12)}$$

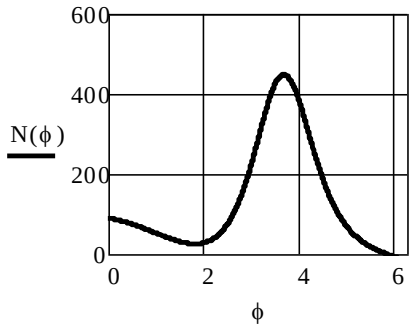


Рис. 3. Нормальная реакция

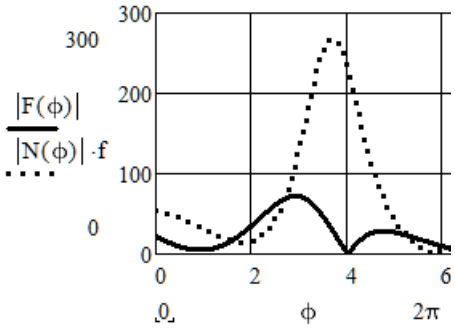


Рис. 4. Сравнение силы трения и ее максимума

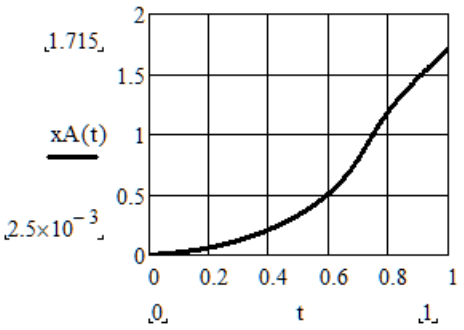


Рис. 5. Координата центра

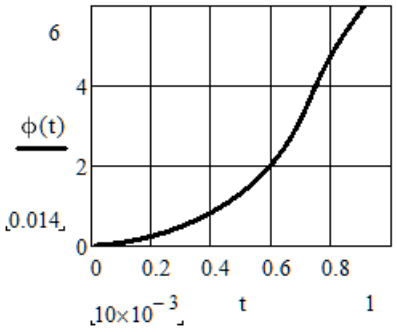


Рис. 6. Угол поворота

Ограничимся исследованием движения за время одного оборота цилиндра, то есть на интервале $[0.2\pi]$ изменения угла φ. Численный анализ, проведенный с помощью Mathcad, показывает (рис. 3,4), что на этом интервале возможны три критические точки нарушения условий (1, 2, 3). Численное определение точек пересечения приводит к следующим значениям углов: $\varphi_1 = 1,6$ рад, $\varphi_2 = 5,3$ рад, $\varphi_3 = 5,9$ рад. Этим углам соответствуют значения времени $t_1 = 0,44$ с, $t_2 = 0,74$ с, $t_3 = 0,8$ с.

Рассмотрим первый после начала движения случай, когда модуль силы трения скольжения превышает максимальное значение модуля силы трения, ($\varphi_1 = 1,6$), устанавливаемого законом Кулона. Теперь (при проскальзывании) система обладает двумя степенями свободы. За обобщенные координаты примем угол ϕ и координату x_A.

Добавим к дифференциальным уравнениям (11, 12) уравнение вращения:

$$J_{zc}\ddot{\varphi} = 0.5r\,N\sin(\varphi-\alpha) + r\,F(1+0.5\cos(\varphi-\alpha)), \qquad (13)$$

где $J_{zc} = m\,r^2$ момент инерции механической системы относительно оси z_c,

$$|F| = f\,|N|. \qquad (14)$$

Опуская преобразования, получаем два дифференциальных уравнения для обобщенных координат:

$$\frac{0.5r\ddot{\varphi}\left[\sin(\varphi-\alpha)^2 + \sin(\varphi-\alpha)\,f\;Sign(F)(1+0.5\cos(\varphi-\alpha)) + 1\right]}{0.5\sin(\varphi-\alpha) + f\;Sign(F)(1+0.5\cos(\varphi-\alpha))} + 0.5r\dot{\varphi}^2\cos(\varphi-\alpha) = g\cos\alpha; \qquad (15)$$

$$\ddot{x}_A - 0.5r\dot{\varphi}^2\cos(\varphi-\alpha)+$$

$$+0.5r\ddot{\varphi}\cdot\left[\cos(\varphi-\alpha)+\frac{f}{0.5\sin(\varphi-\alpha)+f\ Sign(F)(1+0.5\cos(\varphi-\alpha))}\right]=g\cos\alpha.$$

Начальные условия движения для уравнений (15): $x_A(0.44)=0.413$; $\varphi(0.44)=1{,}652$; $\dot{x}_A(0.44)=0.691$; $\dot{\varphi}(0.44)=2.764$.

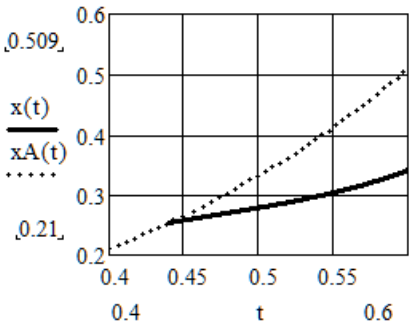


Рис. 7. Сравнение координат центра с проскальзыванием и без

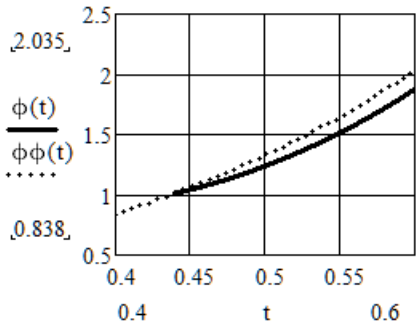


Рис. 8. Сравнение углов поворота с проскальзыванием и без

Интегрируя численно, получаем уравнения движения на интервале времени $[0.44, 0.6]$ с. Сравнивая результаты расчетов для случая проскальзывания (сплошные кривые линии) и отсутствия проскальзывания (точечные линии) на рис. 7, 8, замечаем значительное расхождение.

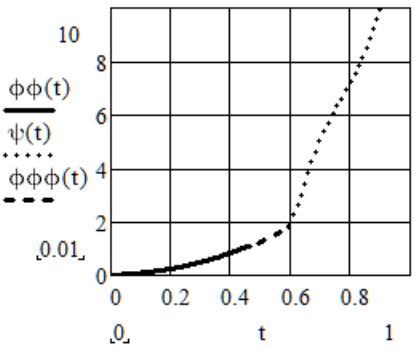


Рис. 9. Угол поворота

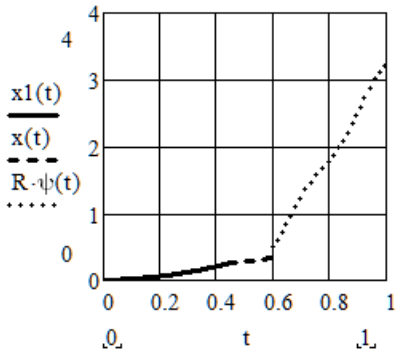


Рис. 10. Координата центра

После этого снова проверяются условия (1, 2), выявляются новые критические точки конца проскальзывания и начала нового проскальзывания. Процесс интегрирования повторяется на новом интервале времени. Изменение линейной (рис. 9) и угловой (рис. 10) координаты за одну секунду движения

соответствует трем режимам: без проскальзывания на интервале времени $[0,0.44]$ (сплошные линии), с проскальзыванием на интервале $[0.44,0.6]$ с (пунктирные линии), без проскальзывания на интервале времени $[0.6,1]$ с (точечная кривая).

К этим проблемам добавится случай возможного отрыва от опоры, что приведет к подпрыгиванию и последующему удару цилиндра о неподвижную поверхность. Для реализации задачи с ударом потребуется дополнительная исходная информация о свойствах цилиндра и поверхности.

Выводы

Опыт показывает [5], что в педагогической практике, при работе с одаренными учащимися, на олимпиадах и, конечно же, в научной деятельности постановка задач, моделирование должны сопровождаться предварительным «достаточно» полным динамическим исследованием системы. Особенно не просты такие исследования для систем с трением.

В результате неточных решений могут значительно превысить допустимый уровень. Строгое и точное решение получается только при подробном анализе каждой из ситуаций с использованием численных методов.

Библиографический список

1. Прядко Ю.Г. О возможных ошибках при неполных решениях ряда известных задач механики / Ю.Г. Прядко, В.Г. Караваев // НАУКА ЮУрГУ Материалы 66-й научной конференции. Сер. «Секции технических наук». – Челябинск, Издательский центр ЮурГУ, 2014.

2. Лойцянский, Л.Г. Курс теоретической механики / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. –М.: Наука, 1982. – Т 1. – 352 с.

3. Бутенин, Н.В. Курс теоретической механики: учеб. пособие для вузов по техн. специальностям: в 2 т. Т. 1: Статика и кинематика. Т. 2: Динамика / Н.В. Бутенин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин и др. – СПб.: Лань, 2009. – 729 с.

4. Суслов, Г.К. Теоретическая механика / Г.К. Суслов. – М.–Л.: Гостехиздат, 1946. – 655 с.

5. Прядко, Ю.Г. Общетехническая кафедра и ее роль в подготовке конкурентно способных специалистов / Ю.Г. Прядко, С.В. Слепова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 11, Ч. 2. – С. 161–163.

К содержанию

УДК 621.43 + 534.1:534.6

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН ПРИ ПОМОЩИ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРОСИГНАЛА

А.М. Захезин, П.Ю. Воителев

На основе частотно-временного анализа вибрационного сигнала показан эффективный метод определения развивающейся трещины сварной конструкции.

Ключевые слова: Фурье-анализ; вейвлет-анализ; частотный анализ; вибродиагностика; собственные частоты; скалограмма.

Широкое распространение для вибродиагностики дефектов различных машиностроительных конструкций получили методы анализа их вибраций по спектрам мощности.

Реальная оценка дефектов возможна в том случае, когда дефект разовьется до такой степени, что его мощность будет соизмерима с мощностью четко диагностируемых пиков в спектре. В статье показано на примере виброзащитного кресла автомобиля (рис. 1) метод определения зарождающихся трещин в его сварной конструкции. Сущность рассматриваемого в данной работе метода определения дефекта состоит в сравнении детерминированных характеристик случайного процесса вибросигнала, полученных при помощи Фурье и вейвлет-анализа. С использованием многоканального синхронного регистратора и программных средств «Атлант» выполнены следующие операции: произведена регистрация вибрационнго сигнала по каналам 1, 2, 3 и преобразование в цифровой код на заданном временном интервале с выбранным интервалом дискретизации.

Рис. 1. Расположение акселерометров
на металлической раме виброзащитного кресла

Моделирование повреждений элементов металлической рамы выполняется при помощи увеличения участка повреждения сварного шва конусной части виброзащитного кресла по каналу 1–10 %, каналу 2–15 %, каналу 3–20 %. Экспериментальные измерения параметров вибрации проводились с помощью аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер» акселерометров 4370, предусилителей 2635.

На (рис. 2, 3) показаны спектры мощности в двух эксплуатационных режимах при помощи Фурье-анализа. Сравнение характеристик сигналов этих спектров по коэффициенту корреляции показало, что эти критерии не применимы для ранней диагностики смоделированных трещин по спектрам мощности. На (рис. 2, 3) видно, что малые трещины не влияют на собственные частоты и на первые основные формы в структуре.

На полученных спектрах хорошо заметны характерные частоты. Оказалось успешным связать одновременное получение сигналов как во временной, так и в частотной области для обнаружения дефекта металлической рамы. Предварительный анализ результатов Фурье-преобразования позволяет обоснованно выбрать длину реализации вибросигнала, ширину полосы частот, вид вейвлета и центральную частоту вейвлет-преобразования.

Чрезмерное увеличение частоты дискретизации нежелательно, так как приведет к большому объему выборки экспериментальных данных и многократно увеличит трудоемкость расчетов с использованием вейвлет-преобразования.

На (рис. 4) показаны результаты вейвлет-анализа этих же сигналов (рис. 3), где видно, что основные гармоники остаются устойчивыми на протяжении всего временного промежутка. В зависимости от длинны трещины у нас появляются гармоники высших порядков, амплитуда которых изменяется с течением времени.

Результат непрерывного вейвлет-анализа оценивается вейвлет-спектром (скалограммой). Таким образом, мы получаем распределение энергии сигнала по масштабам. При построении скалограммы, точки на плоскости параметров (**а, в**) отображают в зависимости от величины коэффициентов цветом различной интенсивности. На представленных скалограммах по горизонтальной оси отложены величины сдвига вейвлет-функции – **а**, по вертикальной – масштаб – **в**. Черный цвет соответствует минимальному значению, которое принимают вейвлет-коэффициенты, серый – максимальному.

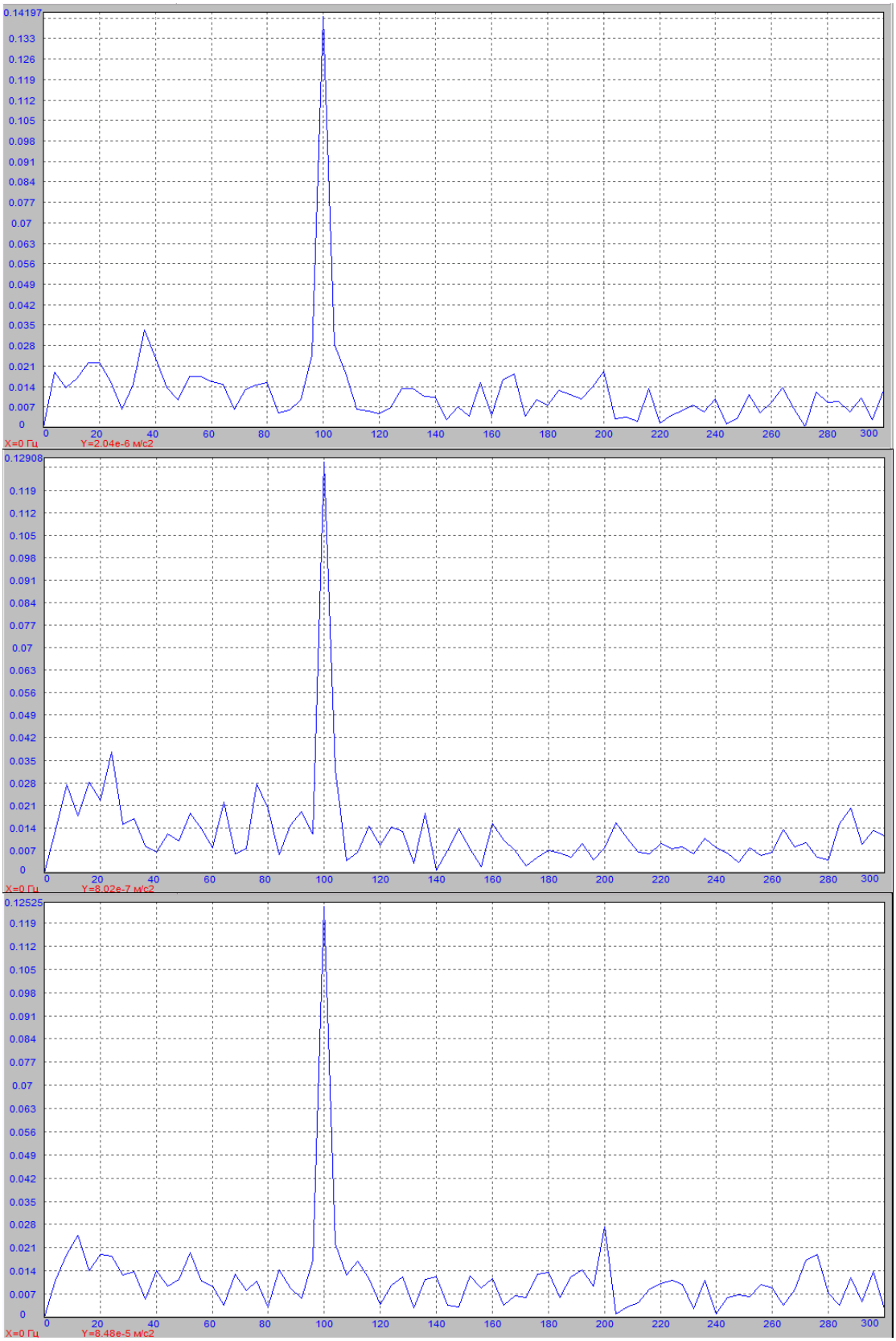


Рис. 2. Спектры мощности по каналам 1, 2, 3 в первом эксплуатационном режиме

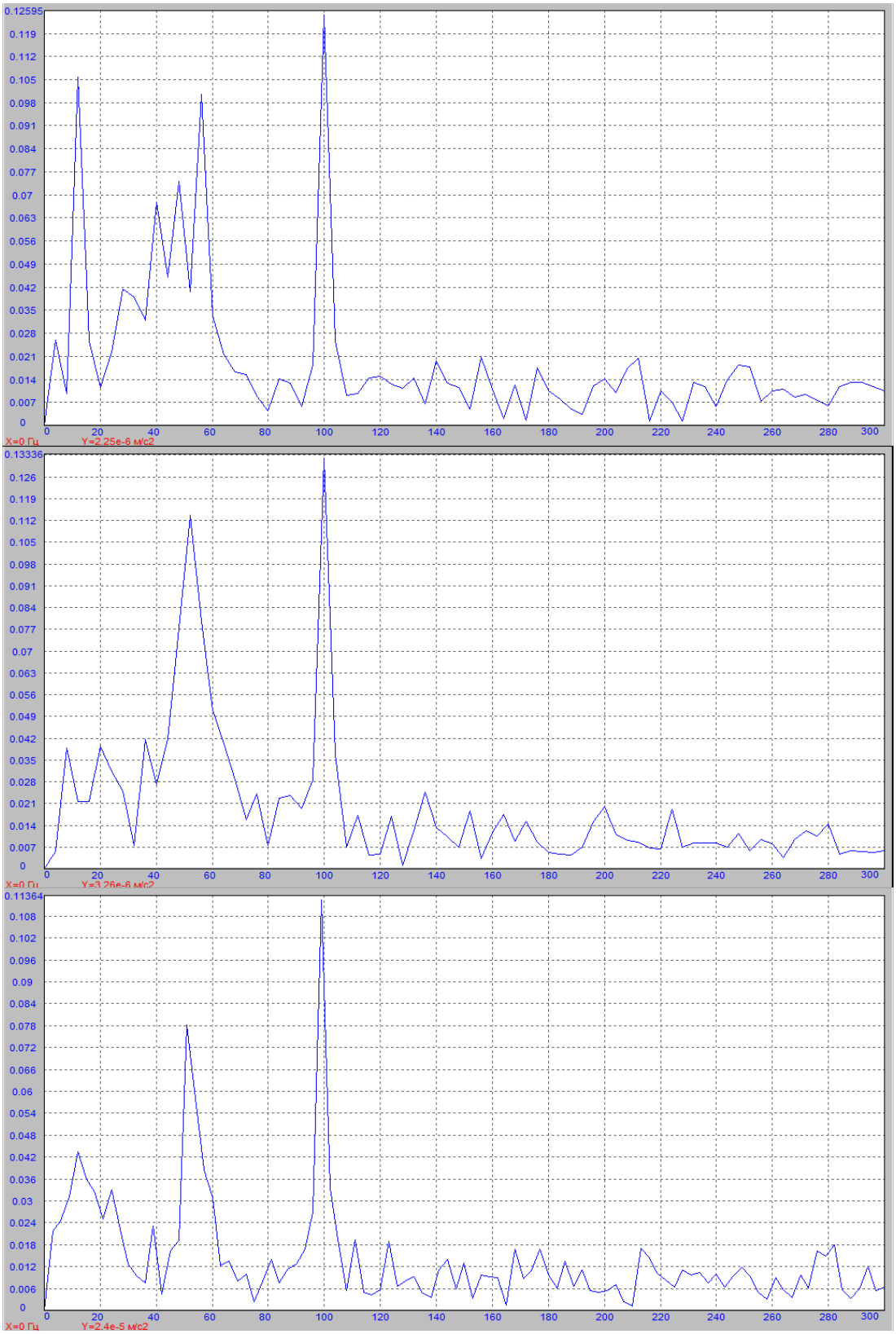


Рис. 3. Спектры мощности по каналам 1, 2, 3 во втором эксплуатационном режиме

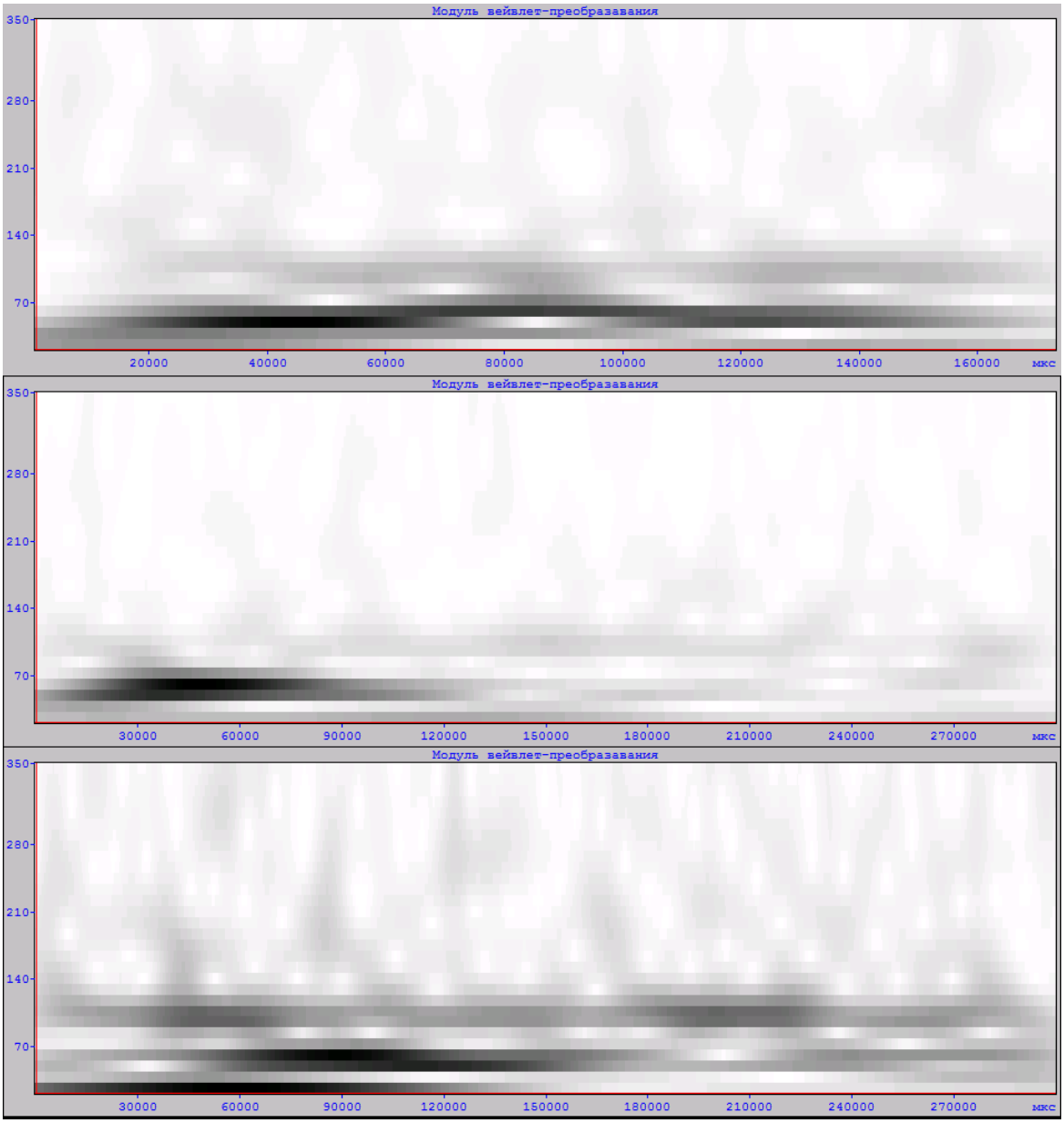


Рис. 4. Модули вейвлет-преобразования по каналам 1, 2, 3

Максимумы выделенных скелетонов и будут определять временные сдвиги по которым реализуются резонансные колебания по той или иной гармонике. Имеющиеся гребни позволяют определить зависимость мгновенной частоты каждой гармоники от времени (рис. 5). При выделении гребней лучше использовать амплитудный метод. Изображение вейвлет-спектров достаточно ясно выделяет наличие разномасштабной периодичности, содержащейся в анализируемых зависимостях. При этом ясно показано наличие появившихся частотных составляющих, которые не соответствуют собственным частотам рассматриваемого виброзащитного кресла (рис. 4).

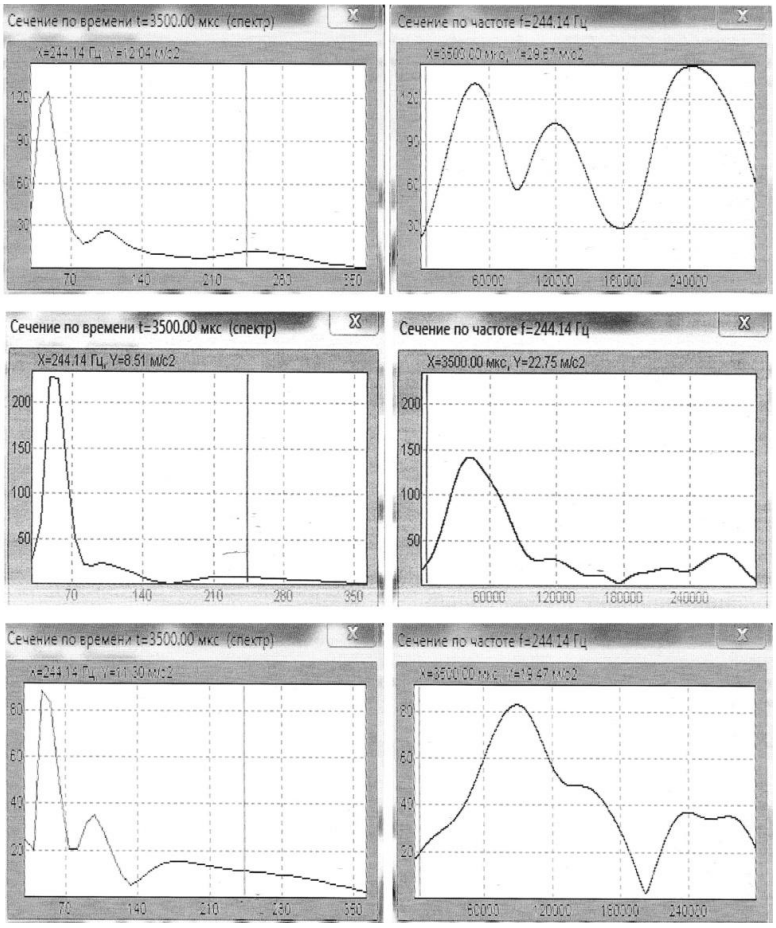


Рис. 5. Вейвлет-анализ вибросигнала по каналам 1, 2, 3

Таким образом Фурье и вейвлет спектрограммы дополняют друг друга, первая обнаруживает в анализируемых сигналах гармонические компоненты, а вторая позволяет локализовать гармоники по времени.

Применение предлагаемого метода на практике позволяет сократить время обследования за счет предварительного определения мест, на которые необходимо обратить особое внимание.

Библиографический список

1. Захезин, А.М. Метод неразрушающего контроля для определения зарождающихся дефектов при помощи Фурье и Вейвлет-анализа вибрационного сигнала / А.М. Захезин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и Архитектура». – 2013. – Т. 13. – № 2 – С. 28–34.

2. Захезин, А.М. Выбор параметров виброзащиты операторов крана / А.М. Захезин и др. // Вибрационная техника. – М.: МДНТП им. Дзержинского, 1988. – С. 133–137.

К содержанию

УДК 651.5.015

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОЦЕНКИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ

Е. П. Черногоров

Рассматриваются вопросы оценки адекватности математической модели с помощью проверки статистических гипотез о принадлежности одной генеральной совокупности реализаций эксперимента и математического моделирования этого эксперимента. Для оценки статистических характеристик модели предлагается метод имитационного моделирования.

Ключевые слова: модель; математическое ожидание; дисперсия; имитационное моделирование.

При математическом моделировании сложных технических систем с. понятие адекватности модели может служить оценкой качества модели и ее пригодности лишь для тех целей, для которых предназначена модель. Кроме того, источник информации о действительности подвержен воздействию шумов в измерительной системе, поэтому параметры и поведение системы нам не известны точно.

При определении степени адекватности математической модели мы должны иметь в распоряжении результат реакции реальной системы на некоторое входное воздействие, а затем сравнить эту реакцию с результатом математического моделирования при том же входном воздействии.

Можно считать, что модель системы позволяет нам моделировать некоторую генеральную совокупность. Имея отдельный эксперимент, воспроизводящий «жизнь» некоторой системы, мы можем утверждать, что имеем отдельную реализацию этой генеральной совокупности. На модели, воспроизводя условия эксперимента, мы также получаем реализацию генеральной совокупности. Количественная оценка адекватности будет заключаться в проверке статистических гипотез о принадлежности этих реализаций одной и той же генеральной совокупности.

Итак, имеем единичные реализации некоторых случайных процессов. Показания прибора, регистрирующего результаты эксперимента, можно представить в виде:

$$P(t) = \bar{P}(t) + \delta P(t),$$

где $\bar{P}(t)$ – истинное значение параметра, нам неизвестное; $\delta P(t)$ – помеха, вызванная шумом в измерительном тракте. Пусть эта помеха представляет собой некоторый стационарный эргодический случайный нормальный процесс с нулевым матожиданием и дисперсией σ^2.

$$\delta P(t) \sim N(0,\sigma).$$

σ^2 легко оценить по результатам тарировки измерительного тракта.

Модель, описывающая изменение параметра в ходе эксперимента, выдает результат в виде временного ряда $P_{\text{М}}(t)$ причем:

$$P_{\text{М}}(t) = \bar{P}_{\text{М}}(t) + \delta P_{\text{М}}(t),$$

где $\bar{P}_{\text{М}}(t)$ – матожидание результата, которое было бы на выходе модели, если бы мы точно знали входное воздействие на систему в ходе эксперимента; $\delta P_{\text{М}}(t)$ – ошибка модели, связанная с неточным знанием входных воздействий на систему. Предположим, что ошибка эта некоторый стационарный эргодический нормальный процесс с нулевым матожиданием и дисперсией $\sigma^2_{\text{М}}$:

$$\delta P_{\text{М}}(t) \sim N(0,\sigma_{\text{М}}),$$

Для подсчета дисперсии ошибки моделирования можно воспользоваться зависимостью:

$$\sigma^2_{\text{М}} = \sum_i \left(\frac{\partial P_{\text{М}}}{\partial \beta_i} \right)^2 \sigma^2_{\beta i},$$

где β_i – параметр или вход модели, известный нам с погрешностью, дисперсия которой $\sigma^2_{\beta i}$. Предполагается, что β_i не коррелированы между собой.

Теперь для разности $P(t) - P_{\text{М}}(t)$ можем записать:

$$P(t) - P_{\text{М}}(t) = \bar{P}(t) - \bar{P}_{\text{М}}(t) + \delta P_{\Sigma}(t),$$

где $\delta P_{\Sigma}(t)$ – некоторая эргодическая стационарная случайная функция с нулевым матожиданием и дисперсией:

$$\sigma^2_{\Sigma} = \sigma^2_{\text{М}} + \sigma^2,$$

$$\delta P_{\Sigma}(t) \sim N(0,\sigma_{\Sigma}).$$

Выдвигается нулевая гипотеза H_0: $\bar{P}(t) = \bar{P}_{\text{М}}(t)$.

В этом случае $\Delta P(t) = P(t) - P_{\text{М}}(t)$ – некоторый нормальный стационарный эргодический процесс, параметры которого должны совпадать с параметрами процесса $\delta P_{\Sigma}(t)$:

$$\Delta P(t) \sim N\left(M\left[\Delta P(t)\right], \sigma\left[\Delta P(t)\right]\right).$$

Задача состоит в том, чтобы проверить случайность или неслучайность расхождения $\Delta P(t)$ и $\delta P_{\Sigma}(t)$ Проверка нулевой гипотезы при наличии реализации $\Delta P(t)$ будет состоять из следующих операций:

1. Проверка гипотезы об эргодичности процесса $\Delta P(t)$, Как известно, достаточным условием эргодичности стационарной случайной функции является стремление к нулю ее автокорреляционной функции при $\tau \to \infty$:

$$k_x(\tau) = \frac{1}{n-m}\sum_{i=1}^{n+m}\left(x(t_i - m_x)\right)\left(x(t_{i+m} - m_x)\right),$$

где $m_x = \frac{\sum_{i=1}^{n} x(t_i)}{m}$; $x(t_i) = \Delta P(t_i)$ – значение исследуемой функции.

2. После проверки гипотезы об эргодичности, при эргодичности процесса $\Delta P(t)$, можно определить оценки этого процесса по одной его реализации. Оценку матожидания найдем как среднее по времени:

$$m_i = M\left(\Delta P(t_i)\right) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta P(t_i).$$

Оценку дисперсии можно определить как:

$$S_1^2 = S^2\left[\Delta P(t_i)\right] = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta P(t_i) - m_i\right)^2.$$

Для процесса $\delta P_{\Sigma}(t)$ имеем матожидание:

$$m_2 = M\left[\delta P_{\Sigma}(t)\right] = 0$$

и дисперсию:

$$S_2^2 = S_2^2\left[\delta P_{\Sigma}(t_i)\right] = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sigma_{\Sigma}^2(t_i).$$

При больших n ($n > 30$) эти оценки можно считать несмещенными, при $n < 30$ вместо n следует брать $\nu = n - 1$ – число степеней свободы.

Проверка гипотезы H_0 разбивается на 2 этапа.

1. Проверка гипотезы о равенстве дисперсий процессов $\Delta P(t)$ и $\delta P_{\Sigma}(t)$:

$$H_0': \quad \sigma^2\left[\Delta P(t)\right] = \sigma^2\left[\delta P(t)\right].$$

Для сравнения дисперсий применяют критерий Фишера (дисперсионное отношение – отношение оценок дисперсий S_1^2 и S_2^2).

Проверяется выполнение условия:

$$F_{\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)}(n) \geq \frac{S_1^2}{S_2^2}. \qquad (1)$$

В числителе берется большая из оценок S_1^2 и S_2^2. В случае выполнения условия (1) принимается гипотеза H_0'; в случае невыполнения – альтернативная гипотеза.

На следующем этапе проверяется основная гипотеза H_0'': $m_1 = m_2 = 0.$

Здесь возможны два направления,

1. $\sigma^2[\Delta P] = \sigma^2[\delta P_\Sigma].$

В этом случае m_1 подчиняется нормальному закону распределения, причем параметры этого распределения следующие:

$$N = \left(0, S^* \left(\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2}\right)^{\frac{1}{3}}\right),$$

где $S^{*2} = \dfrac{\nu_1 S_1^2 + \nu_1 S_1^2}{\nu_1 + \nu_2}.$

На основе этого можно сформулировать статистику Стьюдента:

$$t_{\nu_1+\nu_2} = \frac{m_1}{S^* \left(\frac{1}{\nu_1} + \frac{1}{\nu_2}\right)^{\frac{1}{2}}},$$

необходимую интервальную оценку:

$$\left|t_{\nu_1+\nu_2}\right| \geq t_{1-\frac{\alpha}{2}} \qquad (2)$$

и её вероятность наблюдения:

$$P\left\{\left|t_{\nu_1+\nu_2}\right| > t_\alpha\right\} = 2P\left\{\left|t_{\nu_1+\nu_2}\right| > t_{1-\frac{\alpha}{2}}\right\} = \alpha.$$

При больших числах степеней свободы $\nu_1 + \nu_2 > 30$ можно воспользоваться нормальным распределением вместо распределения Стьюдента, т.е. использовать статистику:

$$N = \frac{m_1}{\sqrt{\dfrac{S_\text{Т}^2 + S_\text{Э}^2}{\nu_1 + \nu_2}}},$$

которая дает более узкий доверительный интервал.

При выполнении условия (2) H_0'' отвергается, в случае альтернативного исхода $H_0'': m_1 = 0$ принимается.

2. Теперь рассмотрим случай $\sigma^2\left[\Delta P\right] \neq \sigma^2\left[\delta P_\Sigma\right]$.

Рассматриваемая задача сводится к задаче Беренса-Фишера [1] и для её решения не существует безупречного подхода. Приближенное решение этой задачи состоит в том, что для разности матожиданий постулируется значение дисперсии в виде соотношения:

$$S^{*2} = \frac{S_1^2}{\nu_1} + \frac{S_2^2}{\nu_2}.$$

Тогда статистика $y = \frac{m_1}{S^*}$ подчиняется нормальному закону распределения с параметрами $N(0,1)$.

Запишем для сформулированной статистики y интервальную оценку:

$$\left|y\right| \geq y_{1-\frac{\alpha}{2}}.$$

При выполнении этого условия гипотеза H_0'' отвергается, в случае альтернативного исхода принимается и, таким образом, принимается сама основная гипотеза.

Для оценки характеристик процесса $\delta P_{\text{М}}(t)$ предлагается метод статистического моделирования. В качестве примера рассмотрим некоторый тепломассообменный аппарат, входными воздействиями для модели которого является внешние тепловые потоки, расходы рабочих тел, а также начальные значения параметров состояния. В качестве выходных параметров можно взять расход, температуру и давление рабочего тела на выходе из аппарата.

Как правило, в ходе физического эксперимента входное воздействие оценивается с большей погрешностью, чем выходные параметры. Часто оценка характеристик этого процесса затруднена и имеются лишь сведения о случайной приборной погрешности. В этом случае, очевидно, можно считать приборную погрешность белым шумом с известной дисперсией.

Статистическая имитация физического эксперимента заключается в многократном математическом моделировании этого эксперимента, при котором начальные условия проведения эксперимента и параметры установки задастся в виде случайных чисел о математическими ожиданиями и дисперсиями, оцененными по результатам их измерений.

Вопросам имитации случайных величин и случайных функций в литературе уделено достаточное внимание.

Для имитации нормального марковского процесса, каковым, например, является временной ряд изменения среднемесячной температуры воздуха, можно воспользоваться зависимостями Т.Андерсона [2], по которым для нормального марковского процесса $\eta(t)$ имеем гауссово распределение с условным средним значением:

$$a\left(\frac{t}{y(S)}\right)=M\left\{\frac{\eta(t)}{y(S)}\right\}=a(t)+k(t,S)\left[k(S,S)\right]^{-1}\left(y(S)-a(S)\right)$$

и условней корреляционной матрицей:

$$k\left(\frac{t}{y(S)}\right)=k(t,t)-k(t,S)\left[k(S,S)\right]^{-1}k(S,t),$$

где $a(t)$ среднее значение процесса $\eta(t)$; $k(t,S)$ – корреляционная функция процесса; $y(S)$ – возможные значений процесса $\eta(t)$.

В результате статистического моделирования, получаем реализации случайного процесса – выходного параметра. Необходимо проверить стационарность и эргодичность расхождения результатов моделирования данных эксперимента.

Стационарность процесса можно проверить построением гистограмм в разных временных точках выходного параметра. Проверка допущения об эргодичности процесса может проводиться по достаточному условию эргодичности стационарной случайной функции, заключающемуся в том, что ее автокорреляционная функция стремится к нулю при $\tau\to\infty$:

$$k_x(\tau)=\frac{1}{n-m}\sum_{i=1}^{n-m}\left(x(t_i)-M_x\right)\left(x(t_{i+m})-M_x\right),$$

где $x(t_i)$ – значение исследуемой функций для *i*-го момента времени;

$$M_x=\sum_{i=1}^{n}\frac{x(t_i)}{n}.$$

Поскольку объем реализаций при статическом моделировании очень велик, обработку материала для получения значений иаточидании $x(t)$ следует организовать рекуррентными методами.

При воспроизведении очередной реализаций «жизни» системы на каж-ом временном шаге также происходит подсчет суммы значений выходного параметра:

$$x_{i\Sigma}(n)=x_{\Sigma}(n-1)+x_i(n);$$

$$x_{i\Sigma^2}(n)=x_{i\Sigma^2}(n-1)+\left(x_i(n)\right)^2.$$

Здесь n – порядковый номер реализации.

После окончания счета всех реализаций при достаточно большом числе реализаций ($n > 40$) можно найти искомые матожидание и дисперсию:

$$\overline{x}_i = \frac{x_\Sigma(n)}{n};\ \ \sigma_{ix}^2 = \frac{x_{i\Sigma^2}(n)}{n} - \left(x_{i\Sigma}\right)^2.$$

которые затем используются для оценки адекватности модели.

Библиографический список

1. Тутубалин, В.Н. Теория вероятностей / В.Н. Тутубалин. – М.: МГУ, 1972.

2. Полляк, Ю.Г. Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах / Ю.Г. Полляк. – М.: Сов.радио, 1971.

К содержанию

УДК 629.3.014.2.027.3

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОДАТЛИВОСТЬ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГУСЕНИЧНОГО ХОДА ТРАКТОРОВ

Ю.К. Яшков, А.Г. Гусев, Г.Ю. Сяськов, А.А. Смолий, А.С. Теребов

Рассматривается конструктивный способ повышения трибологических характеристик гусеничного хода мощных тракторов путем повышения динамической податливости элементов гусеничной цепи. Введение в конструкцию гусеничной цепи трактора демпфирующих элементов из многокомпонентных полимерных материалов (МКПМ) позволяет снизить динамические нагрузки, уменьшить потерина трение и повысить износостойкость пар трения.

Ключевые слова: трактор, гусеничный ход, динамическая податливость, демпфирующая способность, трение, износ, полимерные материалы, эксплуатационные испытания.

Гусеничный ход тракторов является одним из основных элементов в реестре эксплуатационных затрат тракторов и бульдозеров, особенно при работе на обводненных грунтах с большим содержанием кварца [1]. Гарантийная наработка бульдозеров Чебоксарского агрегатного завода при таких условиях работы до ремонта с разборкой и заменой многих узлов и деталей может составлять 700…1200 моточасов [2]. Такого же порядка составляет рабочий ресурс гусеничной цепи у тракторов инофирм Komatsu, Katerpillar и др. [3]. Основные быстро изнашивающиеся элементы гусеничного хода – это шарниры

цепей, втулки цепей по наружной поверхности, звенья цепи по рабочей трущейся поверхности, рабочие поверхности зубьев ведущих колес-звездочек, рабочие трущиеся поверхности и подшипниковые опоры катков.

Предпринимаемые меры по повышению эксплуатационного ресурса гусеничного хода, в частности, новые уплотнительные устройства, некоторое повышение точности сопряжений, дополнительные устройства для смазывания, значительно усложняя конструкцию в целом, обеспечивают увеличение ресурса до 30 %.

Среди мер по восстановлению работоспособности и увеличению ресурса гусеничного хода распространен способ ремонта с наплавкой изношенных деталей; в фирме Lenser практикуется способ с разборкой гусеничной цепи с последующим разворотом на 180° изношенных деталей. Более эффективной оказалась новая конструкция шарнира цепи с так называемой «двойной втулкой», при которой существенно повысилась износостойкость многих элементов гусеничного хода [3]. При некотором усложнении устройства и технологии изготовления конструкция не работоспособна при отдельных условиях эксплуатации. В работе [4] рассматривается перспективность способа снижения динамических нагрузок в гусеничном ходе посредством применения элементов из резины; в работе [5] – повышение эксплуатационных характеристик гусеничного хода путем применения в опорных узлах металлических втулок с полимерным покрытием. Эти конструктивные мероприятия практически не применимы к тяжелым гусеничным машинам.

Одним из факторов, обуславливающих интенсивный износ, является традиционная недостаточно совершенная конструкция гусеничного хода, когда основным способом увеличения рабочего ресурса деталей остается повышение твердости трущихся поверхностей.

Интенсивному износу способствует пониженная точность и повышенные зазоры в подвижных соединениях гусеничного хода, приводящих к дополнительным динамическим нагрузкам и резко уменьшающих фактическую площадь контакта.

Уменьшают рабочий ресурс гусеничного хода нерационально сконструированные опорные узлы, недостаточно эффективные устройства их уплотнения, их низкая ремонтопригодность.

В устройстве ходовой части тракторов отсутствуют демпфирующие элементы, которые могли бы за счет повышенной динамической податливости снижать пиковые нагрузки в трибосопряжениях, которые во многом определяют их износостойкость. Последнее важно в условиях несовершенного линейно – точечного контакта трущихся деталей, в т.ч. фрикционного контакта механически необработанных деталей, характеризующегося резкой разницей фактической и номинальной площади контакта.

Динамическая податливость и обусловленная ей демпфирующая способность – способность рассеивать механическую энергию при циклическом нагружении в упругой области за счет внутреннего трения в материале – может характеризоваться величиной логарифмического декремента затухания колебаний $\delta = \lambda T$, где λ – коэффициент затухания, Т – период одного цикла колебаний. Для сравнения величина логарифмического декремента равна для стали 0,02…0,06, для конструкционных полимерных материалов 1,2…4,5.

Относительная демпфирующая способность характеризуется коэффициентом:

$$\eta = 2\,\theta\,E \cdot 100/F^2,$$

где: θ – работа деформирования,

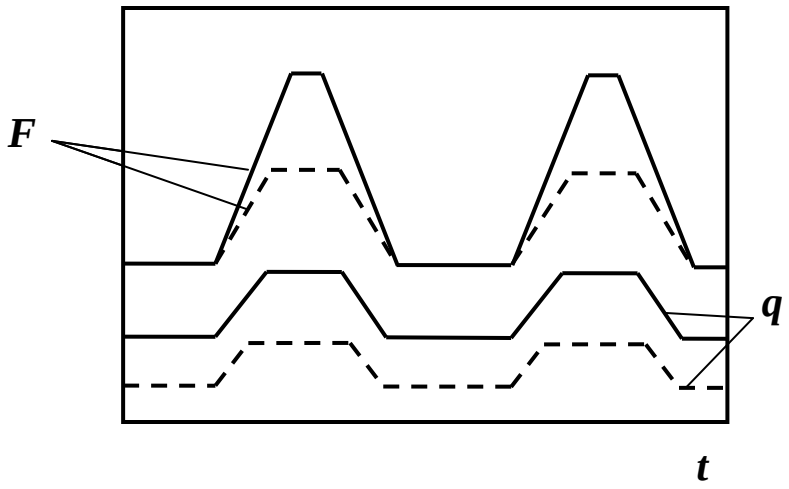
F – нагрузка,

E – модуль упругости.

Величина коэффициента относительной демпфирующей способности равна для стали 0,2…0,4, для конструкционных полимерных материалов 11… 21,5.

Повышенная динамическая податливость элементов гусеничного хода может быть достигнута путем выполнения отдельных элементов из упруго-эластичных конструкционных полимерных материалов, нормальный модуль упругости которых в 30…70 раз меньше чем у металлов. Элементы повышенной податливости за счет уменьшения кромочных явлений будут способствовать более равномерному распределению нагрузки по поверхностям трения, что также приводит к повышению их износостойкости.

Характер действия общей и максимальной удельной нагрузки, ее динамической составляющей в парах трения гусеничного хода тракторов при внесении в устройство упруго-эластичного элемента повышенной податливости показан на рисунке.



Общая (F) и удельная (q) нагрузка в парах трения
——— без податливого элемента
– – – – податливым элементом

В Лаборатории полимерных трибоматериалов Аэрокосмического факультета университета выполняются разработки по модернизации гусеничного хода тракторов в направлении повышения динамической податливости узлов и конструкции в целом и улучшения трибологических характеристик пар трения. Проверяется влияние этих элементов на достижение более высоких показателей нагрузочной способности и износостойкости ходовой части тракторов. Разрабатываются конструкции с элементами податливости – опорные и поддерживающие катки, гусеничные цепи. В качестве упруго – эластичных элементов в гусеничной цепи выступают металлопластмассовые шарниры с трущимися элементами из специально разработанных многокомпонентных полимерных материалов (МКПМ). На испытательном стенде с максимальным обеспечением критериев подобия по геометрическим параметрам и условиям нагружения определялись фрикционные характеристики пар трения в шарнире гусеничной цепи – типовой «закаленная сталь по закаленной стали» и экспериментальной «закаленная сталь по полимерному материалу МКПМ». Установлено значительное – в 1,6…2,2 раза – снижение динамического и статического коэффициента трения у экспериментальной пары трения.

На предприятии «УралСпецМаш» впервые (как нам известно – в мировой практике) были изготовлены опытные гусеницы с металлопластмассовыми шарнирами для мощного трактора. На Белоносовском песчаном карьере (Челябинская обл.) проведены эксплуатационные испытания бульдозера Т-130, оборудованного такими гусеницами. Предварительные результаты 2-хлетних испытаний показывают – наработка по износу шарниров и звеньев цепи увеличилась в 2,3 раза, по износу зубьев ведущих звездочек увеличилась в 3,8 раза, по износу опорных катков увеличилась в 1,3 раза (испытания продолжаются).

Выполненные экспериментальные разработки и их первые результаты позволяют утверждать, что выбранное направление модернизации ходовой части тяжелых гусеничных машин является перспективным, требующим обстоятельного исследования и дальнейшего развития.

Библиографический список

1. Гусев, С.А. Расчет затрат на ходовую часть гусеничных промышленных тракторов / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 9. – С. 28–31.

2. Гусев, С.А. Влияние конструкции гусеницы промышленного трактора на ее потребительские свойства / С.А. Гусев // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 9. – С. 10–16.

3. Модернизированная гусеничная лента ходовой части бульдозера // Строительные и дорожные машины. – 2013. – № 4. – С. 4–7.

4. Коростелев, С.А. О снижении динамических нагрузок в паре бандаж опорного катка – беговая дорожка звена / С.А. Коростелев, В.Н. Скоков // V Международная научно-практическая конференция. Сборник статей. – Барнаул, 2010. – С. 485–487.

5. Моргунов, А.П. Эксплуатационные испытания метало-полимерных подшипников скольжения многоцелевых гусеничных машин / А.П. Моргунов, Д.С. Звездин // Анализ и синтез механических систем. Сб. науч. трудов / под ред. В.В. Евстифеева. – Омск, 2006. – С. 74–78.

К содержанию

УДК 621.527.4 + 621.51 + 621.69

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОГО СТРУЙНОГО НАСОСА НА ЕГО СТЕПЕНЬ СЖАТИЯ И КПД

А.Р. Исмагилов, Е.К. Спиридонов

Предложена обобщенная схема жидкостно-газового струйного насоса, которая позволяет реализовывать мероприятия по плавному сжатию газа. Приведена система уравнений и получены графики, с помощью которых можно определить вклад каждого элемента струйного насоса на величину степени сжатия газа и КПД аппарата. Даны рекомендации о целесообразности использования диффузора, выхлопного цилиндрического патрубка и двухступенчатого сжатия газа.

Ключевые слова: прыжок перемешивания, степень сжатия газа, КПД, ступень, рабочая камера, диффузор, выхлопной цилиндрический патрубок, вариант исполнения.

Жидкостно-газовые струйные насосы (ЖГСН, эжекторы) в силу простоты конструкции, многофункциональности и надежности широко распространены во многих отраслях промышленности: в металлургии, энергетике, химической, нефтегазовой, пищевой, машиностроительной и др.

В системах глубокого вакуумирования зачастую эжекторы работают на режимах, при которых КПД не высок, а потребляемая мощность достигает чрезмерно больших величин. Например, в энергетике струйные аппараты широко применяются для вакуумирования конденсаторов паровых турбин. При использовании водоструйных эжекторов массовый расход жидкости составляет $m_ж$ = 1100…1500 т/ч [1]. В металлургии эжекторы применяются в процессах дегазации металла (метод внепечной обработки жидкого металла), где также присутствуют неоправданно высокие расходы рабочей среды. Так, рас-

ход рабочей среды (пара) на работу пароструйных эжекторов составляет 40 т/ч, а расход воды на конденсаторы, входящих в эжекционный вакуумный агрегат, – $m_ж$ = 1300…1600 т/ч [2]. При длительной эксплуатации даже незначительное снижение массового расхода жидкости приводит к ощутимой экономии потребляемой мощности.

Таким образом, совершенствование существующих и разработка новых высокоэффективных струйных насосов составляют актуальную проблему для экономики России.

Потребная степень повышения давления в ЖГСН на многих промышленных установках достаточно велика и составляет 20…30 и более единиц. Исследования [3] показывают, что при таких степенях сжатия газа достижимые КПД ЖГСН не велики и не превышают 15…20 %. Это связано с тем, что основная составляющая всей степени сжатия газа сосредоточена в прыжке перемешивания, который представляет собой ударное явление перемешивания разноплотных сред, сопровождаемое резким возрастанием давления и снижением скорости потоков [4]. При этом ударное перемешивание сопровождается безвозвратным рассеиванием части механической энергии, трансформирующейся в тепло, величина которого увеличивается с ростом степени сжатия газа.

Чтобы снизить потери энергии в ЖГСН, уменьшив степень сжатия газа в прыжке перемешивания, целесообразно использовать мероприятия по плавному повышению давления вдоль проточной части ЖГСН, а именно:

1) двухступенчатое сжатие газа;

2) трансформацию избыточной кинетической энергии;

3) использование эффекта гравитации на завершающем участке проточной части струйного аппарата [5].

Реализовать эти мероприятия позволяет обобщенная схема ЖГСН, которая представлена на рис. 1. Схема состоит из четырех блоков: первой ступени I, второй ступени II, диффузора *7* и вертикального цилиндрического патрубка (ВЦП) *8*. Первая и вторая

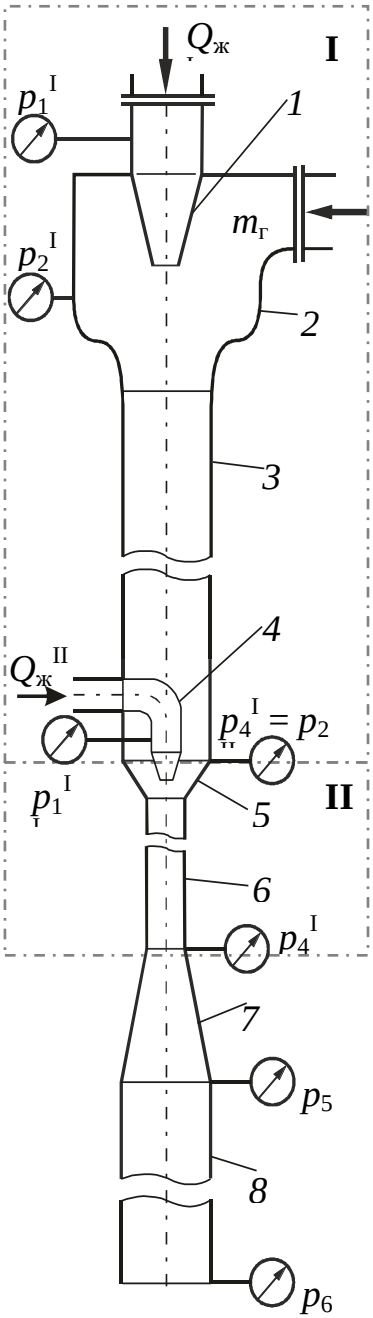


Рис. 1. Обобщенная схема ЖГСН

ступени являются составными. В первую ступень I входят: сопло питания *1*, приемная камера *2* и камера смешения (рабочая камера) *3*. Вторая ступень II содержит дополнительное сопло питания *4*, конфузор *5* и камеру смешения (рабочая камера) *6*.

Принцип работы аппарата состоит в следующем: активный поток – жидкость, истекая из сопла питания *1* первой ступени I с объемным расходом жидкости $Q_{ж}^{I}$, устремляется в камеру смешения *3* (рабочая камера) первой ступени I и одновременно увлекает пассивную среду – газ с объемным расходом $Q_{г2}$ из приемной камеры *2*. После камеры смешения *3* первой ступени I квазиоднородная газожидкостная смесь поступает ко второй ступени II. Струей жидкости $Q_{ж}^{II}$, истекающей из сопла питания *4* второй ступени II, происходит увлечение газожидкостной смеси. Далее через конфузор *5* газожидкостная смесь попадает в рабочую камеру *6* второй ступени II. В диффузоре *7* избыточная кинетическая энергия жидкостно-газового потока трансформируется в потенциальную, вследствие чего его давление повышается с p_4^{II} до p_5. Далее после диффузора *7* под давлением p_5 смесь поступает в ВЦП *8*.

Основными безразмерными параметрами ЖГСН в таком исполнении являются степени снижения давления на сопловом устройстве первой и второй ступени $\varepsilon_{12}^{I} = p_1^{I} / p_2^{I}$, $\varepsilon_{12}^{II} = p_1^{II} / p_2^{I}$; степени сжатия $\varepsilon_{62} = p_6 / p_2^{I}$, $\varepsilon_{52} = p_5 / p_2^{I}$, $\varepsilon_{42}^{I} = p_4^{I} / p_2^{I}$; $\varepsilon_{42}^{II} = p_4^{II} / p_2^{I}$; объемные коэффициенты эжекции $\alpha_{г}^{I} = Q_{г2}^{I} / Q_{ж}^{I}$, $\sum\alpha_{г2} = Q_{г2}^{I} / (Q_{ж}^{I} + Q_{ж}^{II})$ и КПД:

$$\eta = \frac{m_{г} \cdot R_{г} \cdot T_{ж} \cdot \ln \dfrac{p_6}{p_2^{I}}}{Q_{ж}^{I} \cdot \left(\bar{p}_1^{I} - p_6 \right) + Q_{ж}^{II} \cdot \left(\bar{p}_1^{II} - p_6 \right)}. \qquad (1)$$

Их можно найти, решая систему уравнений (2)–(8), которая получена из уравнений неразрывности, количества движения, энергии, изотермического состояния жидкостно-газовой смеси [6, 7]:

$$\Gamma^{I} = 2 \cdot (\varphi^{I})^2 \cdot (\varepsilon_{12}^{I} - 1) \qquad (2)$$

$$\varepsilon_{42}^{I} = 0{,}5 \cdot \left(\varepsilon_{42x}^{I} + \sqrt{\left(\varepsilon_{42x}^{I} \right)^2 - \frac{4 \cdot c^{I} \cdot \alpha_{2г}^{I} \cdot \left(\Omega_{03}^{I} \right)^2 \cdot \Gamma^{I}}{k_{П4}^{I} \cdot k_{Т}}} \right); \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{42}^{I} \cdot \varepsilon_{32}^{II} \cdot \left(1 + \frac{\delta_{г2} \cdot u_{г}^{II}}{u_{ж}} \cdot \ln(\varepsilon_{42}^{I} \cdot \varepsilon_{32}^{II}) \right) = 1 + (1 + u_{г}^{I}) \cdot (\varepsilon_{12}^{II} \cdot \varepsilon_{32}^{II} - 1) \times$$
$$\times \left((1 + \zeta_{23}^{II}) \cdot \left(\frac{\Omega_{03}^{II}}{1 - \Omega_{03}^{II}} \cdot (u_{ж} + \delta_{г2} \cdot u_{г}^{II} \cdot \varepsilon_{42}^{I} \cdot \cdot \varepsilon_{32}^{II}) \right)^2 - \left(\Omega_{03}^{II} \cdot \Omega_{конф} (u_{ж} + \delta_{г2} \cdot u_{г}^{II}) \right)^2 \right); \qquad (4)$$

$$\Gamma^{II} = 2 \cdot (\varphi^{II})^2 \cdot (\varepsilon_{12}^{II} / \varepsilon_{42}^{I} - 1) \qquad (5)$$

$$\varepsilon_{42}^{\text{II}} = 0{,}5 \cdot \varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \left[z + \sqrt{z^2 - 4 \cdot \Gamma^{\text{II}} \cdot c^{\text{II}} \cdot (\Omega_{03}^{\text{II}})^2 \cdot \delta_{\text{г}3}^{\text{II}} \cdot u_{\text{г}}^{\text{II}} \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{г}}^{\text{II}})} \right] \quad (6)$$

$$(1 + u_{\text{ж}}^{\text{II}}) \cdot \frac{\varepsilon_{52}}{\varepsilon_{32}^{\text{II}}} + \delta_{\text{г}3}^{\text{II}} \cdot u_{\text{г}}^{\text{II}} \cdot \ln(\frac{\varepsilon_{52}}{\varepsilon_{42}^{\text{II}}}) + \frac{\Gamma^{\text{II}}}{2} \cdot \left(1 + u_{\text{ж}} + \frac{\varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \delta_{\text{г}3}^{\text{II}} \cdot u_{\text{г}}^{\text{II}}}{\varepsilon_{52}} \right)^2 \times$$

$$\times \left(\frac{\Omega_{03}^{\text{II}}}{\Omega_{54}} \right)^2 \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{г}}^{\text{II}}) = (1 + u_{\text{ж}}) \cdot \frac{\varepsilon_{42}^{\text{II}}}{\varepsilon_{32}^{\text{II}}} + \quad (7)$$

$$+ \frac{\Gamma^{\text{II}}}{2} \cdot \left(\Omega_{03}^{\text{II}}\right)^2 \left(1 + u_{\text{ж}} + \frac{\varepsilon_{32}^{\text{II}} \cdot \delta_{\text{г}3}^{\text{II}} \cdot u_{\text{г}}^{\text{II}}}{\varepsilon_{52}} \right)^2 (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{г}}^{\text{II}}) \cdot (1 - \zeta_{45}).$$

$$\varepsilon_{62} = \varepsilon_{52} + \Pi_6 - \zeta_{56} \cdot \frac{\Gamma_{6\text{c}}}{2} \quad (8)$$

Здесь

$$z = 1 + \Gamma^{\text{II}} \cdot \Omega_{03}^{\text{II}} \cdot \left(1 + (u_{\text{ж}} + u_{\text{г}}^{\text{II}}) \cdot \frac{\Omega_{03}^{\text{II}}}{1 - \Omega_{03}^{\text{II}}} \cdot (u_{\text{ж}} + \delta_{\text{г}3}^{\text{II}} \cdot u_{\text{г}}^{\text{II}}) - c^{\text{II}} \cdot \Omega_{03}^{\text{II}} \cdot (1 + u_{\text{ж}} + u_{\text{г}}^{\text{II}}) \times \right.$$

$$\left. \times (1 + u_{\text{ж}}) \right);$$

$\Gamma^j = (\rho_{\text{ж}} \cdot (U_{\text{ж}0}{}^j)^2) / p_2{}^{\text{I}}$ – динамический параметр струи j-й ступени;

φ^j – коэффициент скорости сопла j-й ступени;

$\varepsilon_{42\text{x}}^{\text{I}} = 1 + \Gamma^{\text{I}} \cdot \Omega_{03}^{\text{I}} \cdot \left(1 - c^{\text{I}} \cdot \Omega_{03}^{\text{I}}\right)$ – степень повышения давления в рабочей камере первой ступени I при холостом режиме работы струйного насоса ($m_{\text{г}} = 0$; $k_T = T_{\text{г}} / T_{\text{ж}}$ – поправочный коэффициент на различие температур; $k_{\Pi i}{}^j = 1 - p_{\text{н.п.}} / p_i{}^j$ – поправочный коэффициент на давление насыщенных паров жидкости в i-ом сечении j-й ступени; $\delta_{\text{г}i}{}^{\text{II}} = \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{г}i}{}^{\text{II}}$ – относительный удельный объем газа; $u_{\text{г}}^j = m_{\text{г}} / m_{\text{ж}}{}^j$ – массовый коэффициент эжекции по газу j-й ступени; $u_{\text{ж}} = m_{\text{ж}}{}^{\text{I}} / m_{\text{ж}}{}^{\text{II}}$ – массовый коэффициент эжекции по жидкости; $c^j = 1{+}0{,}5 \cdot \zeta_{34}{}^j$ – параметр сопротивления для j-й ступени; $\zeta_{34}{}^j$, $\zeta_{\text{конф}}$, $\zeta_{\text{диф}}$ – коэффициенты сопротивления рабочей камеры j-й ступени, конфузора и диффузора; ζ_{56} – коэффициент сопротивления вертикального цилиндрического канала; $\zeta_{\text{конф}}$ – коэффициент сопротивления конфузора; $\Omega_{\text{конф}}$ – относительное сужение конфузора; $\Omega_{03}{}^j = A_0{}^j / A_3{}^j$ – относительная площадь сопла j-й ступени; $\Omega_{\text{диф}} = A_5 / A_4$ – относительное расширение диффузора. $\Pi_6 = \rho_{\text{с}6} \cdot g \cdot L_{56} / p_2{}^{\text{I}}$ – относительное весовое давление столба жидкостно-газовой смеси в ВЦП; $\Gamma_{6\text{c}} = \rho_{\text{с}6} \cdot (U_{\text{с}6})^2 / p_2{}^{\text{I}}$ – динамический параметр потока в ВЦП.

Детально исследовались как одноступенчатый (включающий блоки первой ступени I, диффузора *7* и ВЦП *8*), так и двухступенчатый (включающий блоки первой I и второй II ступени, диффузора *7* и ВЦП *8*) варианты испол-

нения ЖГСН. Итоговая система уравнений (2)–(8) является универсальной. В случае одноступенчатого варианта исполнения ЖГСН система состоит из уравнений (2), (3), (7) и (8), где $u_г^{II}$ приравнивается к нулю.

С помощью уравнений (2)–(8) были рассчитаны и построены безразмерные характеристики одноступенчатого (рис. 2, 3) и двухступенчатого (рис. 4–8) вариантов исполнения ЖГСН. При расчетах учитывались ограничительные условия по предельной структуре потока [8], по предельному коэффициенту скольжения фаз, по наличию пузырькового и дозвукового течений [7].

Графики на рис. 2–8 были получены на основе экстремальных характеристик [6] для первой ступени и выражений (1), (4)–(6), (8). При этом взаимосвязь между параметрами ε_{42}^{I}, ε_{42}^{II}, ε_{52}, ε_{62}, ε_{12}^{I}, ε_{12}^{II}, $\alpha_{2г}^{I}$, $\sum\alpha_{г2}$, Ω_{03}^{I} и Ω_{03}^{II} позволяет получить наилучшие, с точки зрения максимального КПД, показатели работы аппарата. Расчеты проводились при длине ВЦП равной 2,5 м, абсолютной температуре жидкости $T_ж$ = 283 К и газа $T_г$ = 304 К, коэффициентах скорости сопла $\varphi^{I} = \varphi^{II}$ = 0,95; коэффициентах сопротивления ζ_{34}^{I} = 0,4; ζ_{34}^{II} = 0,4, ζ_{23}^{II} = 0,1, ζ_{45}^{II} = 0,1, ζ_{56}^{II} = 0,2; относительном сужении конфузора $\Omega_{конф}$ = 0,44; относительном расширении диффузора Ω_{54} = 4

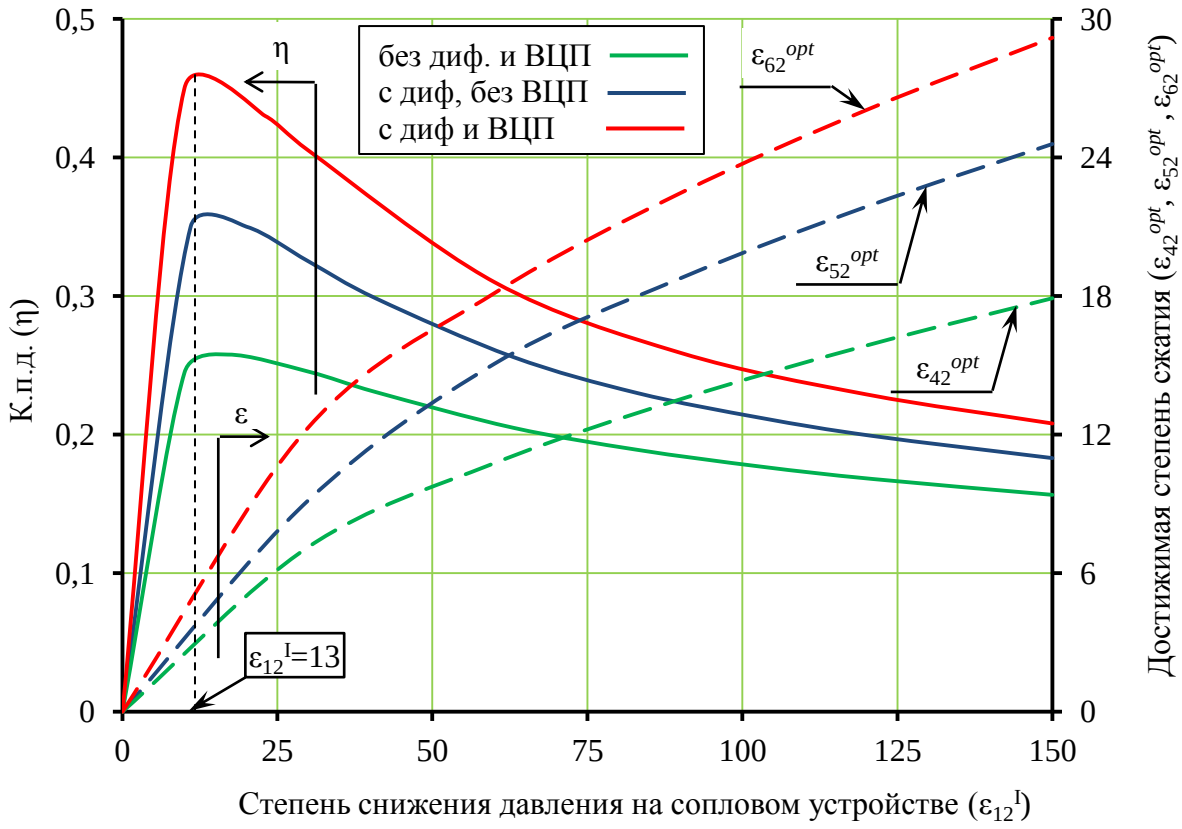


Рис. 2. Достижимые к.п.д. и степени сжатия одноступенчатого ЖГСН

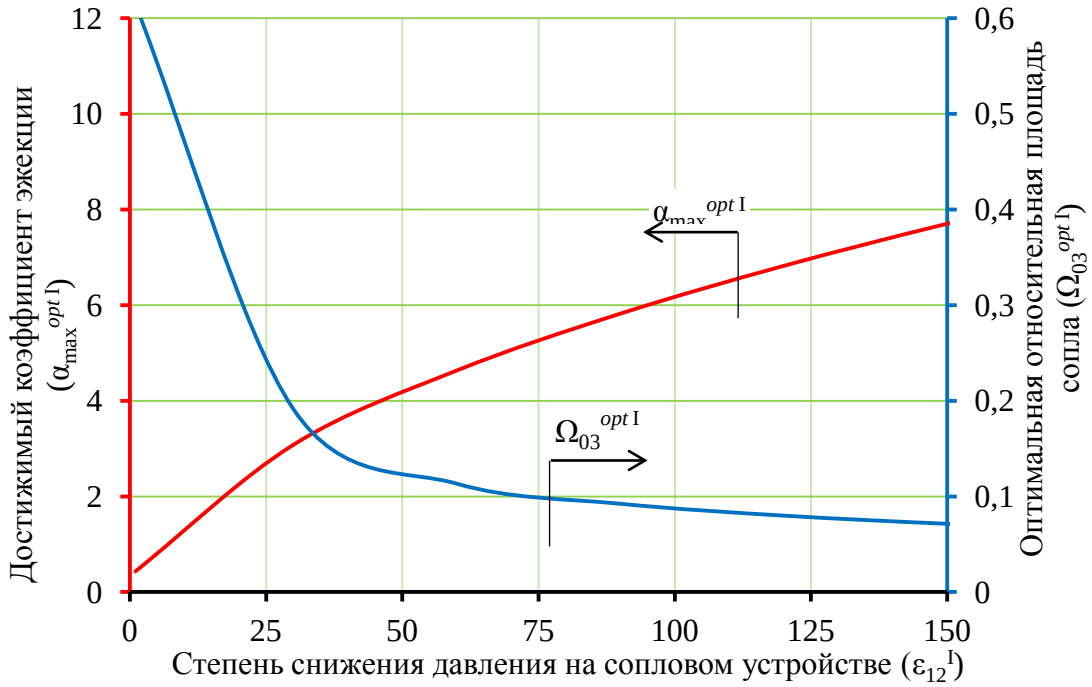


Рис. 3. Достижимый коэффициент эжекции и оптимальная относительная площадь сопла одноступенчатого ЖГСН

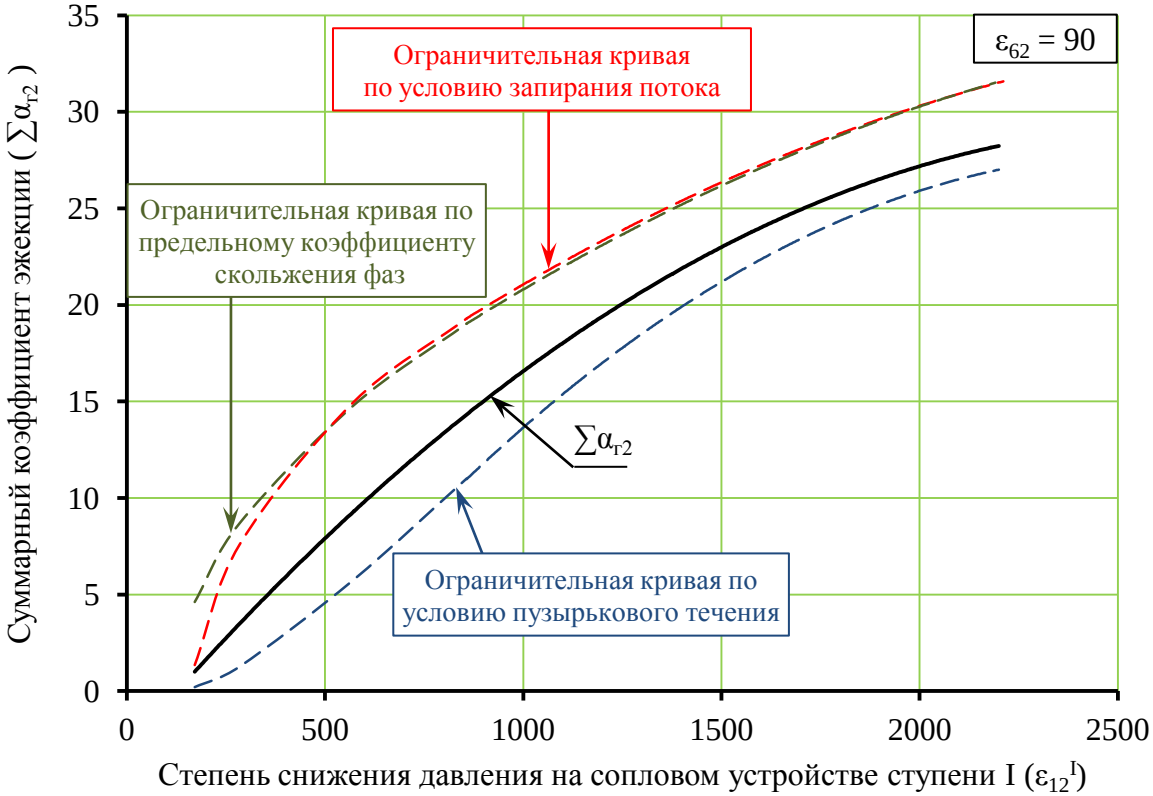


Рис. 4. Безразмерные характеристики зависимости суммарного коэффициента эжекции от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН (ε_{62} = 90)

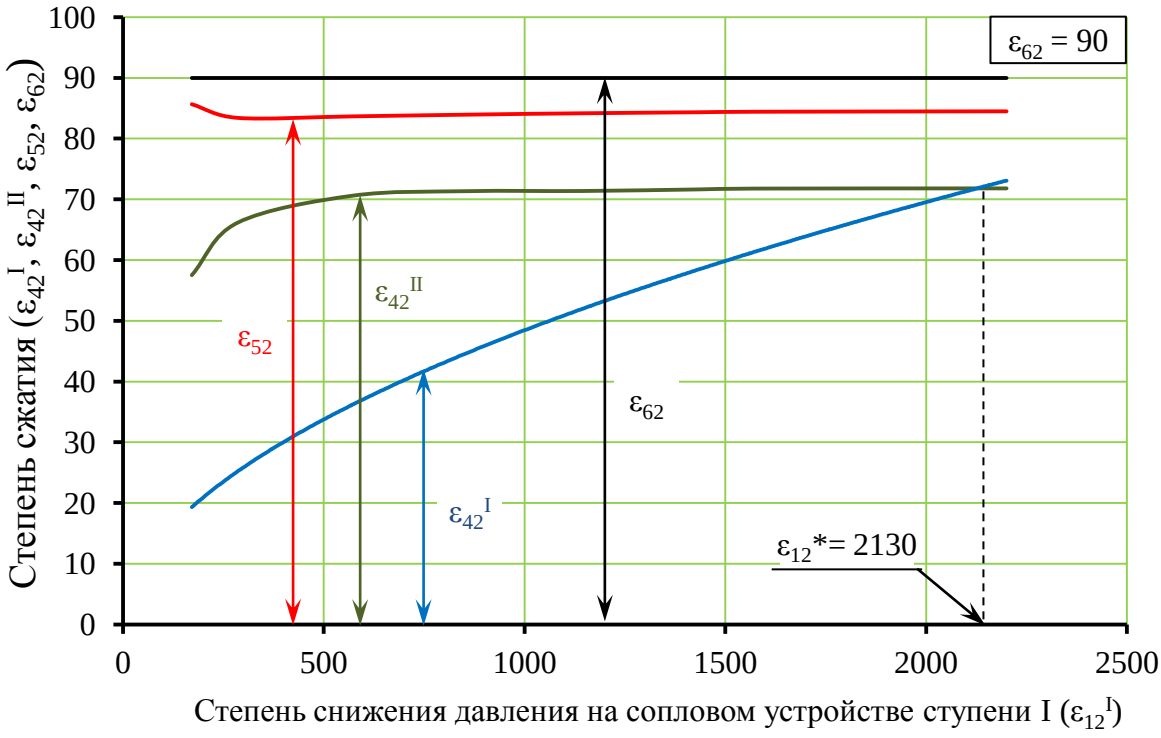


Рис. 5. Безразмерные характеристики зависимости степеней сжатия от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН ($\varepsilon_{62} = 90$)

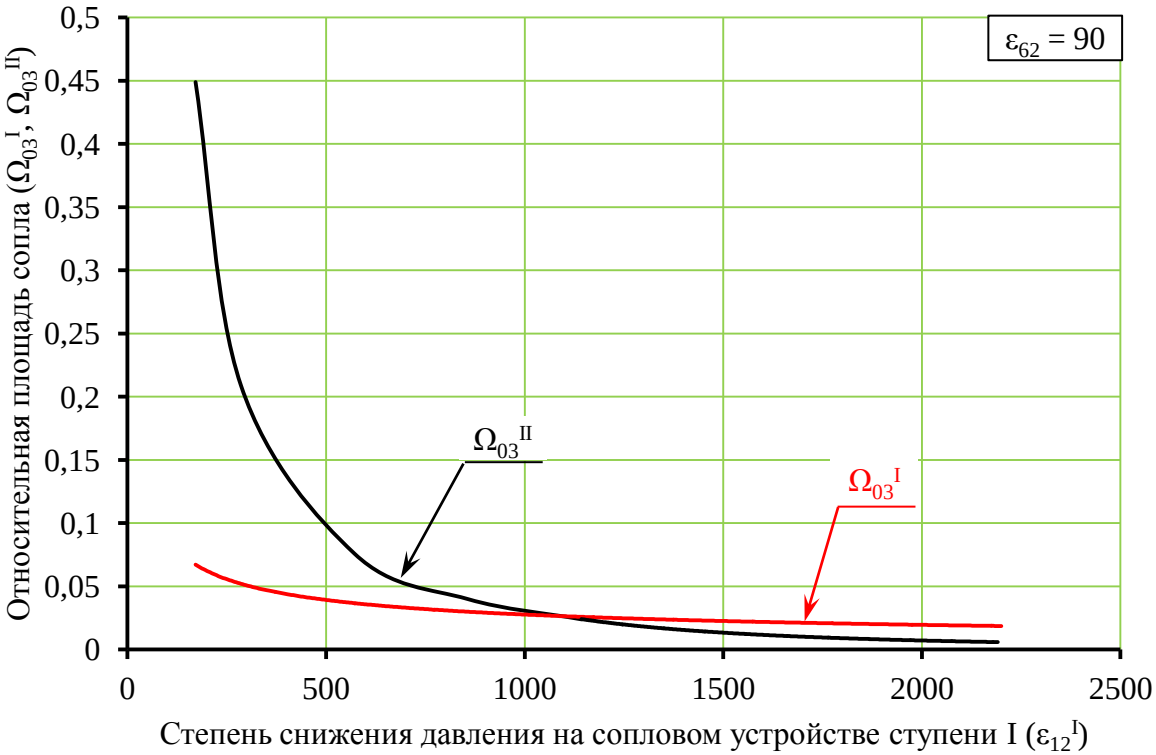


Рис. 6. Зависимость относительной площади сопла от степени снижения давления на сопловом устройстве первой ступени двухступенчатого ЖГСН ($\varepsilon_{62} = 90$)

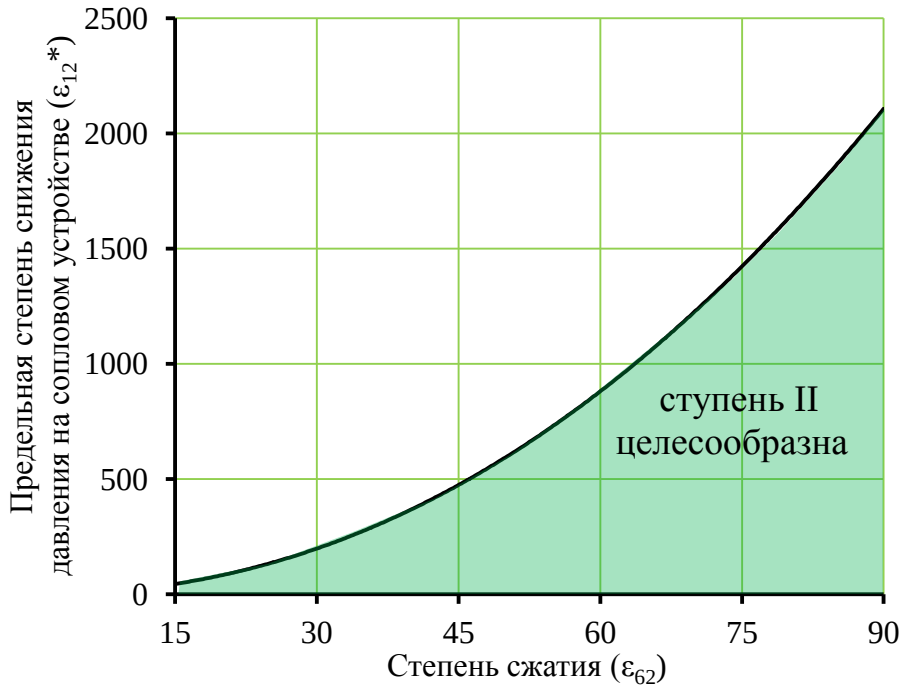


Рис. 7. Зависимость предельной степени снижения давления на сопловом устройстве от степени сжатия двухступенчатого ЖГСН ($\varepsilon_{12}^{I} = \varepsilon_{12}^{II}$)

Анализ характеристик показал, что:

1) для одноступенчатого ЖГСН, степени сжатия ε_{42}^{I} (ε_{52}, ε_{62}) растут с увеличением степени снижения давления на сопловом устройстве ε_{12}^{I} (см. рис. 2). Вклад каждого элемента в общую степень сжатия ε_{62} зависит от режима работы. Причем с увеличением параметров ε_{12}^{I}, $\alpha_{2г}^{I}$ данный вклад увеличивается. Существует такая взаимосвязь параметров, при которой эффективность работы аппарата наибольшая. Области ограниченные кривыми наибольших степеней сжатия одноступенчатого ЖГСН указывают на целесообразность применения диффузора и ВЦП;

2) при выполнении ЖГСН в двухступенчатом варианте важным внутренним параметром, отражающим эффективность его работы, является промежуточное давление $p_4^{I} = p_2^{II}$;

3) эффективность применения двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН зависит во многом от соотношения давления на сопловом устройстве первой ступени ε_{12}^{I}. С увеличением параметра ε_{12}^{I} вклад рабочей камеры второй ступени ($\varepsilon_{42}^{II} - \varepsilon_{42}^{I}$) в общую степень сжатия ε_{62} постепенно уменьшается и при определенном параметре $\varepsilon_{12}^{I}*$ – равен нулю (см. рис. 5);

4) область целесообразного использования двухступенчатого варианта исполнения ЖГСН ограничена и лежит ниже кривой предельной степени снижения давления на сопловом устройстве $\varepsilon_{12}^{I}*$ в зависимости от степени сжатия ε_{62} (см. рис. 7).

Библиографический список

1. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

2. Подзерко, А.В. О возможном использовании жидкостно-газовых эжекто-ров в многоступенчатых системах вакуумирования / А.В. Подзерко // Динамика машин и рабочих процессов: сб. докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 141–144.

3. Спиридонов, Е.К. Анализ эффективности работы жидкостногазового эжектора в системах вакуумирования / Е.К. Спиридонов, В.К. Темнов, А.Б. Шпитов // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Тематич. сб. научн. трудов. – 1989. – С. 135–140.

4. Witte, J.H. Mixing Shocks in Two-Phase Flow / J.H. Witte // The Journal of Fluid Mechanicks. – 1969. – Vol. 36., part 4. – Pp. 639–655.

5. Спиридонов, Е.К. Об энерго- и ресурсосбережении при эксплуатации водовоздушных струйных насосов систем глубокого вакуумирования / Е.К. Спиридонов, А.Р. Исмагилов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20. – № 33 (292). – С. 13–20.

6. Спиридонов, Е.К. Теоретические положения оптимального синтеза жидкостно-газовых струйных аппаратов и систем на их основе / Е.К. Спиридонов // Наука и технологии: тр. XXIII Росс. шк. М.: РАН, 2003. – С. 414–431.

7. Спиридонов, Е.К. Энергетические характеристики процесса эжектирования газожидкостных сред в струйном аппарате / Е.К. Спиридонов, А.В. Подзерко // Доклады секции «Гидравлика и гидропневмосистемы» 50-й юбилейной НТК 14–16 апреля 1998 г. – 1998. – С. 111–115.

8. Спиридонов, Е.К. Исследование предельных режимов работы двухфазного эжектора / Е.К. Спиридонов, СБ. Школин // Вестник ЮУрГУ. Сер.: «Машиностроение». – 2008. – Вып. 11, № 10(110). – С. 55–61.

К содержанию

УДК 621.655.9

ГИДРОДИНАМИКА И ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕСКЛАПАННОГО НАСОСА С ГИДРОДИОДАМИ

Е.К. Спиридонов, Д.Ф. Хабарова

Исследован рабочий процесс бесклапанного поршневого насоса с гидравлическими диодами и выведено аналитическое выражение расходно-напорной характеристики. Показано, что подача насоса существенно зависит от перепада давлений – с увеличением перепада давлений, подача уменьшается. Основными параметрами, влияющими на расходно-напорную характеристику насоса, являются диодность по сопротивлению гидродиодов и частота вращения кривошипа – с их увеличением, характеристика улучшается.

Ключевые слова: поршневой насос, клапаны, гидравлический диод, рабочий процесс, расчетная модель, подача, расходно-напорная характеристика.

В промышленности получили распространение поршневые насосы с клапанным распределением. Однако их применение затруднено в химической, медицинской и пищевой промышленности вследствие нежелательного воздействия рабочих органов гидромашины (например, клапанов) на жидкость. При перекачивании абразивных гидросмесей эксплуатация насосов сопряжена с большими затратами на их ремонт из-за интенсивного износа (в том числе и клапанов). Кроме того, вследствие сравнительно невысокой надежности клапанов и инерционности деталей клапанного механизма, поршневые насосы, как правило, тихоходны и металлоемки. Таким образом, клапаны, являясь необходимым элементом поршневого насоса, сдерживают его применение в ряде отраслей, повышение производительности и надежности гидромашины.

Вместе с тем, известны гидравлические диоды – проточные элементы, не содержащие подвижных механических частей и отличающиеся тем, что при различных направлениях течения жидкости через них, ее расход при одинаковой потере напора оказывается существенно различным. Качество гидравлического диода определяется отношением гидравлического сопротивления диода в обратном $\zeta_{об}$ и прямом $\zeta_{пр}$ направлениях при одинаковой потере напора [1]. Это отношение называется диодностью по сопротивлению и обозначается D:

$$D = \frac{\zeta_{об}}{\zeta_{пр}} \qquad (1)$$

Исходя из вышеизложенного, следует, что устранить отрицательное воздействия клапанов на работу поршневого насоса можно заменив их гидродиодами, хотя их применение вносит определенные особенности в рабочий процесс. Задачей исследования являлось определение важнейших параметров гидромашины и ее расходно-напорной характеристики.

Принципиальная схема поршневого насоса с гидродиодами представлена на рисунке *1*, где приводимый с помощью шатуна *7* и кривошипа *6*, поршень *5* совершает возвратно-поступательное движение в центральном отводе тройника, соединенного с входным *1* и выходным *2* успокоителем трубками *3* и *4*. Последние снабжены гидравлическими диодами *8* и *9*.

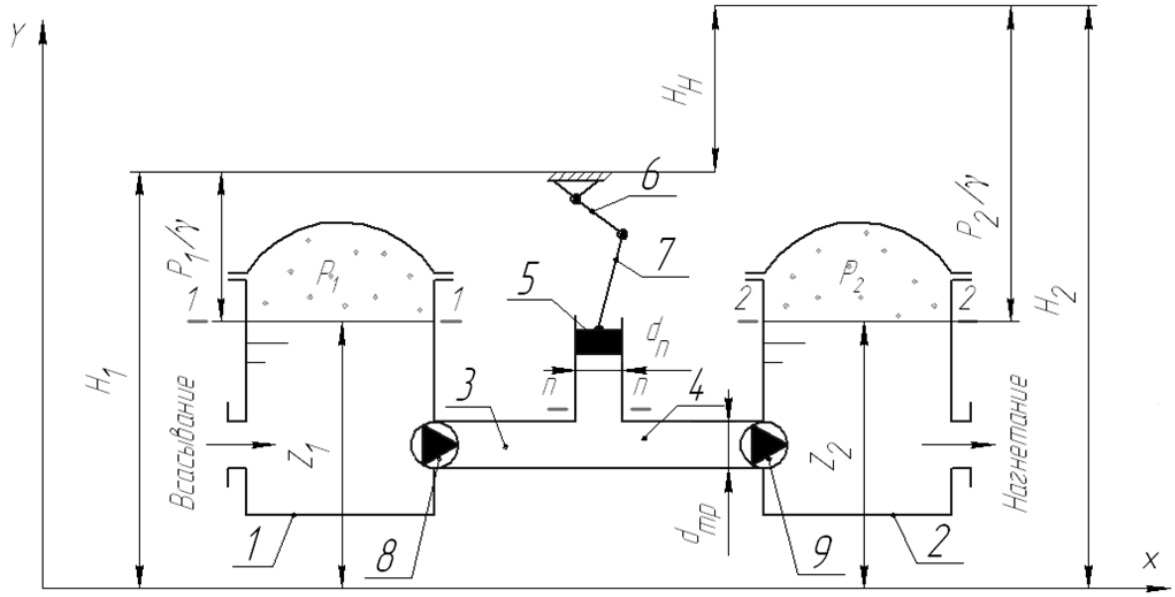


Рис. 1. Принципиальная схема бесклапанного поршневого насоса

Течение жидкости в проточной части насоса является сложным. С одной стороны, оно инициируется возвратно-поступательным движением поршня, а с другой – перетоком жидкости из напорного успокоителя во всасывающий под действием перепада напоров (давлений) в успокоителях. Поэтому расчетная модель строилась следующим образом: во-первых, сложное течение жидкости в проточной части насоса представлялось как сумма двух простых: обусловленного гармоническим движением поршня и перепадом напоров; во-вторых, для каждого из этих течений рассчитывалось изменение скорости движения жидкости во времени за цикл; в-третьих, кинематика сложного течения за цикл находилась, суммированием скоростей потоков составляющих простые движения. При этом жидкость полагалась несжимаемой, вместимость каждого успокоителя достаточно большой, чтобы считать давления в них постоянными, диаметры всасывающего и нагнетательного патрубков *3*

и *4* равными, гидравлические диоды *8* и *9*, установленные во всасывающем и нагнетательном патрубках, одинаковыми. При записи математической модели принималось направление движения жидкости слева направо и снизу вверх положительным.

Рассмотрим течение, обусловленное возвратно-поступательным движением поршня по гармоническому закону. Запишем уравнения перемещения поршня и неразрывности течения жидкости в тройнике:

$$x_{\text{п}}=r(1-\cos(\omega t)) \tag{2}$$

$$Q_{\text{п}}=Q_1+Q_2, \tag{3}$$

где r – радиус кривошипа; ω – угловая скорость вращения кривошипа; Q_1 и Q_2 – расходы жидкости во всасывающем и напорном патрубках.

Течение жидкости в тройнике является циклическим с периодом цикла $T=2\pi/\omega$. Каждый цикл состоит из фазы всасывания: $0 \le t \le T/2$ и фазы нагнетания: $T/2 < t < T$ (рис. 2).

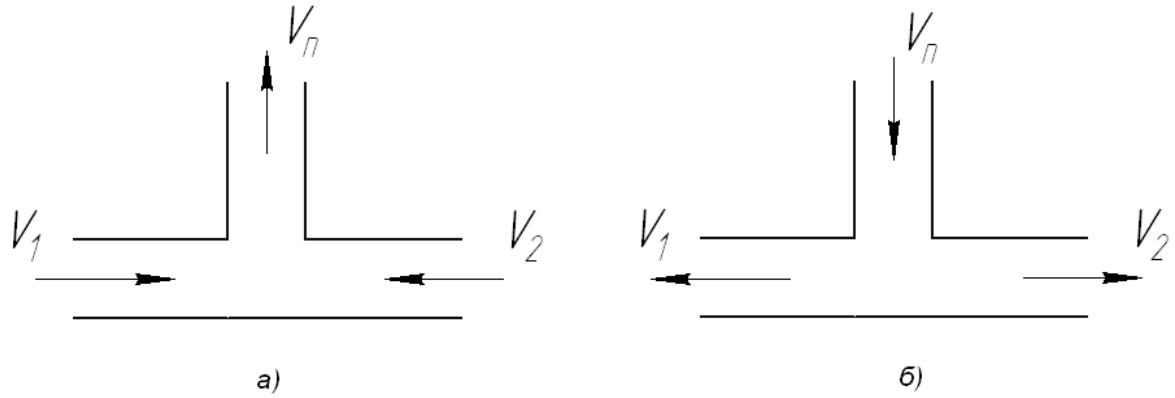


Рис. 2. Схема течения жидкости в тройнике:
а) в фазу всасывания;б) в фазу нагнетания

Течение жидкости в тройнике в фазу всасывания описывается уравнениями Бернулли для потоков из всасывающего и напорного успокоителей в тройник (рис. 1 и рис. 2, а):

$$p_1=p_n+\zeta_{\text{пр}}\frac{\rho v_1^2}{2}; \tag{4}$$

$$p_2=p_n+\zeta_{\text{пр}}D\frac{\rho v_2^2}{2}, \tag{5}$$

где p_1, p_2 и $p_{\text{п}}$ – давление во всасывающем, напорном успокоителях и в центральном отводе тройника ; v_1 и v_2 – скорости движения жидкости во всасы-

вающем и напорном патрубках; $\zeta_{пр}$ – коэффициент сопротивления гидравлического диода при прямом течении.

Решая уравнения (1) –(5) совместно, получаем выражение для скорости движения жидкости в напорном патрубке в фазу всасывания:

$$v_2 = \frac{v_п \frac{d_п^2}{d_{тр}^2}\left(\sqrt{D}-1\right)}{D-1},$$

где $v_п$ – скорость движения поршня; $d_п$ и $d_{тр}$ – диаметр поршня и патрубка.

Течение жидкости в тройнике в фазу нагнетания также описывается уравнениями Бернулли, но для потоков из тройника во всасывающий и напорный успокоители (рис. 1 и рис. 2, б):

$$p_1 = p_п + \zeta_{пр} D \frac{\rho v_1^2}{2}; \quad (6)$$

$$p_2 = p_п + \zeta_{пр} \frac{\rho v_2^2}{2}. \quad (7)$$

Решая уравнения (1)–(3), (6) и (7) совместно, получаем выражение для скорости движения жидкости в напорном патрубке в фазу нагнетания:

$$v_2 = \frac{2v_п \frac{d_п^2}{d_{тр}^2}\left(D+\sqrt{D}\right)}{D-1}.$$

Скорость движения жидкости напорном патрубке, обусловленного исключительно перепадом напоров (давлений) в успокоителях определяется по формуле:

$$v_2 = \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho \zeta_{пр} D}},$$

которая выведена из уравнения Бернулли для потока между сечениями 2 – 2 и 1 – 1 (рис. 1).

Скорости исходного движения жидкости в напорном патрубке v_2 в фазу всасывания и нагнетания определим суммируя с учетом знаков скорости составляющих движений. В фазу всасывания:

$$v_2 = -\frac{\omega r \cdot \sin(\omega t) \frac{d_п^2}{d_{тр}^2}\left(\sqrt{D}-1\right)}{D-1} - \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho \zeta_{пр} D}}, \quad (8)$$

а в фазу нагнетания:

$$v_2 = -\frac{\omega r \cdot \sin(\omega t)\frac{d_{\text{п}}^2}{d_{\text{тр}}^2}\left(D+\sqrt{D}\right)}{D-1} - \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho\zeta_{\text{пр}} D}}, \quad (9)$$

Изменение скорости v_2 за цикл проиллюстрировано на рисунке 3 при $d_{\text{п}}$=0,08 м, $d_{\text{тр}}$=0,04 м, r=0,01 м, D=40, $\zeta_{\text{пр}}$=1, n=2000 об/мин, p_2-p_1=10^5 Па. Видно, что обратный ток жидкости (v_2<0) в фазу всасывания меньше, чем прямой ток (v_2>0) в фазу нагнетания. Следовательно, подача жидкости в напорный успокоитель будет положительной.

Подача насоса определяется отношением объема жидкости W, поступившего в напорный успокоитель за цикл, к продолжительности цикла T:

$$Q_{\text{н}} = \frac{W}{T} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4T}\int_0^T v_2 \mathrm{d}t. \quad (10)$$

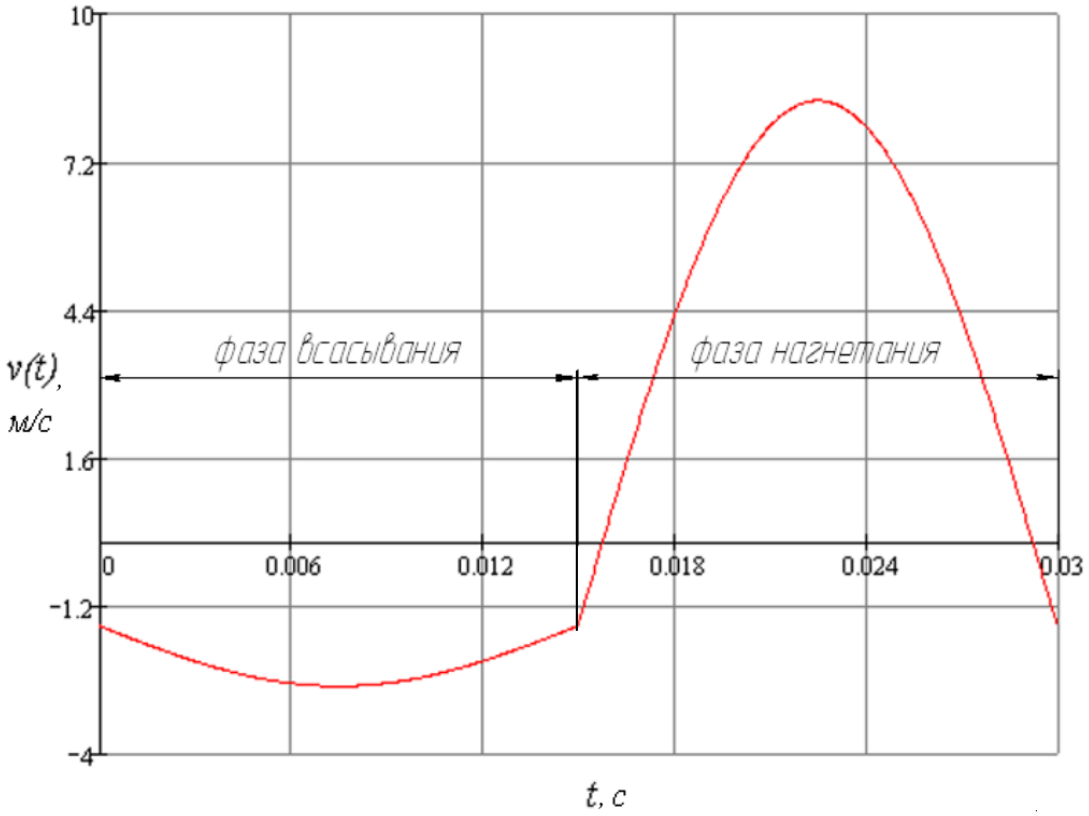


Рис. 3. Изменение скорости движения жидкости в напорном патрубке за цикл

Подставив в уравнение (10) формулы (8) и (9) и проинтегрировав, получаем выражение расходно-напорной характеристики бесклапанного поршневого насоса с гидродиодами:

$$Q_{\text{н}} = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4}\left(\frac{2r\dfrac{d_{\text{п}}^2}{d_{\text{тр}}^2}\left[D+1\right]}{\left[D-1\right]T} - \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{\rho\zeta_{\text{пр}}D}} \right). \qquad (11)$$

Анализ формулы (11) показывает, что расходно-напорная характеристика зависит от периода цикла T, отношения диаметров поршня и патрубка, диодности D и прямого сопротивления $\zeta_{\text{пр}}$ гидродиода, площади патрубка, радиуса кривошипа r и плотности перекачиваемой жидкости ρ.

На рисунке 4 приведены расходно-напорные характеристики насоса с размерами $d_{\text{п}}$=0,08 м, $d_{\text{тр}}$=0,04 м, r=0,01 м при нескольких значениях частоты вращения кривошипа и диодности по сопротивлению гидродиодов (линии 4–10). Здесь же приведены идеальные (то есть без учета утечек) характеристики поршневого насоса с клапанным распределением (линии 1–3).

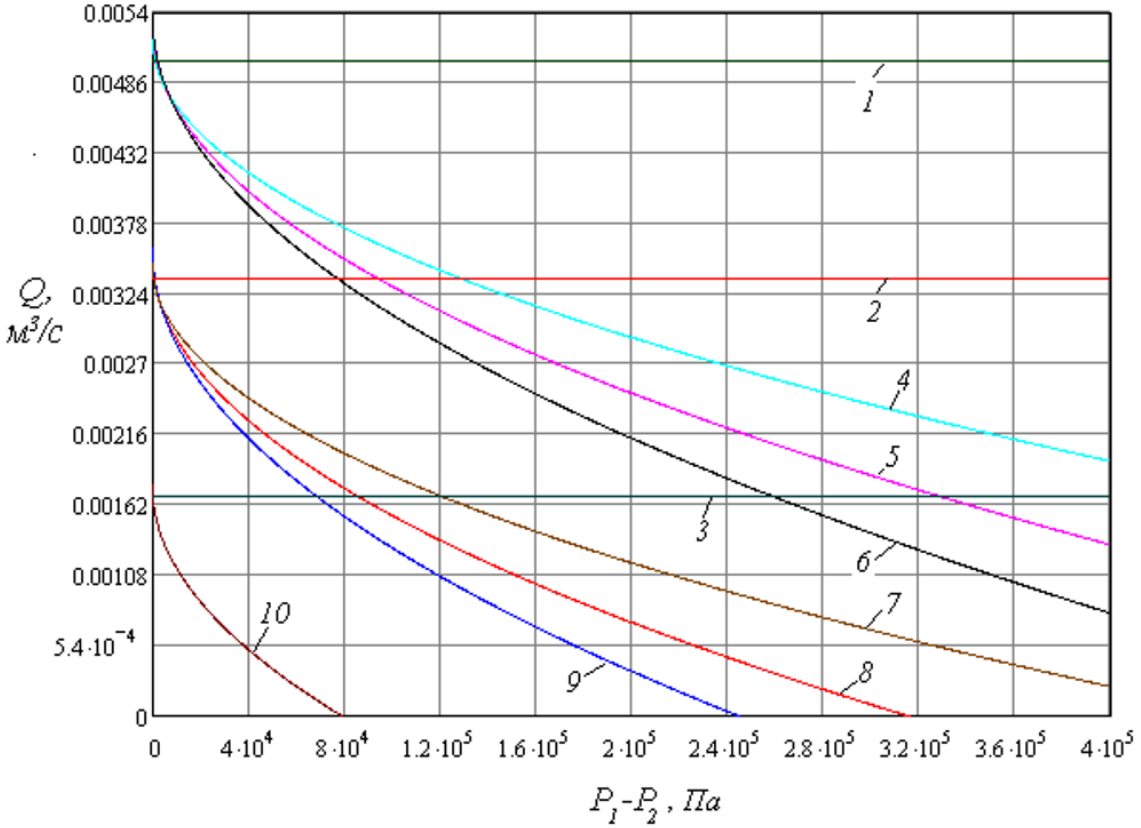


Рис. 4. Характеристика бесклапанного поршневого насоса с гидродиодами:
1 – n=3000об/мин; 2 – n=2000 об/мин; 3 – n=1000 об/мин; 4 – D=60, n=3000об/мин; 5– D=40, n=3000об/мин; 6 – D=30, n=3000 об/мин; 7 – D=60, n=2000 об/мин; 8 – D=40, n=2000 об/мин; 9 – D=30, n=2000 об/мин; 10 – D=40, n=1000 об/мин

Сопоставление кривых на рис. 3 и 4 позволяет сделать следующие выводы:

1. Поршневой насос с гидравлическими диодами работоспособен, то есть при определенном наборе параметров он обеспечивает нагнетание жидкости в напорный трубопровод.

2. В отличии от подачи классического поршневого насоса, подача насоса с гидравлическими диодами существенно зависит от перепада давлений. С его увеличением, подача уменьшается.

3. Основными параметрами, влияющими на расходно-напорную характеристику насоса с заданными размерами, являются диодность по сопротивлению гидродиодов и частота вращения кривошипа. С их увеличением, характеристика улучшается, то есть при одном и том же перепаде давлений, подача насоса увеличивается.

Библиографический список

1. Лебедев, И.В Элементы струйной автоматики / И.В. Лебедев, С.Л. Трескунов, В.С. Яковенко. – М.: Машиностроение, 1973. – 360с.

К содержанию

УДК 621.22.(07)

ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИГОЛЬЧАТЫХ ПОДШИПНИКОВ ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА

Ф.М. Назаров, Д.Р. Нигматулин, В.И. Барышев

По результатам производственной практики проведено исследование причин выхода из строя ряда объемных насосов, а также характера разрушения некоторых их узлов. Проведен сравнительный анализ условий работы игольчатых подшипников в шестеренных и поршневых гидромашинах, рассмотрены методики расчета количества смазки, необходимого для повышения работоспособности узла. На основе полученных расчетных данных предложена конструкция системы принудительной прокачки подшипника маслом.

Ключевые слова: износ; объёмный насос; гидропривод; охлаждение; работоспособность; подшипник.

Практика показала, что игольчатые подшипники, в виду таких своих качеств, как малые радиальные габариты, высокая несущая способность и способность работать в широком диапазоне температур и скоростей, применяются в объёмных гидромашинах различных типов, но более всего в опорах шестеренных и клапанных поршневых эксцентриковых. Для максимальной реализации этих свойств создатели и изготовители гидромашин обычно проек-

тируют и производят игольчатые подшипники самостоятельно, используя в качестве наружных и/или внутренних колец или обойм поверхности других деталей машин с беговыми дорожками [4]. Характерные конструкции этих опор приведены на рис. 1–2.

Практика эксплуатации машин показывает, что снижение работоспособности игольчатых подшипников в эксцентриковых гидромашинах приводит к скольжению и, как следствие, износу в соединениях поршней (клапанов) с эксцентриками (кольцами). Типичный характер адгезионного износа клапанов плунжеров в этом случае показан на рис. 3.

По нашему мнению одной из причин снижения работоспособности игольчатых подшипников в этих гидромашинах является недостаточное охлаждение, что связано с малой прокачкой подшипников маслом.

В шестеренных машинах такой проблемы практически нет, так как их подшипники принудительно под высоким давлением прокачиваются маслом торцевых утечек, на долю которых приходится значительная (до 70 %) часть. Для обоснования этой причины целесообразно провести анализ реализации качеств игольчатых подшипников в объёмных гидромашинах. Дело в том, что работоспособность подшипников существенно зависит от качества выбора их типа и размеров.

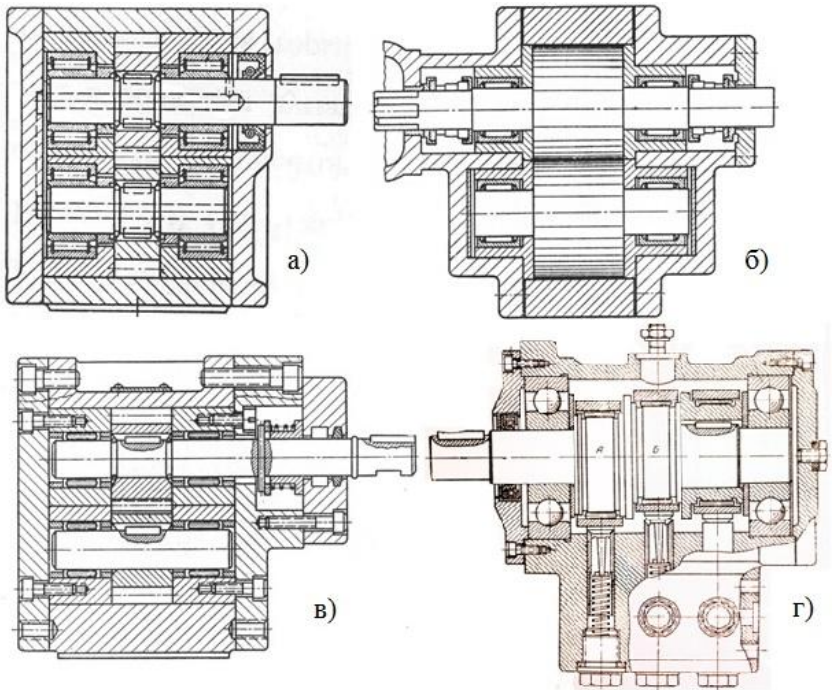


Рис. 1. Конструкции насосов с игольчатыми подшипниками опор: а) шестеренного насоса Г11-2 с двумя кольцами (обоймами) подшипника; б) подшипник с одним наружным кольцом и внутренней дорожкой качения на валу (шипе) шестерни; в) подшипник без колец с дорожками качения на валу и втулках (торцевых замыкателях); г) конструкция радиально-плунжерного эксцентрикового насоса типа Н400

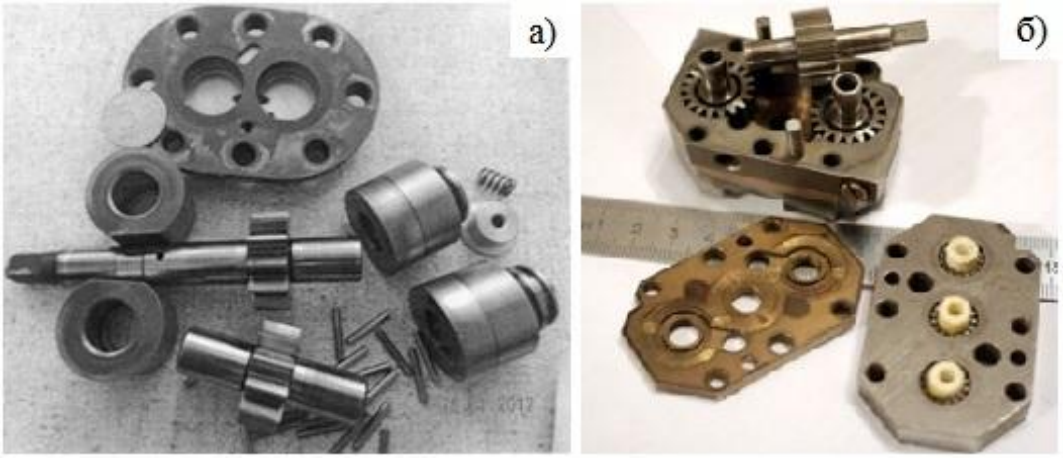


Рис. 2. Детали шестеренных насосов с игольчатыми подшипниками опор

Выбор зависит от большого числа факторов, а поэтому может и не иметь строгого обоснования, так как базируется на общих положениях и основах конструирования опор, выработанных инженерной практикой.

Рис. 3. Типичный характер износа клапанов и плунжеров

В основы конструирования игольчатых подшипников положены, например, следующие рекомендации [2]:

1. При проектировании подшипника обычно задан внутренний диаметр d обоймы или вала (шипа). Диаметр иголок δ рекомендуется определять по формуле:

$$\delta = (0{,}05\ldots0{,}1)d,$$

где нижний предел относится к подшипникам большего диаметра, а верхний – малого.

2. Число иголок предварительно определяется по формуле:

$$z' = \pi \left(\frac{d}{\delta} + 1 \right),$$

и округляется до ближайшего меньшего целого числа z. Разность $z' - z = q$ – коэффициент бокового зазора, ($q = 0{,}4 \ldots 0{,}8$). Боковой зазор между иголками определяют из условия, чтобы при плотной укладке на валу между первой и последней иголкой оставался зазор $t = q\delta$. При $q < 0{,}4$ в подшипнике возникает повышенное трение, а для $q > 0{,}8$ становится возможным перекос и заклинивание иголок (вследствие увеличения бокового зазора из-за износа шипа и обоймы).

3. Длину иголок рекомендуется принимать $l = (5 \ldots 10)\,\delta$. Нижний предел относится к подшипникам малых, а верхний – к подшипникам больших диаметров.

4. В зависимости от диаметра внутренней беговой дорожки d длину иголок l рекомендуется принимать в пределах:

$$l = (0{,}25 \ldots 0{,}5)\, d.$$

Нижний предел относится к подшипникам большого диаметра, верхний – малого. Размеры иголок стандартизованы согласно ГОСТ 6870-81.

5. Как показывает практика, в игольчатых подшипниках нет абсолютного качения иголок. Теоретически, в нагруженной зоне подшипника на участке полного соприкосновения с валом иголки вращаются с частотой n_u:

$$n_u = n \frac{d}{\delta},$$

где n – частота вращения вала. Переходя в ненагруженную зону подшипника, иголки по инерции продолжают вращаться, но с пониженной вследствие трения частотой, а при возвращении в нагруженную зону частота увеличивается вновь [1]. Проскальзывание иголок в ненагруженной зоне обусловливает повышенную величину коэффициента трения ($f = 0{,}01 \ldots 0{,}02$), что приводит к высокому нагреву игл, требует особо эффективной их смазки и охлаждения. В данной связи рекомендуется ограничивать быстроходность игольчатых подшипников частотой вращения 2000 мин$^{-1}$. Максимальная допустимой частотой вращения иголок вокруг своей оси считается частота 20000…30000 мин$^{-1}$.

6. Диаметральный зазор в игольчатом подшипнике, т.е. зазор $\Delta = D - (d + 2\delta)$ рекомендуется выбирать по посадкам $H7/e8$, $H7/d8$, $H7/c8$. Средний диаметральный зазор можно определить, мкм:

$$\Delta = (10 \ldots 20)\, \sqrt{d},$$

где величина d – в мм. Чем больше частота вращения, тем больше должен быть зазор, так как при переходе иголок из узкой нагруженной зоны в широкую ненагруженную зону подшипника, отличающихся на величину зазора, имеет место насосный эффект, т.е. происходит прокачка подшипника маслом, что должно обеспечивать надежное его охлаждение. Применение свободных иголок требует их тщательной селекции, поскольку различие в диаметрах приводит к перекосу и интенсивному износу игл и, как следствие, к заеданию подшипника, т.е. потере работоспособности.

Результаты анализа степеней реализации приведенных рекомендаций по основным параметрам указанных гидромашин сведены в таблице.

Таблица

Результаты сравнительного анализа по некоторым параметрам

Параметр подшипника и номер рекомендации	Варианты подшипников					
	Насосы шестеренного типа					Насос Н403
	рис.1а	рис.1б	рис.1в	рис.2а	рис.2б	рис.1г
1. Диаметр иголок, δ/d	0,148	0,155	0,21	0,176	0,25	0,04
2. Длина иголок, l/δ	3,75	4	3,67	6	4	8
3. Длина иголок, l/d	0,555	0,622	0,77	1,06	1	0,324
4. Частота вращения иголок вокруг собств. оси $n_u = nd/\delta$	10^4	9600	7200	8500	6000	37000

Как показывает анализ, игольчатые подшипники шестеренных насосов имеют более приемлемые показатели, чем поршневые, что гарантирует им более высокую работоспособность. Как уже отмечалось, повысить работоспособность игольчатых подшипников клапанных поршневых эксцентриковых гидромашин считается возможным повышением эффективности их охлаждения путем введения принудительной прокачки через них масла.

С этой целью предлагается ввести в гидромашину специальное насосное колесо, конструкция которого представлена на рисунке 4. Производительность этого насоса-колеса может быть определена с учетом следующих рекомендаций и положений:

1. Насосы типа Н4…У допускают кратковременное перегрузочное давление, составляющее для Н400У – 28 МПа, для Н401У, Н403У – 40 МПа с интервалами между циклами нагружения не менее 30 секунд. Суммарное время работы при этих давлениях 15 % от общего ресурса, не более.

2. Насосы работают на чистых минеральных маслах с кинематической вязкостью от 17 до 213 мм^2/с и температурой, соответственно, от плюс 10 до плюс 50 ˚С, при температуре окружающей среды от 0 до плюс 50 ˚С. Ре-

комендуемыми рабочими жидкостями являются масла И-20А и ТП-22. Класс чистоты рабочих жидкостей не должен быть грубее 14 по ГОСТ 17216; номинальная тонкость фильтрации жидкости не более 40 мкм.

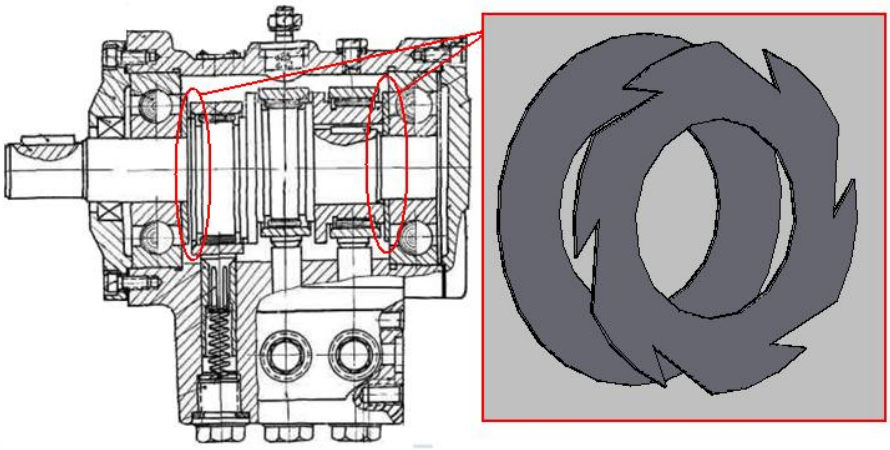


Рис. 4. Плунжерный насос с дополнительной системой охлаждения игольчатых подшипников. Предлагается разделить дистанционное кольцо на два тонких, одно из которых выполнено с клиновидными вырезами, что обеспечивает необходимый принудительный подвод смазки к иголкам подшипника

Общие потери энергии на трение в подшипниках качения складываются из отдельных потерь, которые при заданной скорости вращения зависят в основном от следующих факторов [1]:

- сопротивление от упругого гистерезиса при качении;
- трение на площадках фактического упругого контакта тел качения с кольцами (граничное и жидкостное);
- трение сепаратора о кольцо и тело качения (граничное и жидкостное);
- взбалтывание масла телами качения;
- трение от гироскопического эффекта.

Задача о выборе оптимального количества масла для смазки подшипников качения решается по-разному в зависимости от того, в каких условиях и на каких режимах работает подшипник.

Обычно рассматриваются два случая: подшипник работает в легких условиях, т.е. при умеренных скоростях, нагрузках и температурах, не превышающих 80…100 ˚С, и подшипник, работающий в тяжелых условиях, т.е. при высоких скоростях, нагрузках, температурах. Подшипники качения, работающие в легких условиях, обычно не нуждаются в принудительном охлаждении и должны смазываться возможно меньшим количеством масла. Это требование диктуется необходимостью предупредить взбалтывание излишнего масла вращающимися телами качения, которое сопровождается потерями энергии, выделением тепла и нагревом подшипника.

В ответственных подшипниках, работающих при средних и высоких нагрузках, количество тепла, которое необходимо отводить в единицу времени, может быть столь велико, что для поддержания температуры подшипника в допустимых пределах через него должна производиться весьма интенсивная прокачка масла. В таких случаях рекомендуется применять струйную смазку, наиболее эффективную с точки зрения охлаждения, причем масло рекомендуется подавать в подшипник в виде нескольких струй.

В предлагаемой нами конструкции насоса-колеса затопленные струи масла формируются клиновидными вырезами или полуконусными выштамповками на плоском тонком диске. Отличительная особенность работы подшипников в гидромашинах рассматриваемого типа заключается в том, что подшипники эксцентриков работают полностью погруженными в масло и в то же время на малом объеме масла с низким его обменом. Поэтому с увеличением количества масла, подаваемого насосом-колесом в единицу времени, момент сопротивления на валу машин будет возрастать, вследствие увеличения сопротивлений от взбалтывания колесом масла. Начиная с некоторого значения, потери энергии на взбалтывание масла в корпусе машины будут становиться настолько высокими, что охлаждающее действие масла не сможет компенсировать нагрев от взбалтывания.

По величине коэффициента трения, по размерам, силовой и скоростной нагруженности игольчатые подшипники близки к подшипникам скольжения. В этой связи предварительный расчет количества масла, прокачиваемого через подшипник для его охлаждения, можно определить по формуле

$$V = (2\ldots3)\frac{Q}{t_2 - t_1}, \text{ л/мин},$$

где t_1 – температура входящего в подшипник масла, ˚С; t_2 – температура выходящего из подшипника масла, ˚С.

Для предварительных расчетов можно принять $t_2 - t_1$=10 и t_2 = 50…70 ˚С с последующей проверкой.

Количество тепла, выделяющегося подшипником за 1 минуту, можно определить по формуле [5]:

$$Q = Puf, \text{ Дж/мин},$$

где P – радиальная нагрузка на подшипник, Н; u – окружная скорость, м/с; f – коэффициент трения.

Для предварительных расчетов элементов насоса-колеса можно принять количество масла, необходимое для прокачивания через подшипник для его охлаждения, равным 0,5…1,0 % от минутной производительности насоса. Эти данные следуют из практики эксплуатации шестеренных насосов с игольчатыми подшипниками. С другой стороны, стоит учесть ещё и влияние условий нагружения и характер смазки подшипника [3].

По результатам расчетов по всем трем методикам были получены величины расходов одного порядка. Ввиду влияния на эффективность системы охлаждения подшипников многих факторов, ее оптимизация по производительности и КПД возможна только по результатам экспериментальных натурных образцов.

Для прокачки подшипников маслом необходимо организовать подвод и отвод жидкости из внутреннего объёма насоса; т.е. создать перепад давления на противоположных торцах иголок (рис. 5, а). По сути для организации прокачки часть рабочей жидкости от периферии необходимо направить к валу (к торцам иголок с одной стороны подшипника – подводящий аппарат) и организовать отток от вала (от торцов иголок с другой стороны подшипника – отводящий аппарат).

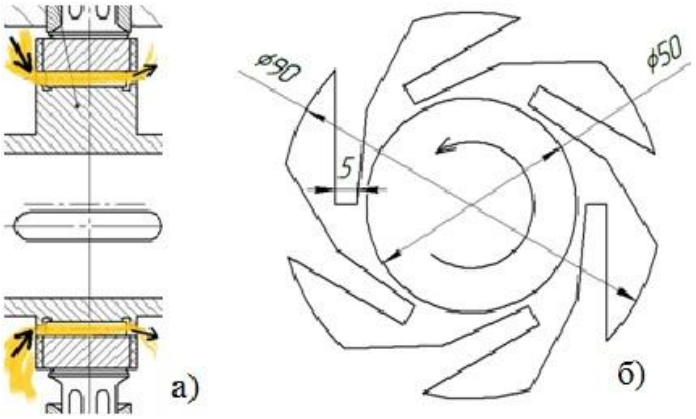


Рис. 5. Схема организации прокачки подшипника смазкой:
а) иллюстрация тока жидкости через иглы; б) эскиз колеса-шайбы

К конструкции аппаратов предъявляются требования, диктуемые малым внутренним объёмом насоса и базовой ценовой категорией агрегата:

- компактность;
- технологичность;
- конструкция не должна ослабить нагруженные элементы агрегата (вал, эксцентрики).

Предлагаемая система прокачки жидкости через подшипник, включает в себя две шайбы-насоса, установленные на валу с разных сторон эксцентрика. Одна из них предназначена для отвода жидкости от иголок и создания там пониженного давления, работает она как обычное центробежное колесо. У второго же колеса более тяжелая задача – преодолеть поле центробежных сил и обеспечить ток жидкости от периферии к иглам, в зону пониженного давления.

Конструкция обоих колес (рис. 5, б) представляет собой шайбу, в которой под углом к нормали вырублены канавки. Такая конструкция наиболее проста и компактна, а за счет возможности установки в противоположных направлениях с разных сторон подшипника позволяет решить как проблему

подвода, так и отвода масла. Также возможны альтернативные варианты реализации прокачки, значительно усложняющие конструкцию насоса:

- черпаковый агрегат (черпательная трубка) + отводящее колесо;
- система сверлений в валу;
- система сверлений в обойме эксцентрика.

Библиографический список

1. Галахов, М.А. Расчет подшипниковых узлов / М.А. Галахов, А.Н. Бурмистров. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

2. Орлов, П.И. Основы конструирования: Справочное пособие / П.И. Орлов. – 3-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 1988. – 560 с.

3. Перель, Л.Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник / Л.Я. Перель. – М.: Машиностроение, 1983. – 543 с.

4. Свешников, В.К. Гидрооборудование: насосы и гидродвигатели : Международный справочник / В.К. Свешников. – М.: Издательский центр «Техинформ» МАИ, 2001. – 360 с.

5. Чернавский, С.А. Подшипники скольжения / С.А. Чернавский. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 244 с.

К содержанию

УДК 532.28 + 621.628

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКУ ОБЪЕМНОГО РАСТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

К.К. Лайко

Приведены результаты сравнения характеристик «сила сопротивления жидкости / удлинение сильфона» при различных способах упрочнения рабочих жидкостей: кратковременного (до 24 ч), продолжительного (1500 ч) отстаивания и последовательного нагружения с промежуточным выпуском воздуха.

При исследовании объемной прочности по сильфонному методу, предполагающему увеличение замкнутого объема, в жидкости неизбежно возникают газовые (парогазовые) пузырьки и каверны, которые должны быть удалены после открытия запорного элемента [1–5]. После их выхода из замкнутого объема прочность жидкости повышается. Т.к. испытание 1-го образца жидкости должно проводиться в приемлемых временных пределах (нет возможности бесконечно долго ждать всплытия самых мелких пузырьков), были сопоставлены 3 режима нагружения (см. табл.).

Таблица

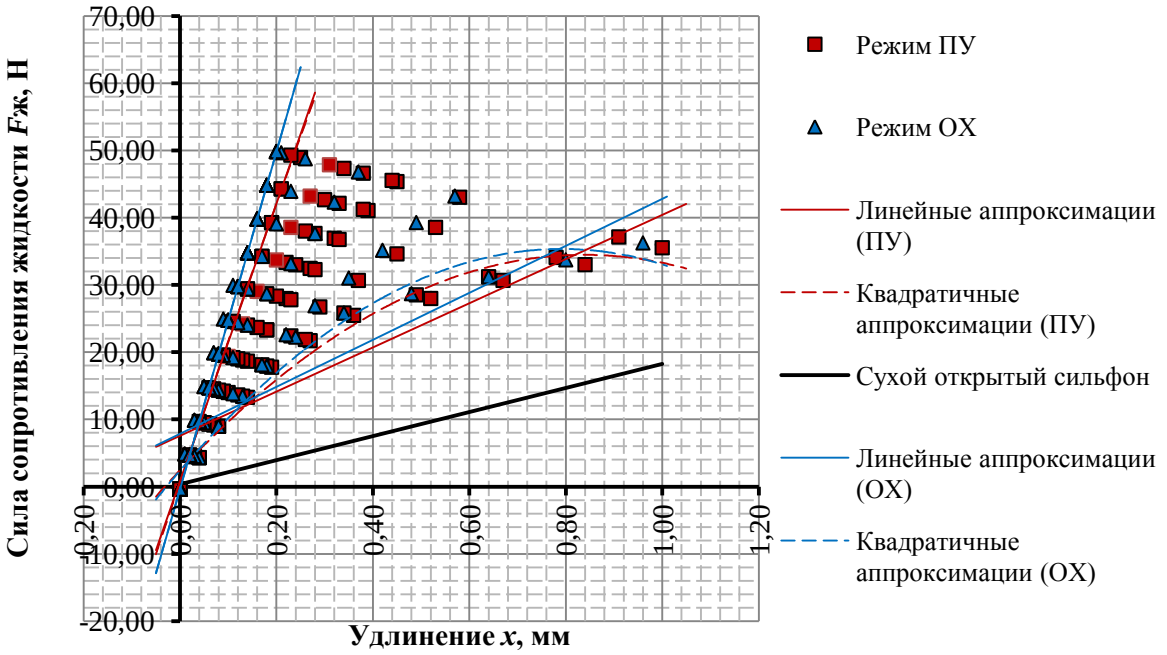
Режимы нагружения сильфонного метода

Режим ПУ	**Метод ОХ (24 ч)**	**Метод ОХ (1500 ч)**
Заполнение объема	Заполнение объема	Заполнение объема
Закрытие объема	Закрытие объема	Закрытие объема
Малое нагружение	Малое нагружение	Малое нагружение
Достижение установленной нагрузки (50 Н)	Достижение установленной нагрузки (50 Н)	Достижение установленной нагрузки (50 Н)
Открытие объема	Открытие объема	Открытие объема
Отстаивание 5 мин	Отстаивание 5 мин	–
Снятие нагрузки	Снятие нагрузки	–
Закрытие объема	Закрытие объема	–
Критическое нагружение	Критическое нагружение	–
Достижение установленной нагрузки (250 Н)	Достижение установленной нагрузки (250 Н)	–
Открытие объема	Открытие объема	–
Снятие нагрузки	Снятие нагрузки	–
Отстаивание 15 мин.	–	–
–	Отстаивание 24 ч.	–
		Отстаивание 1500 ч
Повтор с п. 3 по п. 17 (9 раз)	Повтор с п. 3 по п. 18 (9 раз)	–

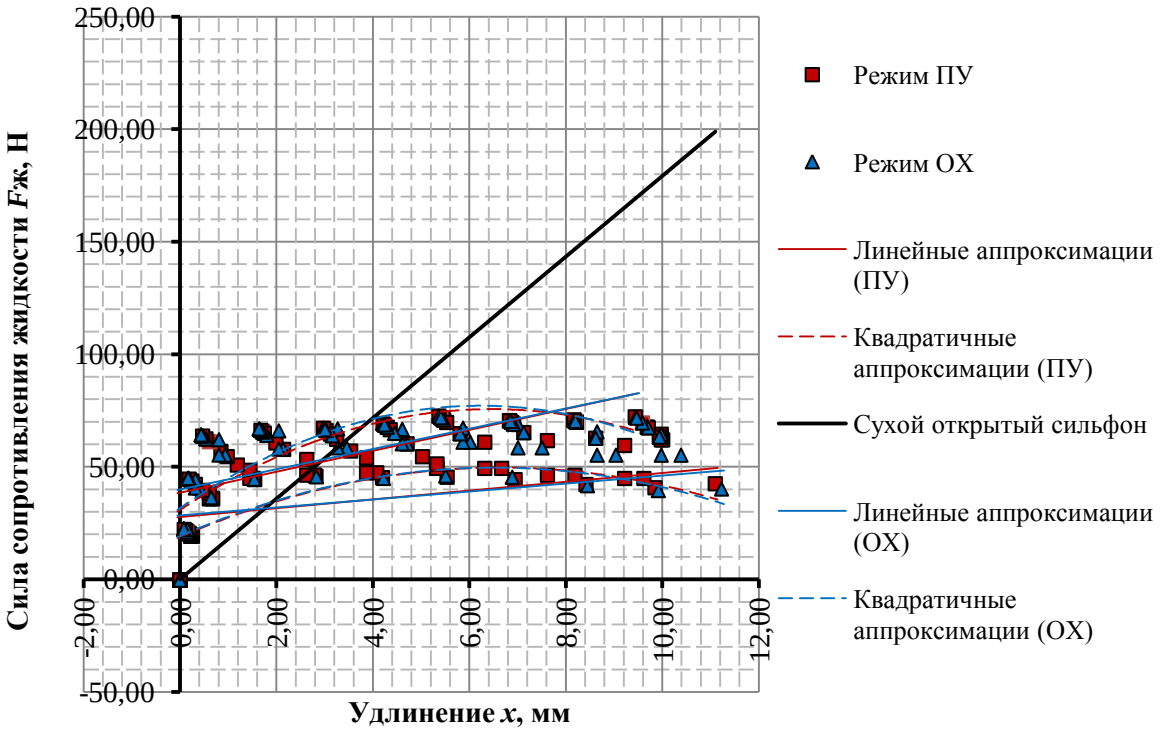
Сравнение полей характеристик «Сила сопротивления жидкости / удлинение сильфона» для режимов ПУ и ОХ (24 ч) представлено на рис. 1 (25±1 °С, масло моторное Teboil Super HPD SAE-10/40). Характеристики практически совпадают, что свидетельствует о нецелесообразности увеличения времени отстаивания между циклами нагружения для режима ПУ.

Несмотря на внешнее сходство характеристик, при режиме ОХ наблюдается практически абсолютная линейность характеристик малого нагружения. Коэффициент достоверности линейной аппроксимации находится в пределах 0,994…0,999 (для режима ПУ – в пределах 0,887…0,995).

Сравнение полей характеристик «Сила сопротивления жидкости / удлинение сильфона» для малых нагружений режимов ПУ и ОХ (1500 ч) представлено на рис. 2 (25±2 °С, масло моторное Teboil Super HPD SAE-10/40). При этом для режима ОХ приведены только первые две характеристики, а для режима ПУ – все десять. Очевидно, что столь долговременное отстаивание даже после незначительного нагружения вызывает существенное упрочнение жидкости. Этот эффект связан со всплытием из замкнутого объема даже мельчайших пузырьков радиуса порядка 10^{-6}…10^{-8} м (в зависимости от вязкости) [4–8]. Однако режим ОХ (1500 ч) при реальных испытаниях жидкости ввиду экономических соображений не осуществим.



а)



б)

Рис. 1. Сравнение влияния упрочнения режима ПУ и ОХ:
а – поле характеристик малого нагружения,
б – поле характеристик критического нагружения

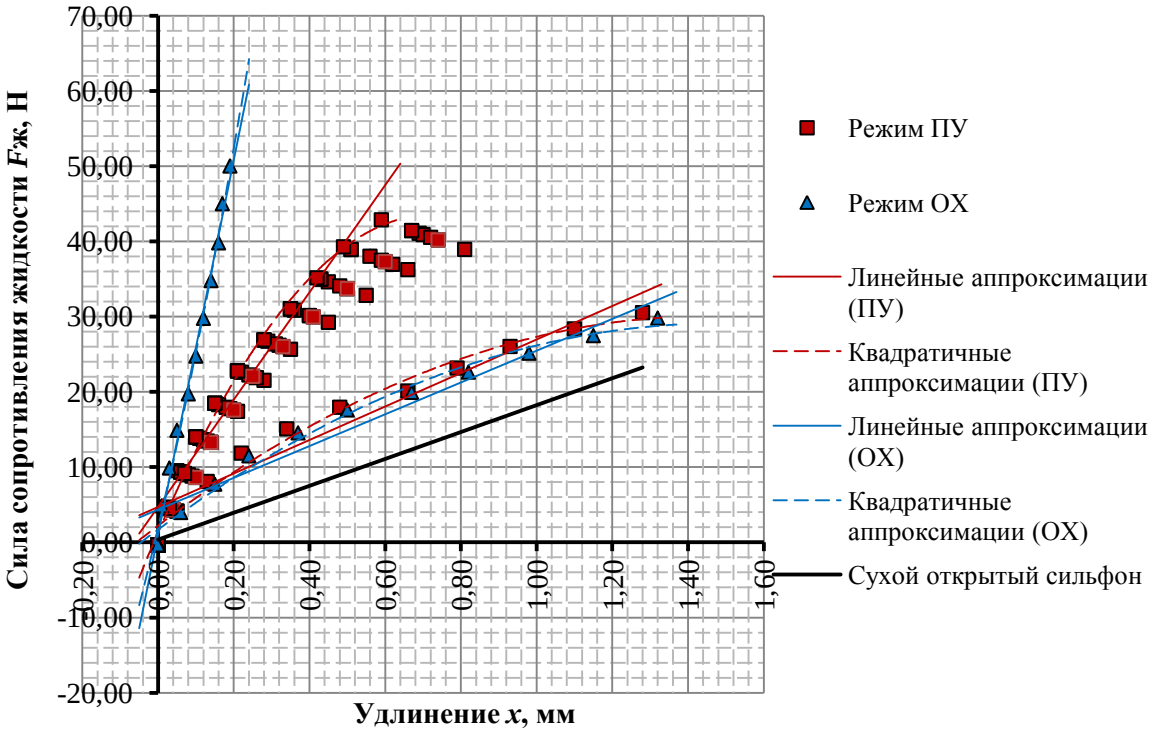


Рис. 2. Сравнение влияния упрочнения режима ПУ и ОХ при малом нагружении

Результаты исследований других авторов свидетельствуют, что наиболее сильное влияние на прочность жидкости оказывают несплошности радиусом порядка 10^{-2}…10^{-3} м (видимые невооруженным глазом) [4, 6–9], поэтому режим ПУ вполне применим при исследовании предельного состояния жидкости (состояния наименьшей прочности).

Исследования влияния упрочнения на характеристику объемного растяжения жидкости позволили сделать следующие выводы:

1. ***Любой режим упрочнения увеличивает*** жесткость характеристики. Коэффициент $F_ж/x$ – угол наклона линейной аппроксимации при правильно поставленном эксперименте – всегда возрастает, также растут коэффициенты квадратичных аппроксимаций.

2. ***Режим последовательного упрочнения (ПУ) увеличивает*** жесткость характеристик как при малом, так и при критическом нагружении.

3. ***Продолжительное отстаивание при режиме ОХ (1500 ч)*** после первого нагружения ***значительно увеличивает*** угол наклона характеристики растяжения жидкости, однако в реальной практике испытаний не может применяться из соображений экономической неэффективности.

4. ***Отстаивание при режиме ОХ (24 ч)*** между нагружениями практически ***не влияет*** на характеристики растяжения жидкости и ***не имеет преимуществ*** перед методом ПУ (с 15-минутным отстаиванием между нагружениями).

Библиографический список

1. Барышев, В.И. Основы экспериментального определения прочности рабочих жидкостей / В.И. Барышев, К.К. Лайко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013. – Т. 13, №2. – С. 105–112.

2. Барышев, В.И. Основы экспериментального определения прочности рабочих жидкостей / В.И. Барышев, К.К. Лайко // Вестник ПНИПУ. Серия «Аэрокосмическая техника». – 2013. – Т. 35. – С. 83–100.

3. Корнфельд, М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М., Л.: Гостехтеоретиздат, 1957. – 110 с.

4. Хейуорд, А. Отрицательные давления в жидкостях. Как их заставить служить человеку [Электронный ресурс] / А. Хейуорд // Успехи физических наук. – URL: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspechi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf.

5. Хохлов, В.А. Электрогидравлический следящий привод / В.А. Хохлов. – М.: Наука, 1964. – 230 с.

6. Виноградов, В.Е. Исследование вскипания перегретых и растянутых жидкостей [Электронный ресурс] / В.Е. Виноградов // Электронный архив УрФУ. – URL: http://elar.usu.ru/bitstream/1234.56789/942/urgu0423s.pdf.

7. Гегузин, Я.Е. Пузыри / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1985. – 180 с.

8. Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – М.: Мир, 1975. –98 с.

9. Рождественский, В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.

К содержанию

УДК 532.28 + 621.628

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАБОЧИХ ЖИДКОСТЕЙ ПО ИХ ОБЪЕМНОЙ ПРОЧНОСТИ

К.К. Лайко

Описана разработанная методика и экспериментальная установка для контроля качества рабочих жидкостей по 2 параметрам объемной прочности: модулю растяжения и давлению разрыва. Введены понятия скорости упрочнения и ускорения упрочнения. Пояснена актуальность применения этих параметров совместно с классическими физико-химическими параметрами, определяемыми лабораторно (вязкостью, плотностью, кислотным числом, долей механических примесей, долей воды и т.д.). Приведены и кратко прокомментированы характеристики процесса.

Объемная прочность – свойство жидкости сохранять или изменять в определенных пределах первоначальный объем при возникновении в ней напряжений, стремящихся увеличить этот объем – исследуется с середины XIX века с целью определения параметра, характеризующего предрасположенность жидкости к первой стадии кавитации – образованию несплошности в виде парового или парогазового пузырька [3–9]. Проблема разрушения узлов и элементов гидравлических машин и аппаратов в настоящий момент не решена ввиду 2 основных причин:

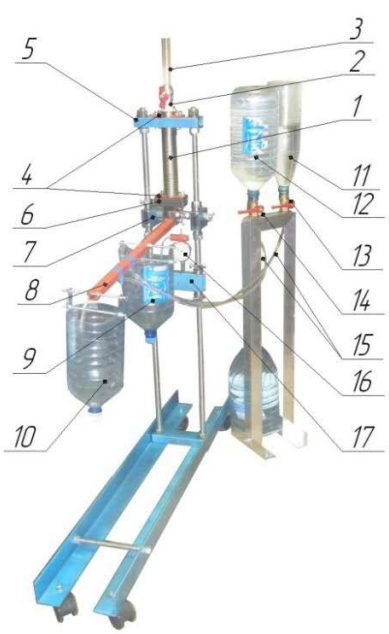
1. Значения параметров прочности существенно зависят от методов исследований и конструкций экспериментальных установок или допущений при теоретическом описании [3–9].

2. Широко распространены методы контроля качества жидкостей сертифицированными лабораториями, дающие сведения о вязкости, степени загрязненности и обводненности, кислотному числу и о других параметрах в отдельности, оставляя суммарное воздействие всех этих параметров на предрасположенность жидкости к образованию несплошностей неизвестным.

Разработанный метод контроля качества жидкости на основе сильфона [1, 2, 3] позволяет в дополнение к классическому параметру – ***давлению разрыва*** [5–8] – определять ***модуль растяжения***, (вводится аналогично модулю объемного сжатия жидкости) и оценивать их изменение при контролируемом процессе упрочнения, состоящем из 10-ти последовательных шагов.

Исследовательская установка приведена на рис. 1. Замкнутый объем состоит из сильфона 1 и крана шарового 2, соединенных через штуцер. Прозрачная трубка 3 предназначается для исключения падения уровня жидкости

ниже запорного элемента во время открытия растянутого замкнутого объема. Для крепления замкнутого объема к верхней плите 5 и присоединения рычага 8 через плиту 6 к сильфону служат серповидные держатели 4. Соотношение плеч рычага обеспечивается через регулируемые по высоте плиты рычага 7. Удлинение сильфона отслеживает стрелочный микрометр 16, закрепленный на регулируемой по высоте плите 17.



Технические характеристики:

Габаритные размеры установки (ДхШхВ), мм:	1000x250x1250
Габаритные размеры устройства раздачи, мм:	250x250x1100
Масса (приблизительно), кг:	15
Объем емкости нагружения, не более, л:	2
– малого	1,5
– большого	2,5
Объем раздаточных емкостей, не более, л:	
– малого нагружения	1,5
– критического нагружения	3,0
Соотношение плеч рычага:	
– максимальное:	12,22
– минимальное:	5,44
Габаритные размеры сильфонов, не более, мм:	
– диаметр	42
– длина:	700
Параметры микрометра:	
– цена деления, мм:	0,01
– предел измерения, мм:	12

Рис. 1. Исследовательская установка

Емкость нагружения 9 служит для обеспечения режима малого нагружения и по первому трубопроводу 15 соединяется с раздаточной емкостью 11. Расход воды регулируется краном 13. Емкость нагружения 10 служит для обеспечения критического нагружения и по второму трубопроводу 15 соединяется с раздаточной емкостью 12. Расход воды регулируется краном 14. Метод исследования предполагает 10 последовательных шагов нагру-жения исследуемого образца жидкости с выпуском выделяющегося воздуха между ними в течение 15 минут. При этом каждый шаг состоит из 2-х режимов нагружения:

1. Малое нагружение (в точке крепления замкнутого объема достигается сила около 50 Н) для построения характеристики «Сила сопротивления жидкости / удлинение сильфона», по которой вычисляется модуль растяжения.

2. Критическое нагружение (в точке крепления замкнутого объема достигается сила около 250 Н) для построения характеристики «Сила сопротивления жидкости / удлинение сильфона», по которой вычисляется давление разрыва.

Модуль растяжения на каждом шаге определяется по формуле:

$$\beta p=1{,}622 F ж x W 0 D max 2 \cdot D y 2,$$

а давление разрыва по формуле:

$$pp=4 \cdot F ж\ \pi \cdot D max 2,$$

где $F_ж$ – сила сопротивления жидкости по соответствующей характеристике,

x – удлинение сильфона,

W_0 – начальный объем,

D_{max} – максимальный внутренний диаметр сильфона,

D_y – условный диаметр сильфона.

Поле характеристик для 10-ти шагов упрочнения, получаемое при режиме малого нагружения, представлено на рис. 2. Характеристики практически линейны, что делает возможным вычисление коэффициента $F_ж/x$, т.е. фактически угла наклона. Это обязательное условие для определения модуля растяжения.

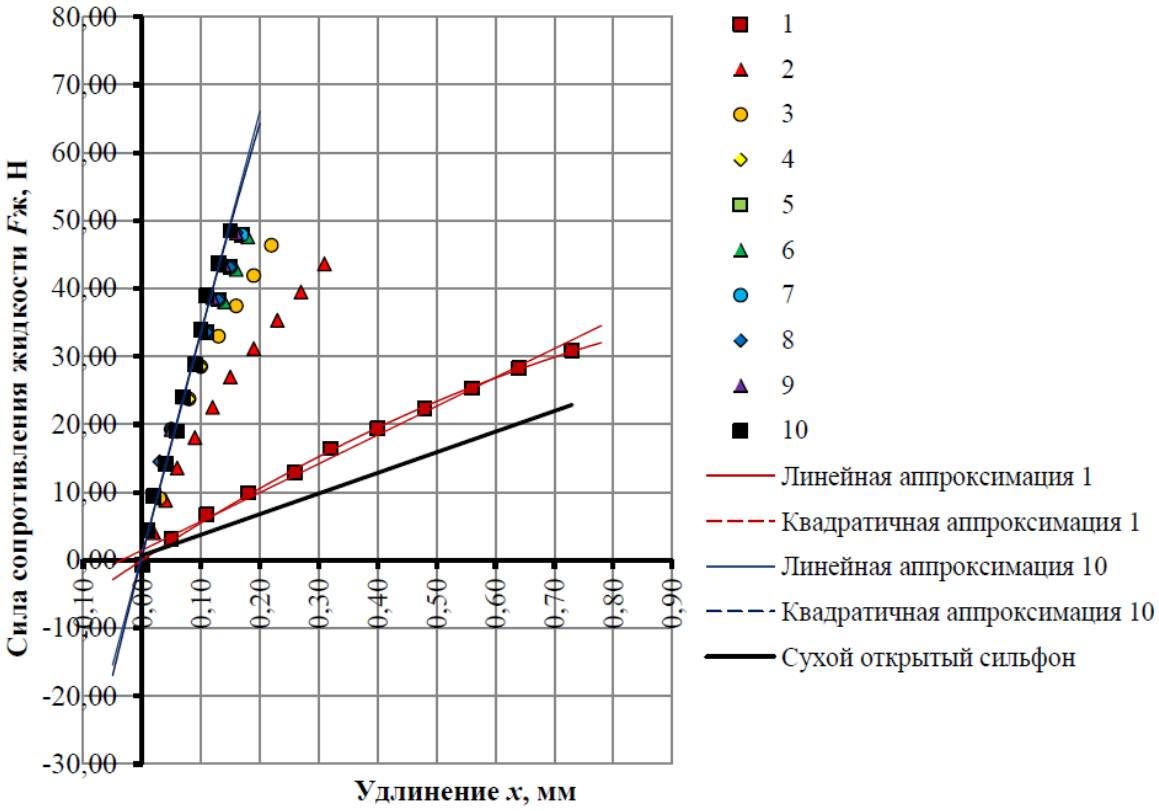


Рис. 2. Поле характеристик при малом нагружении

Скорость и ускорение упрочнения определяются по графикам на рис. 3. Поле характеристик для 10-ти шагов упрочнения, получаемое при режиме критического нагружения, представлено на рис. 4. Характеристики имеют

экстремум в т. Б, после которого измерение прочности жидкости полностью сменяется измерением растяжение парогазовой каверны и считается, что произошел разрыв жидкости (см. также [3, 8, 9]).

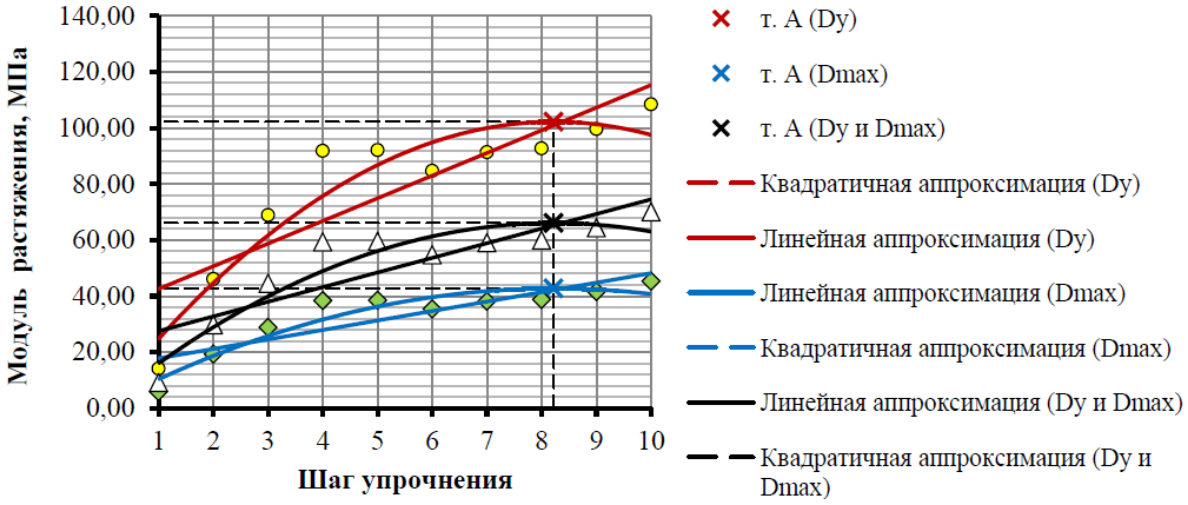


Рис. 3. Изменение модуля растяжения

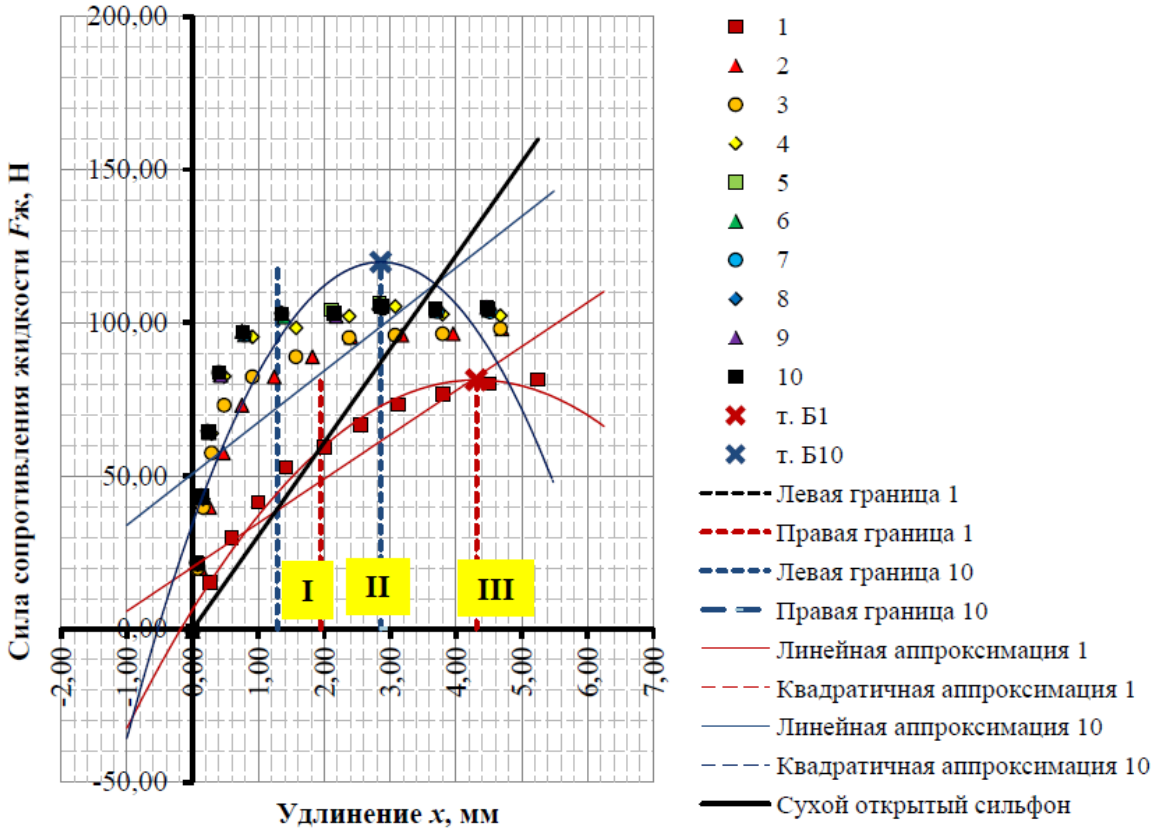


Рис. 4. Характеристики критического нагружения

На характеристики выделяются 3 зоны (для 10-го шага):

I – линейная (зона модуля растяжения);

II – переходная (объединения газовых зародышей в каверны);

III – газовая каверна.

Скорость и ускорение упрочнения по давлению разрыва могут быть вычислены аналогично случаю с модулем растяжения (см. рис. 3, б).

Для разработанного метода контроля характерны несколько главных особенностей:

1. Скорость упрочнения всегда положительна (объемная прочность растет с каждым шагом). На некоторых шагах скорость может быть отрицательна, что вызвано некачественной постановкой эксперимента (не обеспечен выход несплошностей из замкнутого объема во время 15-минутного отдыха).

2. Ускорение упрочнения всегда отрицательно, т.е. с каждым шагом упрочнения предрасположенность к зарождению несплошностей у жидкости снижается ввиду уменьшения газовых зародышей.

3. Зависимость модуля растяжения и давления разрыва от вязкости и плотности не обнаружено, т.е. разнородные жидкости могут иметь сходное сопротивление воздействию растягивающих напряжений. Зависимость между степенью загрязнения, окисления и обводнения уточняется.

4. Параметры объемной прочности могут быть определены для непрозрачных жидкостей.

5. Давление разрыва не зависит от первоначального объема жидкости.

Библиографический список

1. Барышев, В.И. Основы экспериментального определения прочности рабочих жидкостей / В.И. Барышев, К.К. Лайко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 105–112.

2. Барышев, В.И. Основы экспериментального определения прочности рабочих жидкостей / В.И. Барышев, К.К. Лайко // Вестник ПНИПУ. Серия «Аэрокосмическая техника». – 2013. – Т. 35. – С. 83–100.

3. Хохлов, В.А. Электрогидравлический следящий привод / В.А. Хохлов. – М.: Наука, 1964. – 230 с.

4. Гегузин, Я.Е. Пузыри / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1985. – 180 с.

5. Корнфельд, М. Упругость и прочность жидкостей / М. Корнфельд. – М., Л.: Гостехтеоретиздат, 1957. – 110 с.

6. Пирсол, И. Кавитация / И. Пирсол; пер. с англ. Ю.Ф. Журавлева. – М.: Мир, 1975. – 98 с.

7. Рождественский, В.В. Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977. – 248 с.

8. Хейуорд, А. Отрицательные давления в жидкостях. Как их заставить слу-жить человеку [Электронный ресурс] / А. Хейуорд // Успехи физических наук. – URL: http://www.ebiblioteka.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/Uspe-chi_Fiz_Nauk/1972/10/r7210e.pdf.

9. Виноградов, В.Е. Исследование вскипания перегретых и растянутых жид-костей [Электронный ресурс] / В.Е. Виноградов // Электронный архив УрФУ. – URL: http://elar.usu.ru/bitstream/1234.56789/942/urgu0423s.pdf.

К содержанию

УДК 532.13

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ПРЯМОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ В ПРЕЦИЗИОННЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРИВОДАХ

К.В. Найгерт, С.Н. Редников, Д.А. Костик

В данной статье приводятся характерные достоинства использования гидравлических приводов с прямым электромагнитным управлением потока, рассматриваются основные конструктивные особенности подобных гидравлических систем и возможные эффекты возникающие, в процессе эксплуатации магнитореологических жидкостей. Авторами оцениваются основные преимущества прямого электромагнитного управления потоком, в сравнении с широко распространенными типами регулирования гидропривода.

Ключевые слова: магнитореология, прецизионный гидропривод, магнетики, дросселирование, гидравлические распределители.

Во многих областях современной техники широко применяются прецизионные гидравлические приводы. Их используют в позиционирующих механизмах автоматизированного производственного оборудования, в системах управления различных летательных аппаратов, в адаптивных гидравлических опорах, сверхточных измерительных и исследовательских приборах и т.д., так как выполнение подобных операций требует перемещения исполнительных механизмов с заданной точностью или с требуемым быстродействием на уровне нескольких миллисекунд. Также перспективным направлением в совершенствовании гидравлических приводов, является возможность осуществлять позиционирование исполнительного механизма с достаточно высокой точностью без существенных потерь в быстродействии, а это ставит задачу совмещения высокой точности с достаточно большими скоростями перемещения.

Для начала рассмотрим общие преимущества применения гидравлических приводов в различных исполнительных механизмах. Основным преимуществом является высокая удельная мощность, а именно транслируемая мощность, которая приходится на единицу суммарного веса всех элементов, при этом данное преимущество повышается с ростом подаваемой мощности, следовательно, можно получить значительный коэффициент усиления гидроусилителя по мощности. Еще одна привлекательная особенность гидропривода - высокая скорость быстродействия. Скорость активизации операций по пуску, перемещению, реверсу или остановке значительно выше, чем у иных видов приводов и выполняется гидроприводом в несколько раз быстрее, что происходит благодаря малому моменту инерции исполнительного органа гидропривода, гидромотора, гидроцилиндра и т.д. [1]. В дополнение к быстродействию довольно просто обеспечивается бесступенчатое переключение скорости выходящего звена гидропривода, что позволяет плавно регулировать позиционирование или усилие создаваемое приводом на выходе, в обширном диапазоне значений. Также привлекает относительная простота реализации гидроприводом исполнения и регулирования заданного технологического режима, с элементарным, но надежным предохранением исполнительных элементов гидропривода от возможных перегрузок. Стоит отметить, что очень удобным является проектирование и реализации готовых проектов гидроприводов, а компоновка агрегатов гидропривода зачастую не имеет каких-либо ограничений, она полностью свободная, так как сопряжение элементов системы производится при помощи магистралей высокого давления. Поэтому при необходимости к гидравлическому приводу возможно подключение любого дополнительного гидравлического оборудования, это делает его довольно универсальным. Очередным большим достоинством гидропривода является возможность эффективно и просто преобразовать вращательные движения в возвратно–поступательные, чем также обосновано его широкое применения в системах управления позиционирующими механизмами. А слабое вибрационное воздействие и низкий уровень шума делает применение гидропривода еще более привлекательным [2].

Теперь рассмотрим какие дополнительные преимущества дает нам применение прямого электромагнитного управления потоком. Прежде всего, при применении подобного управления потоком повышается быстродействие и прецизионность гидропривода, так как скорость отклика частиц потока на электромагнитное поле выше скорости отклика потока на дроссельное регулирование. Для определения причин обратимся к теоретическим основам механики и магнетизма и конструктивным особенностям гидроаппаратуры. В общем, регулирование потока происходит посредством изменения кинетической энергии частиц жидкости. Именно повышение кинетической энергии

и транспортировка с последующим ее преобразованием в потенциальную энергию лежит в основе гидравлических приводов. Как правило, для управления значениями кинетической энергии потока применяют дроссели, позволяющие изменять площадь сечения проточной части канала трубопровода. Сам процесс изменения сечения проточной части канала при дросселировании осуществляется при помощи перемещения исполнительного запорно-регулирующего элемента дросселя в пространстве воздействием на него механической энергии извне. Дроссельное управление на примере принципа действия распределителей типов 4 WS. 2 EM 16 и 4 WSE 2 ED 16 от Mannesmann Rexroth, приведено на рис. 1.

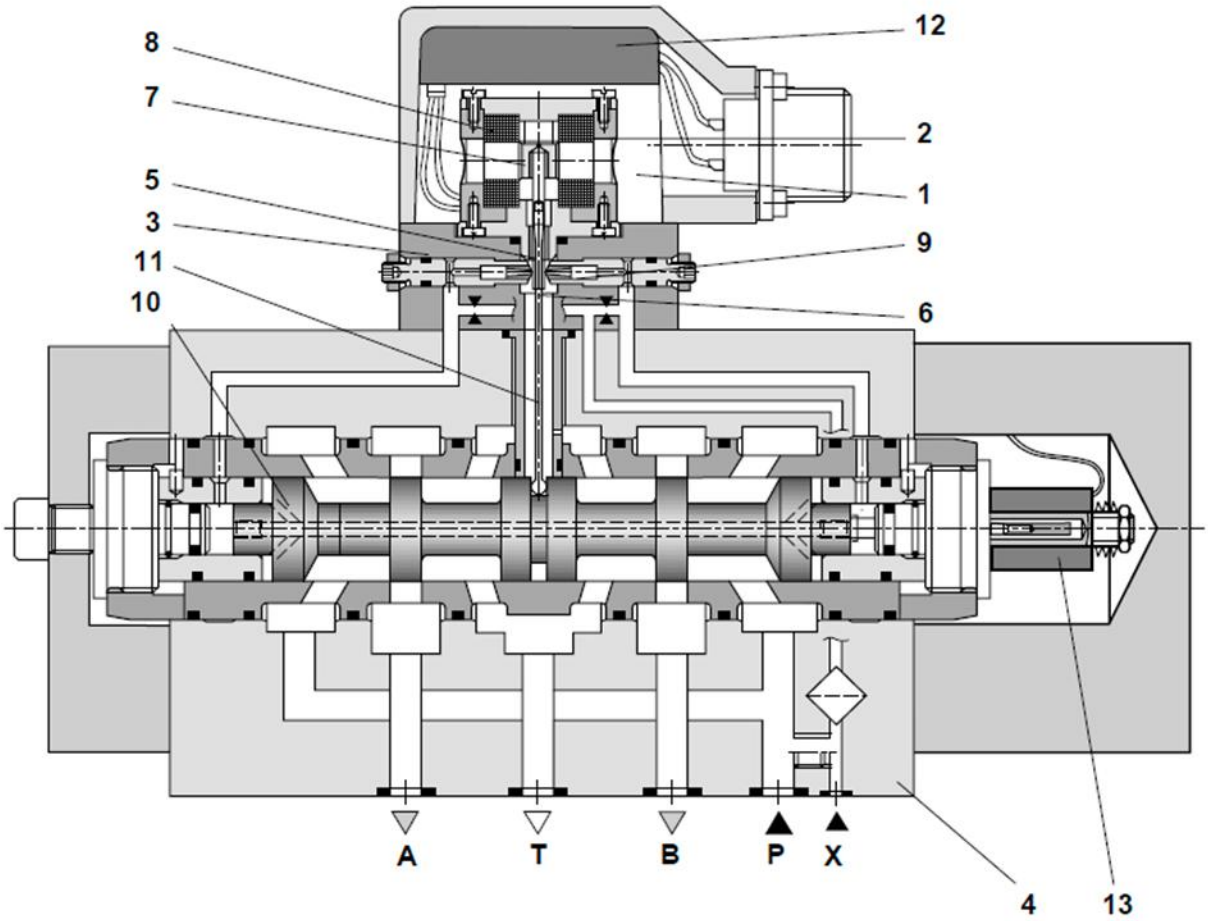


Рис. 1. Дроссельное управление потоком

Распределители типов 4 WS. 2 EM 16 и 4 WSE 2 ED 16, это электроуправляемые двухступенчатые серворапределители. Они состоят из двух частей: первой ступени (1) с управляющим двигателем (2) и гидравлическим усилителем (3) сопло-заслонка, и второй ступени (4), которая управляет основным потоком жидкости. В подобных распределителях предварительное управле-

ние действует по принципу усилителя сопло-заслонка, рассмотрим подробней принцип регулировки потока. Упругая трубка (5), центрирует анкер (7) и заслонку (6) в нейтральном положении при условии, что управляющий двигатель (2) не задействован. В случае изменения электрического входного сигнала на катушках мотора (2) на анкер (7) начинает действовать крутящий момент, что приводит к отклонению заслонки от среднего положения между соплами (9). Возникающий вследствие этого перепад давлений действует на торцы золотника (10), под действием перепада давлений золотник перемещается. Все это требует определенного количества времени на преобразование кинетической энергии потока в потенциальную энергию и последующему совершению механической работы по перемещению золотника. Закрепленный на анкере (7), конец элемента (11) обратной связи входит в проточку золотника, при этом золотник смещается до положения, в котором момент от обратной связи становится равным моменту от электромагнитов, что снижает перепад давления до нуля. Это позволяет обеспечить пропорциональность хода золотника электрическому входному сигналу. Также для управления применяется отдельный электронный сервоусилитель, в котором входной аналоговый сигнал усиливается, а выходной сигнал сервоусилителя имеет возможность управлять серворaспределителем. При желании с отдельной управляющей электроникой может применяться встроенная электроника (12), которая размещается над управляющим двигателем, а дополнительно к механической обратной связи, перемещение золотника возможно определить при помощи индуктивного датчика положения (13). Обработка всех сигналов системы управления, обеспечение измерения перемещения и управление первой ступенью осуществляется при помощи встроенной электроники (12). Существуют и другие виды управления, но в подавляющем большинстве конструкций применяется механическое перемещение запорно-регулирующего элемента, что приводит к задержке в отклике системы, связанной с выполнением данной механической работы. При применении метода прямого электромагнитного управления потоком подобные задержки в отклике системы, связанные с передачей регулировочного сигнала запорно-регулирующему элементу посредством гидромеханических, электромеханических, магнитомеханических и т.д. систем регулирования потока отсутствуют, что значительно повышает быстродействие системы управления [3].

Электромагнитное поле, индуцируемое блоком управления, оказывает прямое воздействие на частицы магнитореологической жидкости, изменяя внутреннюю энергию частиц и энергию их межмолекулярного взаимодействия, при этом изменяя внутреннюю энергию потока в целом, что влияет на вязкостные свойства магнитореологической жидкости. Проведенные нами

исследования показали, что при воздействии магнитного поля на магнитореологические жидкости можно добиться, как роста, так и падения вязкости в зависимости от химического состава образца [4]. Это свидетельствует о возможности применения подобных магнитореологических систем для моделирования условий управления, требующих как повышения, так и понижения внутренней энергии потока. Подобные эффекты достигаются посредством межмолекулярного взаимодействия в индуцированном магнитном поле антиферромагнетиков, ферромагнетиков, ферримагнетиков, парамагнетиков и диамагнетиков, входящих в состав магнитореологической жидкости [4, 7]. Разберем подробней магнитные свойства этих веществ. Антиферромагнетики – вещества, у которых при нагревании до определенных температур происходит фазовый переход второго рода, вследствие которого вещество приобретает парамагнитные свойства. Ниже температур фазового перехода магнитных свойств у этих веществ не наблюдаются. Ферромагнетики – вещества, обладающие высокой положительной магнитной восприимчивостью, которая в значительной мере зависит от напряженности магнитного поля и температуры. В ферримагнетиках присутствует некомпенсированный антиферромагнетизм, а их магнитная восприимчивость, как у ферромагнетиков зависит от напряженности магнитного поля, но у них магнитные моменты атомов различных подрешеток ориентируются антипараллельно, как и в антиферромагнетиках, но моменты различных подрешеток не равны, поэтому результирующий магнитный момент не равен нулю. У парамагнетиков магнитная восприимчивость положительна и не зависит от напряженности магнитного поля. Диамагнетики – вещества у которых магнитная восприимчивость наоборот отрицательна и также не зависит от напряженности магнитного поля. Применение определенных комбинаций магнетиков позволяет придавать магнитореологическим жидкостям требуемые индивидуальные физические свойства.

Еще одним достоинством прямого электромагнитного регулирования потока является простой механизм коррекции износа элементов управления, а так как основным недостатком гидравлического привода является эрозия поверхностей проточной части гидроаппаратуры, использование магнитореологических приводов позволяет избежать снижения прецизионности управления, связанного с износом проточной части гидравлических дросселей [5]. А за счет снижения количества подвижных механизмов в гидравлической системе снижается износ в парах трения и повышается ее надежность в целом. Для наглядности сравним два гидропривода, отличающихся друг от друга только системами управления потоком: в первом случае с электрогидравлическим управлением типа сопло-заслонка (принципиальная схема приведена на рис. 2), а во втором случае с магнитореологическим управлением потока (принципиальная схема приведена на рис. 3).

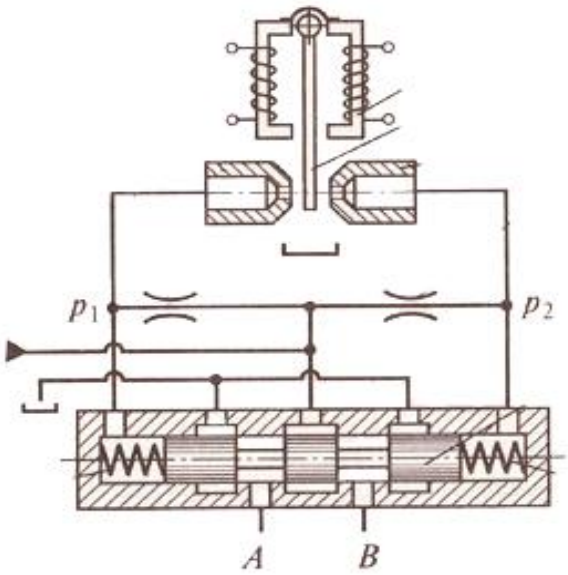


Рис. 2. Принципиальная схема электрогидравлического управления типа сопло-заслонка [6]

Двухкаскадных электрогидравлический усилитель с первым каскадом «сопло-заслонка», состоит из сопел, которые вместе с подвижной заслонкой образуют два регулируемых щелевых дросселя, и двух нерегулируемых дросселей, установленных на пути подвода жидкости к соплам. Вообще, несмотря на относительно высокое быстродействие и высокую чувствительность, такие системы довольно требовательны к степени очистки рабочей жидкости и подвержены облитерации в соплах по причине их малого диаметра и эрозии проточной части. А также на металлическую заслонку действуют силы статического и гидродинамического напоров потока жидкости, истекающей из сопел, что создает в данном рабочем узле зоны застоя и разрежения жидкости, а это приводит к возникновению высокочастотных колебаний в системе и ухудшению работы гидропривода в целом [6, 8]. Поэтому преобразуем данную гидросистему для прямого магнитореологического управления потоком, тогда принципиальная схема приобретает следующий вид.

В данном случае каналы, подводящие рабочую жидкость к соплам, оснащены экранированными электромагнитами, которые индуцируют регулируемое магнитное поле, при этом важно, что отсутствует подвижная заслонка. Именно это повышает надежность гидросистемы и быстродействие гидроусилителя, так как подвижная масса регулятора отсутствует.

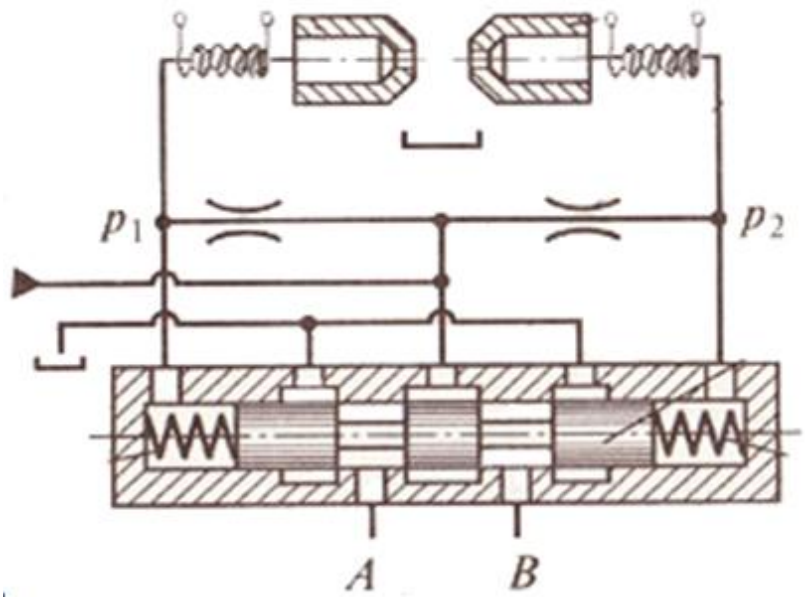


Рис. 3. Принципиальная схема магнитореологического управления

В заключении хочется отметить, что при внедрении магнитореологического управления надежность привода возрастает не только за счет снижения количества подвижных элементов, но и благодаря уменьшению общего числа исполнительных элементов привода по сравнению с подавляющим большинством подобных приводов с другими типами управления. Но при этом сохраняется высокая точность и быстродействие в управлении. Приведенные выше доводы указывают на целый ряд преимуществ, которые дает использование прямого электромагнитного управления потоком в прецизионных гидравлических приводах, что указывает на бесспорную актуальность проводимых исследований в области магнитореологии.

Библиографический список

1. Башта, Т.М. Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Высшая школа, 1977. – 605 с.

2. Белов, К.П. Успехи физ. наук / К.П. Белов. – Т. 166, № 6. – С. 669–681.

3. Блехман, И.И. Синхронизация динамических систем / И.М. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 324 с.

4. Бибик, Е.Е. Реология дисперсных систем / Е.Е. Бибик. – Л: Изд-во. Ленингр. ун-та 1981. – 172 с.

5. Левитский, Н.И. Расчет управляющих устройств для торможения гидроприводов / Н.И. Левитский, Е.А. Суханова. – М.: Машиностроение, 1971. – 231 с.

6. Попов, Е.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем / Е.П. Попов, И.П. Пальтов. – М.: Физматгиз, 1960. – 205 с.

7. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика / И.В. Савельев. – 2-е изд. – 1982.

8. Хохлов, В.А. Электрогидравлический следящий привод / В.А. Хохлов. – М.: Наука, 1969. – С. 233–240.

К содержанию

УДК 533.5 + 621.69

АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ ВАКУУМИРОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

А.В. Подзерко

Выполнен качественный анализ состояния систем вакуумирования на предприятиях металлургии и энергетики Уральского региона. Намечены пути дальнейшего совершенствования вакуумных систем.

Ключевые слова: вакуумная металлургия, энергетика, параметры работы, откачная система, вакуумный насос, струйные аппараты.

В настоящее время вакуумные системы находят все более широкое применение в самых различных областях производства – от первичной обработки полезных ископаемых до высокотехнологичных процессов и решения исследовательских задач [1]. Рассмотрим некоторые проблемы и перспективы развития вакуумных систем в энергетике и металлургии, ключевых отраслях нашего региона.

В металлургии системы откачки газов задействованы в процессах вакуумного формования, дегазации и декарбонизации расплава, снижающих содержание вредных примесей в конечном продукте, а также при нанесении различных покрытий на этапе последующей обработки деталей. В энергетике мощные вакуумные системы производят откачку парогазовой смеси из конденсаторов паровых турбин и используются в некоторых вспомогательных процессах. Технологические процессы непрерывно совершенствуются, что отражается и на требованиях к вакуумным системам. Так, например, в Японии разработан метод пульсационного перемешивания стали попеременным включением вакуумного насоса и подачи аргона, при этом эффективная работа установки не требует создания глубокого вакуума.

Эффективность любого из рассматриваемых процессов (качество выплавляемой стали, себестоимость киловатт-часа вырабатываемой электроэнергии и т.п.) определяется такими параметрами вакуумных насосов или вакуумной системы как *предельное остаточное давление* – наименьшее достижимое в определенных условиях давление при использовании конкретных устройств откачки и *быстрота откачки* – объем откачиваемого в единицу времени газа

при фиксированном давлении. Существует большое различие по быстроте откачки и достижимому остаточному давлению, что на примере отечественных вакуумных насосов иллюстрирует таблице.

Помимо представленных в таблице параметров при компоновке вакуумных систем металлургических и энергетических объектов необходимо принимать во внимание и ряд дополнительных условий: значительные газовые потоки с большим содержанием твердых частиц, минимальное время вакуумирования, периодичность рабочего цикла, показатели надежности и пр. Стремление обеспечить выполнение этих зачастую противоречивых условий требует нестандартных и комплексных решений.

Таблица

Параметры вакуумных насосов

Тип вакуум-насоса	Предельное остаточное давление, мм рт.ст.	Быстрота откачки, л/с, при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 20 °С
Поршневые: с клапанным распределением ВНК одноступенчатые ВНП двухступенчатые ВНП	 35 … 70 5 … 35 0,3 … 5	 8 … 4000 12 … 800 12 … 400
Двухроторные безмасляные ДВН	0,005	500 … 1500
Водокольцевые ВВН	15 … 110	12 … 800
Пароэжекторные (в зависимости от числа ступеней)	1 … 100	1,0 … 600 кг/ч
Диффузионные: паромасляные пароргутные	 $2x10^{-6}$…$5x10^{-6}$ $1x10^{-7}$…$3x10^{-7}$	 5…3200 10…1500

На рис. 1 показана классификация вакуумных насосов и выделены наиболее применяемые в металлургии и энергетике их разновидности. Исторически в рассматриваемых отраслях в основном использовались различные вакуумные насосы струйного типа. Так, на Магнитогорском металлургическом комбинате в системе дегазации стали в ковше применяется пятиступенчатая пароэжекторная установка. Насосы струйного типа просты, надежны и практически не требуют обслуживания, за исключением диффузионных. Однако эти насосы обладают невысоким КПД, что обусловлено потерями на смешение потоков, имеют большие осевые габариты, а также постоянно потребляют значительное количество пара или жидкости.

Вышеуказанные аспекты работы струйных аппаратов предполагают повышенные эксплуатационные затраты, поэтому в последнее время на ряде предприятий (Ириклинская ГРЭС в Оренбургской области и др.) наметилась тенденция к переходу от струйных вакуумных насосов к механическим. Во-

прос эффективности применения механических и струйных вакуумных насосов обсуждается достаточно давно, одно из первых сопоставлений на основе графиков характеристик можно найти в [2].

При этом следует отметить, что с одной стороны, конструкции вакуумных насосов непрерывно совершенствуются, повышаются их рабочие характеристики и расширяется область потенциального использования [4,5] . В этом отношении для некоторых технологических операций перспективны криогенные и турбомолекулярные насосы [3].

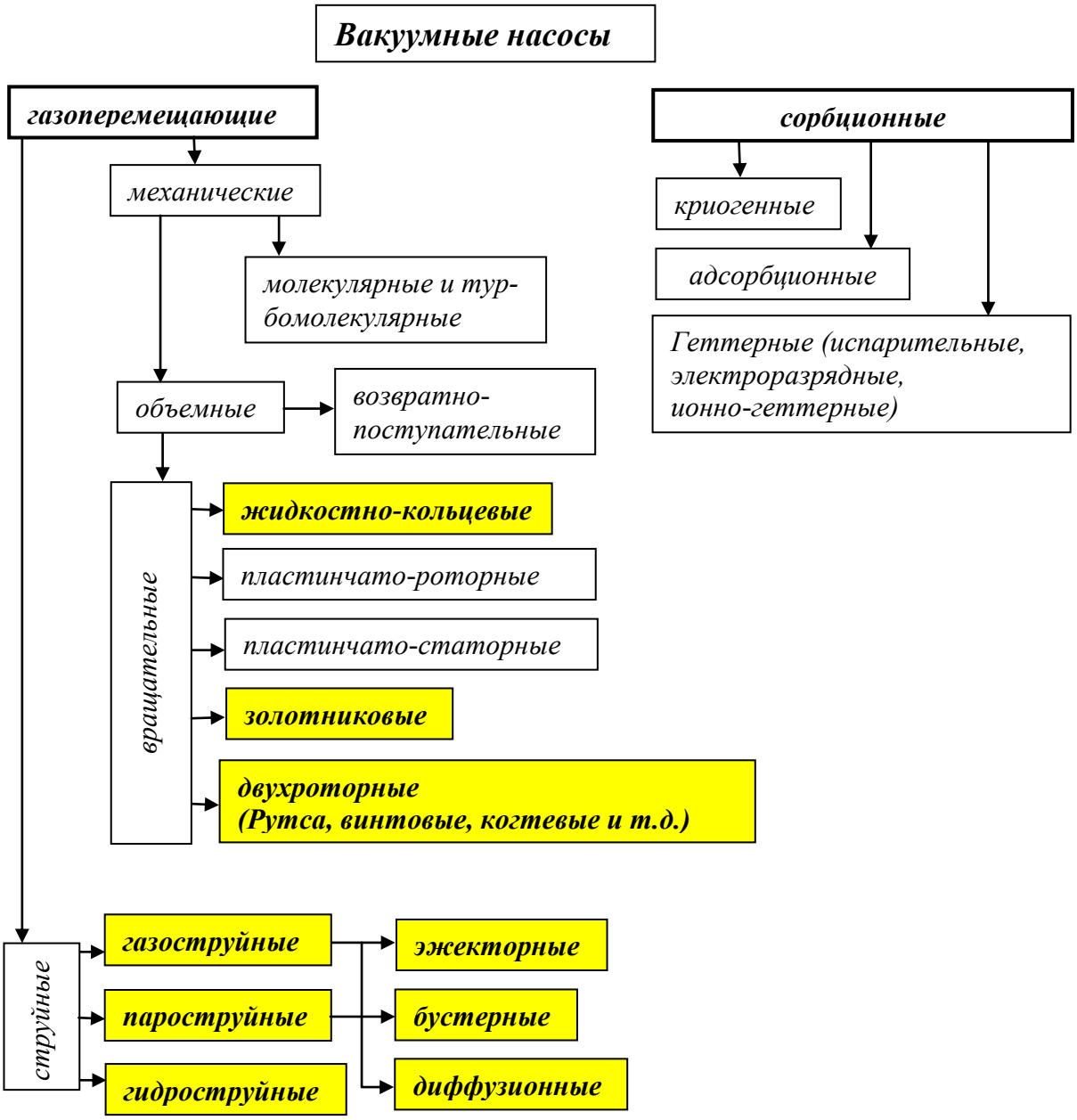


Рис. 1. Классификация вакуумных насосов

С другой стороны, возможности отдельного насоса не беспредельны и зачастую ограничены физикой самого рабочего процесса. Так, например, жидкостно-кольцевой насос отличается простотой конструкции, изотермичностью процесса сжатия газа, но не может обеспечить давления всасывания ниже давления насыщенных паров жидкости. В этом случае для повышения характеристик вакуумной системы применяется комбинированные схемы, одна из которых показана на рис. 2. В этой схеме жидкостно-кольцевой насос создает предварительное разряжение, а струйный аппарат выполняет функцию газобалласта, предотвращая интенсивное испарение жидкости в форвакуумном насосе.

Маслосмазываемые вакуумные насосы (например, золотниковые) обладают повышенной герметичностью, но загрязняют парами масла вакуумируемый объем, что требует установки вакуумных ловушек и дополнительного обслуживания при эксплуатации.

Проблема откачки газа с большим содержанием твердых частиц может решаться либо выбором соответствующего типа вакуум-насоса (например, струйного), либо системой предустановленных фильтров или скрубберов, причем есть опыт удачного использования батарейных циклонов с пониженным гидравлическим сопротивлением.

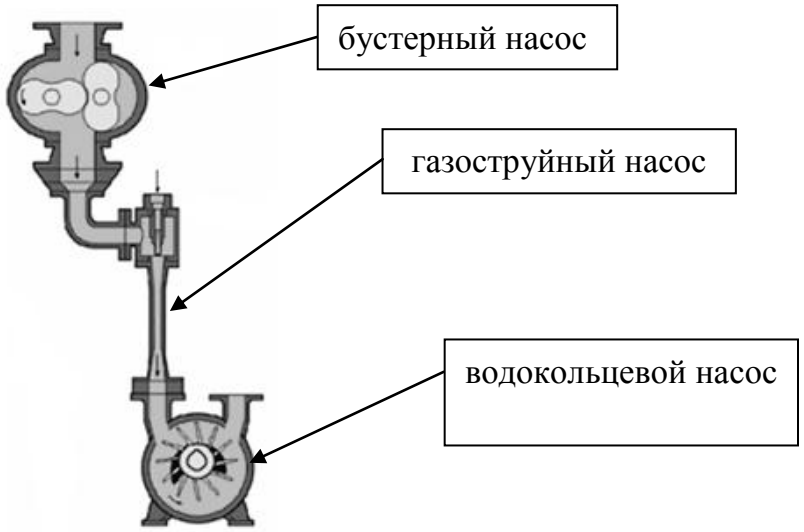


Рис. 2. Схема двухступенчатой вакуумной установки с механическими насосами

Знакомство с вакуумными системами ряда предприятий Уральского региона (ММК, г. Магнитогорск; ВСМПО «АВИСМА», г. Верхняя Салда; «Пермские моторы» и др.) позволило выделить несколько групп вакуумных установок с точки зрения их технического состояния.

1. Новые системы с современным оборудованием, поставляемые «под ключ». Эти системы еще не выработали своего ресурса, при соблюдении рекомендуемого режима работы работают стабильно и без отказов. Сложности, в основном, обусловлены необходимостью приобретать дорогостоящие комплектующие с большим сроком поставки.

2. Предельно изношенные системы советского производства, дающие постоянные отказы, но ввиду простоты конструкции ремонтируемые собственными силами. Помимо прочего, такие системы часто не отвечают современным экологическим стандартам. Так, выхлоп газа после маслосмазываемого форвакуумного насоса может осуществляться непосредственно в помещение цеха, что недопустимо. Такие системы обычно недоукомплектованы необходимыми аксессуарами (вакуумные маслоуловители, виброкомпенсаторы, контрольно-диагностическое оборудование). Все эти факторы не позволяют повысить рабочие характеристики системы.

3. Системы, спроектированные под иные параметры работы или подвергнутые глубокой модернизации с заменой насосов. В таких системах наблюдаются нарушения работы, обусловленные несогласованностью характеристик вакуумных насосов и системы. Так, например, недостаточно быстрый набор вакуума форвакуумным насосом может вызвать волновые процессы с ударами при запуске основного диффузионного насоса. Другой пример. Суммарная производительность жидкостнокольцевых насосов в контуре предварительного разряжения – ниже расчетной. Основной двухроторный насос начинает работать под повышенным перепадом давления, что приводит к перегреву подшипников и срабатыванию защитной автоматики.

Подводя итог всему вышесказанному, можно наметить следующие направления совершенствования вакуумных систем металлургии и энергетики:

– создание комплексных систем с насосами разных типов, с высокой степенью распараллеливания, что повышает показатели надежности и расширяет диапазон регулирования;

– использование вакуумных машин сухого сжатия (Рутса, винтовых), не загрязняющих систему частицами масла, а также применение вакуумных насосов с расширенными возможностями регулирования (частотное управление, струйные аппараты с регулируемым соплом и т.п.);

– максимально широкое применение автоматики для управления системой и мониторинга ее состояния;

– согласование работы отдельных ступеней вакуумной системы как на этапе проектирования, так и процессе ее эксплуатации;

– подготовка и постоянное обучение персонала, способного эффективно обслуживать сложные современные вакуумные системы.

Библиографический список

1. Кеменов, В.Н. Вакуумная техника и технология / В.Н. Кеменов, С.Б. Нестеров. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 84 с.

2. Standard Handbook for Mechanical Engineers. – Baumeister & Marks, 7th Edition, 1966. – pp. 9–93.

3. Васильев, Ю.К. Современные пути оптимизации откачных вакуумных систем на базе диффузионных насосов / Ю.К. Васильев, С.Б. Нестеров // Материалы IV Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технологии». – М.: Новелла, 2009. – С. 81–84.

4. Вакуумные насосы и компрессоры для электростанций. NASH Gardner Denver Product, 2010. [Электронный ресурс]. – URL: http://rusimp-snab.ru/d/90830/d/nash-powerindustry-ru.pdf.

5. Вакуумная технология [Электронный ресурс]. – URL: www.oerli-kon.com/leyboldvacuum/.

К содержанию

АВТОТРАКТОРНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

УДК 629.1:656.02 + 656.13.08

К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ СТЕПЕНИ ТЯЖЕСТИ ТРАВМИРОВАНИЯ УЧАСТНИКОВ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ПРИ ДТП

К.В. Глемба

Одним из путей повышения безопасности движения является улучшение эффективности работы элементов пассивной безопасности автомобиля. Проведенный анализ перспективных способов обеспечения безопасности участников движения при ДТП и во время резкого и неожиданного замедления транспортного средства выявил необходимость учета физиолого-психологических свойств человека. Приведены критерии и параметры оценки переносимости организмом человека ударной перегрузки, кратко рассмотрены результаты экспериментальных исследований в этой области.

Ключевые слова: пассивная безопасность, человек-оператор, система человек-капсула, демпфирование, ударная перегрузка и скорость ее нарастания, упруго деформированный элемент, диссипация механической энергии.

Проблема повышения безопасности при управлении мобильными машинами человеком-оператором остается нерешенной до сих пор, что подтверждается тенденцией неснижаемой статистики травматизма. В настоящее время она превратилась в острую социальную проблему современности. Отечественные и зарубежные исследования показывают значительное влияние человека–оператора на безопасность, например, его ошибочные действия при управлении техникой являются причиной более 70 % случаев ДТП [1–4]. Рассматривая основные стандарты конструктивной безопасности, следует отметить, что даже современные автоматические системы элементов активной безопасности не справляются с большей частью ошибочных действий, допущенных водителем при управлении, что приводит к травматизму и летальному исходу в ДТП. Поэтому область повышения эффективности работы элементов пассивной безопасности транспортных средств является важной составляющей стратегии борьбы со смертностью и травматизмом при ДТП, одним из путей улучшения системы безопасности движения (БД), как и повышение профессиональных качеств человека-оператора, совершенствование элементов активной безопасности [3–4]. Одним из путей решения данной задачи является создание таких амортизирующих систем (рис. 1), которые гасили бы кинетическую энергию фронтального удара при столкновениях

на больших скоростях, т.е. накапливали бы потенциальную энергию в упругих элементах, а затем демпфировали бы удар в результате диссипации механической энергии в элементах сухого или вязкого трения [5].

Рис. 1. Классификация амортизирующих систем

Для выбора оптимального варианта необходимо рассмотреть элементы обеспечения пассивной внутренней безопасностью участников движения при ДТП, когда происходит резкое и неожиданное замедление транспортного средства. В этом процессе создаются огромные ударные перегрузки, действующие на тела участников движения. На величину ударной перегрузки и на время её замедления влияет дистанция замедления, которая равняется величине перемещения в амортизирующей системе. Следовательно, задача состоит в снижении ускорений тела участника движения при столкновениях за счет увеличения продолжительности деформирования амортизирующих систем таким образом, чтобы поглощалось как можно больше энергии удара. То есть, чем больше величина деформация и чем дольше она происходит, тем меньше ударные перегрузки испытывает тело участника движения и тем меньше (что особенно важно) скорость возрастания ударных перегрузок, которая является определяющем фактом в достижении предела человеческих возможностей [5, 6].

В связи с этим, между креслом (или капсулой) и передней стенкой салона (кабины) должна быть минимально необходимая зона жизнеобеспечения, то есть минимальное пространство, в пределах которого происходит перемещение системы человек-кресло или человек-капсула в случае «лобового» столкновения. В то же время длина этой зоны соответствует максимальной длине хода амортизирующих систем, что обусловливает одно из главных требований к ним – они должны иметь такую длину хода при ударе, чтобы обеспечить достаточное увеличение времени замедления ударных перегрузок. Выполнение такого требования является необходимым условием для снижения величины пиковых перегрузок до предельно переносимых значений при высоких скоростях фронтального удара, а также для уменьшения скоростей нарастания ударных перегрузок, оказывающих наиболее сильное влияние на их переносимость [7].

Примером демпфирующих систем могут послужить модели детских кресел или бустеров, тесты которых показали, что детское кресло снижает давление на живот «ребенка» в полтора раза по сравнению с бустером и втрое по сравнению со штатным ремнем (рис. 2). Ниже приведены результаты тестов *Renault* с экспериментальным манекеном: при фронтальных краш-тестах по методике *ADAC* (64 км/ч, рельсовая тележка с закрепленным фрагментом кузова автомобиля) (см. рис. 2) [5–7].

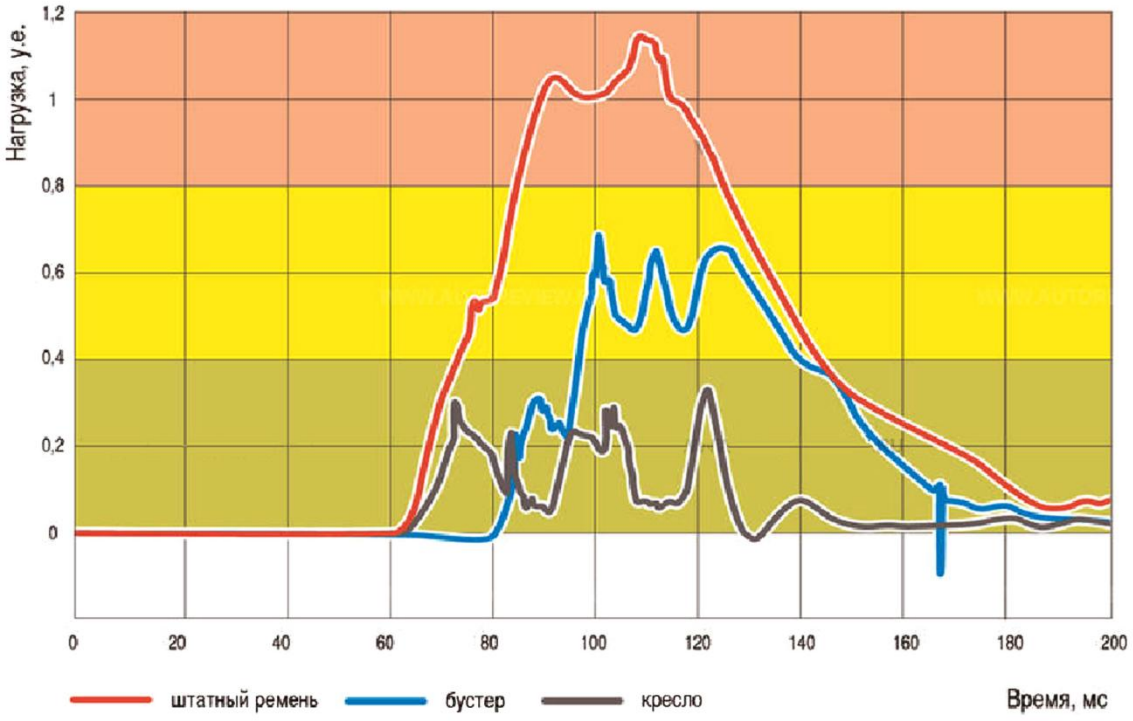


Рис. 2. Результаты тестов *Renault* с экспериментальным манекеном: со штатным ремнем, с бустером и детским креслом

Резервы человеческого организма по переносимости аварийных ударных перегрузок наиболее полно исследованы учеными, причем были установлены основные принципы повышения переносимости ударных перегрузок [8, 9]. На рис. 3 приведены результаты экспериментов с испытателями по оценке переносимости ударов с большой скоростью нарастания перегрузки на кресле.

Анализ экспериментов показал, что при больших скоростях нарастания перегрузки максимальное значение перегрузки n_{max}=100…210 ед. (см. рис. 3) не является критерием переносимости ее человеком. В условиях экспериментов критерием оказалась скорость, теряемая при ударе (рис. 4) [8, 9]. Переносимость человеком ударных перегрузок характеризуется функцией $dV = f(n)$, где dV – скорость, теряемая при ударе, допустимая величина которой зависит от скорости нарастания перегрузки n.

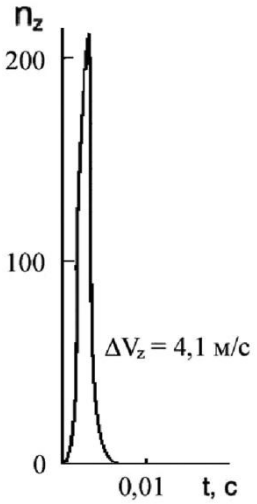


Рис. 3. Критерий переносимости ударной перегрузки человеком

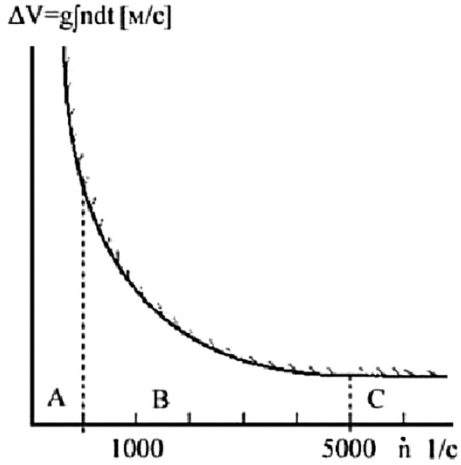


Рис. 4. Зависимость переносимости человеком ударной перегрузки: A – n < = 500 с$^{-1}$; B – 500 < n < = 5000 с$^{-1}$; C – n > 5000 с$^{-1}$

В координатах $(dV; n)$ весь спектр ударных воздействий может быть разбит на три диапазона с различными критериями переносимости в каждом из диапазонов. В диапазоне A – n=500 с$^{-1}$ для диаграмм перегрузки в форме трапеции, полусинусоиды или треугольника определяющим фактором служит максимальное значение ударной перегрузки. В данном случае для повышения безопасности человека необходимо снижать максимальную амплитуду ударной перегрузки, что может быть достигнуто: за счет снижения скорости удара; за счет применения амортизационных систем с достаточным ходом и характеристикой, при которой максимальная перегрузка и скорость ее нарастания не выходят за установленные пределы. В диапазоне B – 500<n<=5000 с$^{-1}$ величина потерянной при ударе скорости составит $dV = f(n_{max}; n)$. Из имеющегося банка экспериментальных данных подбираются аналоги диаграмм $n(t)$,

переносимость которых человеком была изучена ранее, либо проводятся целенаправленные экспериментальные и теоретические исследования. Как видно по рис. 4, в этом диапазоне воздействий безопасность человека существенно зависит от скорости нарастания ударной перегрузки; при снижении скорости нарастания перегрузки безопасная для человека скорость dV быстро возрастает. В диапазоне $C - n > 5000$ с$^{-1}$ скорость $dV \le dV_{\max} - const$, т.е. в этом диапазоне воздействий переносимость человеком удара не зависит от величины перегрузки и от формы диаграммы перегрузки, а зависит только от скорости, потерянной (приобретенной) при ударе [7–9].

При изучении процесса упругости в системы человек-капсула существуют важные моменты: в диапазонах *B* и *C*, где критичным параметром служит интеграл ускорения dV – скорость, потерянная или приобретенная при ударе – безопасность человека может быть повышена не только за счет очевидного мероприятия – снижения начальной скорости удара, но также за счет снижения упругости системы человек-капсула (человек-кресло). Как известно, при абсолютно упругом ударе коэффициент восстановления скорости $K_V = V_{отск} / V_0 = 1$, где $V_{отск}$ – скорость отскока при ударе, м/с; V_0 – начальная скорость удара, м/с. В этом случае скорость, потерянная при ударе, составит $dV = 2V_0$. Если удар абсолютно пластичный, то $K_V = 0$, и $dV = V_0$. На практике для реальных систем человек-кресло $0 < K_V < 1$ [5–9]. Как видно из приведенных соотношений, для диапазонов *B* и *C* снижение упругих свойств системы человек-капсула, т.е. снижение скорости отскока системы при ударе, существенно повышает безопасность человека. Схема формирования скорости отскока при ударе показана на рис. 5 [8–10].

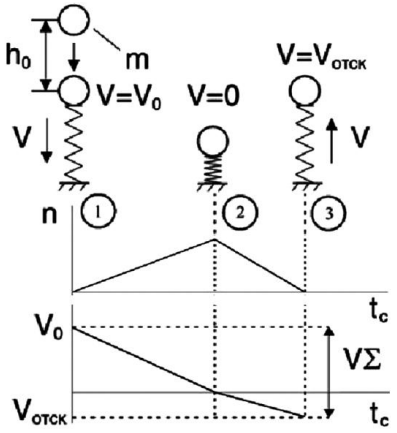


Рис. 5. Схема формирования скорости отскока $V_{отск}$ и скорости, потерянной при ударе dV, для тела массы *m*:
h_0 – высота свободного падения;
V_0 – начальная скорость удара;
$V_{отск}$ – скорость упругого отскока

В качестве примера расчета системы пружинной амортизации ударных перегрузок рассматривается реальный случай, когда система человек-капсула или имеет массу 120 кг. Предполагается, что конструкция системы пружинной амортизации обеспечивает постоянную скорость нарастания ударной перегрузки $\dot{n}$=500 с$^{-1}$. Скорость фронтального удара при столкновении равняется 88 км/ч (24, 4 м/с), амплитуда $n(\Delta t)$ ударной перегрузки равняется пиковой перегрузке 50 *g*, при которой используются почти все резервы человеческого организма по переносимости аварийных ударных перегрузок [5, 9, 10].

Резервы человеческого организма по переносимости аварийных ударных перегрузок наиболее полно исследованы при разработке систем аварийного спасения летчиков и космонавтов [7–10]. При этом были установлены основные принципы повышения переносимости ударных перегрузок. Установлена наилучшая переносимость ударных перегрузок, которые действуют в направлении грудь–спина. В таких случаях предел выносливости ударных перегрузок для человека достигает 50…60 g при скоростях нарастания ударных перегрузок $\dot{n} = dn/dt$ не превышающих 500…600 $с^{-1}$ [5, 9].

При расчете устанавливаются такие механические характеристики системы пружинной амортизации, при которой амплитуда $n(\Delta t)$ ударной перегрузки и скорость $\dot{n} = dn/dt$ нарастания ударной перегрузки не превысили бы резервы человеческого организма по переносимости аварийных ударных перегрузок. Результаты расчетов представлены в таблице [9].

Параметры пружинной амортизирующей системы

№	Наименование параметра	Обозначение и размерность	Время замедления после удара, t, с				
			0,02	0,04	0,06	0,08	0,1
1	Значение перегрузки	$n(t)$, ед	10	20	30	40	50
2	Скорость системы человек-капсула	$u(t)$, м/с	29,6	26,7	21,8	14,9	6,1
3	Усилие в амортизирующей системе	$F(t)$, т	1,2	2,4	3,6	4,8	6,0
4	Значение перемещения в амортизирующей системе	$S(t)$, м	0,33	0,62	0,82	0,91	0,91
5	Значение размера амортизирующей системы*	$x(t)$, мм	1307	1353	1476	1718	2117
6	Значение относительного размера амортизирующей системы**	$\frac{x(t)}{L}$, ед	0,59	0,62	0,67	0,78	0,96
7	Логарифм относительного усилия (требуемого)	$\lg\frac{F}{F_{\min}}$	0	0,3	0,48	0,6	0,7

Примечание: l_0=1,3 м – длина амортизирующей системы в ненагруженном состоянии, м; * $x(t) = l_0 + S(t)$; **L=2,2 м – размер амортизирующей системы в предельном состоянии.

Изучая параметры системы амортизации ударных перегрузок выявлено, что амплитуда ударной перегрузки $n_{\max}$ определяется скоростью фронтально-

го удара V_0, м/с. В зависимости от механических характеристик систем пружинной амортизации диаграммы ударных перегрузок могут иметь формы трапеций, треугольников или полусинусоидов [5, 6, 9]. Поскольку определяющим фактором воздействия ударной перегрузки на человеческий организм является скорость нарастания ударной перегрузки $\dot{n} = dn/dt$, то независимо от формы всей диаграммы ударной перегрузки в расчетах должна рассматриваться в основном только её восходящая ветвь. Тангенс угла наклона этой прямой к оси абсцисс представляет собой скорость нарастания ударной перегрузки $\dot{n} = dn/dt$, которая является постоянной величиной. Максимальная продолжительность Δt замедления ударных перегрузок на участке нарастания может быть рассчитана как $n_{\max} / \dot{n}$. Текущая величина ударной перегрузки $n(t)$ может быть рассчитана как $\dot{n}t$. Относительная скорость $u(t)$, потерянная в момент времени t при ударе в результате срабатывания системы амортизации может быть рассчитана как $g\int_0^t n dt$. В случае, когда скорость нарастания ударных перегрузок предполагается постоянной величиной, это выражение может быть приведено к виду $u(t) = 0{,}5g\dot{n}t^2$. В таком случае разность $V_0 - u(t)$ следует рассматривать как текущее значение абсолютной скорости системы человек-капсула, соответствующее времени t с момента столкновения. Максимальная длительность Δt нарастания ударных перегрузок таким образом будет соответствовать абсолютной скорости $V(t)$ системы человек-капсула определяемой как [5, 9]:

$$V(t) = V_0 - u(t) = V_0 - 0{,}5g\dot{n}t^2. \quad (1)$$

Текущее значение ударной перегрузки $n(t)$ в любой момент времени t может быть определено как $\dot{n}t$. Значение перемещения $S(t)$ в амортизирующей системе (т.е. перемещение системы человек-капсула при столкновении) в момент времени t с начала столкновения может быть определена как $\int_0^t u(t)dt$. После интегрирования это выражение принимает вид [5, 9]:

$$S(t) = \frac{g}{6}\dot{n}t^3. \quad (2)$$

Максимальная значение перемещения $S(\Delta t)$ в амортизирующей системе на рассматриваемом участке определяется как [5, 9]:

$$S(\Delta t) > \frac{g}{6} \cdot n (\Delta t)^3. \quad (3)$$

С целью упрощения расчетов предполагается, что 60…80 % скорости фронтального удара V_0 теряется (гасится) амортизирующей системой на участке, ограниченном восходящей ветвью диаграммы перегрузок. При таком упрощении получаем [5, 9]:

$$u(t) = 3{,}53 \cdot n^{\frac{1}{3}} S(t)^{\frac{2}{3}}. \quad (4)$$

Величина фронтальной скорости при столкновении, которая может быть потерянная при ударе, в идеальном случае приближенно может быть рассчитанная как [5, 9]:

$$V_0 = 1{,}25 u(\Delta t). \quad (5)$$

Преобразуя уравнения (3) и (4), получим формулу [5, 9]:

$$n(S) = 0{,}849 \cdot n^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

которая может быть приведена к виду [5, 9]:

$$n(t) = 0{,}849 \cdot n^{\frac{2}{3}} S(\Delta t)^{\frac{2}{3}}. \quad (7)$$

Исходя из сказанного, можно сформулировать следующие задачи для дальнейшей научно-исследовательской работы в этом направлении:

1) проведение патентно-информационного поиска по современным принципам взаимодействия силовых элементов пассивной безопасности;

2) анализ закономерностей взаимодействия силовых элементов пассивной безопасности и формирование методик изучения процесса их взаимодействия, моделирование таких систем.

Выводы. В настоящее время усложняющаяся социально-техническая система не позволяет устранить ошибки, допускаемые человеком, и недооценка человеческого фактора существенно снижает в целом безопасность функционирования таких систем [2–4].

Системный анализ взаимосвязи элементов конструктивной безопасности показал, что на случай возникновения ДТП система пассивной безопасности автомобиля должна проектироваться исходя из предельных научно обоснованных физиологических возможностей человека по переносимости аварийных перегрузок. При этом упругость всех элементов системы пассивной безопасности должна быть минимальной [5]. Обеспечение достоверности результатов испытаний по пассивной безопасности возможно только с уточнением границы применимости критериев, используемых для оценки конструктивной и эксплуатационной безопасности автомобилей с учетом результатов современных теоретических и экспериментальных исследований по данной проблеме.

Библиографический список

1. Госавтоинспекция МВД России [Эл. ресурс]. Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения. – URL: http://www.gibdd.ru.

2. Глемба, К.В. Обзор методов определения надежности оператора в динамических эргатических системах / К.В. Глемба, О.Н. Ларин // Транспорт Урала. – 2012. – № 1(32), январь-март. – С. 17–22.

3. Глемба, К.В. Вопросы применения системного подхода для повышения безопасности дорожного движения / К.В. Глемба, О.Н. Ларин // Ежемесячный научный информационный сборник «ТРАНСПОРТ: наука, техника, управление». – М.: ВИНИТИ РАН, 2013. – № 11.

4. Глемба, К.В. Выявление и совершенствование проблемных взаимосвязей структурных элементов системы безопасности движения мобильных машин / К.В. Глемба, Ю.И. Аверьянов // Вестник ЧГАА. – 2013. – Т. 66. – С. 25–34.

5. Рабинович, Б.А. Безопасность человека при ускорениях: биомеханический анализ / Б.А. Рабинович. – М., 2007. – 208 с.

6. Аруин, А.С. Эргономическая биомеханика / А.С. Аруин, В.М. Зациорский. – М., 1988. – 256 с.

7. Stapp J.P., Taylor E.R. Space cabin landing impact vector effects of human physiology. Aerospace Medicine, 1964, vol. 35, no. 12, p. 973.

8. Swearingen J.J. Human voluntary tolerance to vertical impact. Aerospace Medicine, 1960, vol. 31, no. 12, p. 989.

9. Severin G.I. Comprehensive approach to the problem of the crew emergency escape from flying vehicles. Aircraft safety conference. Russia, Zhukovsky, 1993.

10. Severin G.I. New escape system of «Zvezda». Military Parade, july – aug., 1994.

К содержанию

УДК 621.436:621. 822

НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И РЕСУРС ВКЛАДЫША ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДИЗЕЛЯ

И.Г. Леванов, В.В. Герцев

В статье представлены результаты расчётной оценки гидромеханических характеристик, интенсивности изнашивания и времени работы шатунного подшипника коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5 на режиме номинальной мощности. Предпринята попытка оценки напряжённо-деформированного состояния вкладыша шатунного подшипника от гидродинамических давлений, возникающих в смазочном слое.

Ключевые слова: вкладыш шатунного подшипника, ресурс, методика.

Введение. Подшипники скольжения коленчатого вала дизеля являются одними из узлов трения, определяющих надёжность двигателя. Сегодня мировые лидеры в производстве вкладышей подшипников скольжения, такие как Miba, Federal Mogul, Glyco большое внимание уделяют материалам и технологии изготовления вкладышей. В результате на рынке присутствуют вкладыши, имеющие улучшенные эксплуатационные свойства и повышенный ресурс.

Один из примеров это вкладыши марки Glyco Sputter из запатентованного сплава G-488, представляющего из себя композитный материал с многослойной структурой, в основе которой находятся медь, олово и никель. Слой оловянно-медного сплава плавно переходит в оловянно-никелевую структуру, что обеспечивает хорошую приработку и практически идеальное сопряжение поверхностей после её окончания, а также высокую прочность вкладыша и срок службы. Другая мировая тенденция это применение полимерного покрытия на вкладышах коленчатого вала как, например, Glyco IROX [1]. Применение полимера на поверхности вкладыша позволяет обеспечивать кратковременную работу без смазочного масла.

Применение новых материалов и технологий для изготовления вкладышей подшипников скольжения коленчатого вала позволяет значительно повысить нагрузочную способность подшипников и работать конструкторам над дальнейшим увеличением мощности двигателей. При этом необходимо заметить, что новые материалы не содержат свинца, который запрещён к использованию в Европе Директивой Европейского Союза 2000/53/ЕС.

В отечественном двигателестроении для изготовления вкладышей продолжают применять сплавы на основе свинцовистой бронзы. В частности, крупнейшее в СНГ предприятие ОАО «Завод подшипников скольжения» (ОАО «ЗПС») по производству подшипников и биметаллической ленты использует биметалл, состоящий из стальной основы (сталь 08ПС) и одного из следующих антифрикционных сплавов:

– АО-20 (олово 20 %, медь 1 %, алюминий остальное);

– Бр.ОФ 6,5-0,15 (олово 6,5 %, остальное медь);

– Бр.ОЦС 4-4-2,5 (олово 4 %, цинк 4 %, свинец 2,5 %, остальное медь) и др.

Подшипники скольжения ОАО «ЗПС» поставляются на конвейер многих ведущих производителей, таких как Минский моторный завод, ОАО «Автодизель» (г. Ярославль), Волгоградский моторный завод, ОАО «Алтайдизель» (г. Барнаул), Владимирский и Челябинский тракторные заводы, Ульяновский моторный завод и др.

Указанные подшипниковые сплавы не могут обеспечить дальнейшее повышение технического уровня отечественных двигателей. ОАО «ЗПС» понимая это сегодня, ведёт разработку новых подшипниковых сплавов.

Современные методики расчёта подшипников скольжения коленчатых валов учитывают свойства конструкционных материалов досаточно условно и позволяют оценивать ресурс трибосопряжения «вкладыш-смазочный слой-шейка коленчатого вала» на стадии проектирования в первом приближении, а испытания новых материалов на трение и износ требует большого объёма экспериментальной работы. Моделирование процесса изнашивания трибосопряжений в большинстве случаев сводится заданию линейной интегральной интенсивности изнашивания используемых материалов и далее к расчёту по элементарным формулам.

Цель статьи – на основе существующих методик оценить ресурс подшипника скольжения коленчатого вала с учётом напряжённо-деформированного состояния вкладыша от гидродинамических давлений, возникающих в смазочном слое.

Краткий обзор методик расчёта подшипников скольжения коленчатого вала. В настоящее время для расчета подшипников скольжения можно выделить две группы методик [2–8]. Первая основана на определении средних и максимальных удельных нагрузок, приходящихся на единицу площади проекции вкладыша и сравнении с допустимыми значениями. Хотя данный метод давно устарел, но в настоящее время очень широко распространен по двум причинам: во-первых, метод очень прост и, во-вторых, колоссальное количество расчетов выполненных этим методом дает хорошую статистику для оценки работы вновь создаваемых подшипников.

Второй большой комплекс методик расчета подшипников скольжения основан на гидродинамической теории смазки с использованием различных модификаций уравнения О. Рейнольдса [9].

Подшипники скольжения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания работают в различных режимах трения. В момент пуска преобладает граничное трение, в момент разгона происходит переход от граничного к полужидкостному и далее к жидкостному трению. Несмотря на существование отдельных методик, позволяющих оценить ресурс подшипников скольжения, ответа на вопрос о количестве моточасов подшипника скольжения коленчатого вала до сих пор нет. Это обусловлено сложным характером нагружения шатунных и коренных подшипников коленчатых валов, многообразием свойств конструкционных и смазочных материалов и рядом других факторов.

Расчет подшипников скольжения дизеля на основе гидродинамической теории смазки.

Известными критериями работоспособности подшипников скольжения при жидкостной смазке являются [2]: наименьшая допустимая или критическая минимальная толщина смазочного слоя h_{lim} и температура в рабочей зоне подшипника.

Величина h_{lim} выбирается из условия обеспечения гидродинамического режима трения в подшипнике скольжения. Минимальная допустимая толщина масляного слоя должна быть больше средней суммы микронеровностей вала и вкладыша:

$$h_{доп} > R_{z1} + R_{z2},$$

где R_{Z1},R_{Z2} – высота микронеровностей шипа и подшипника.

Оценка работоспособности подшипников скольжения коленчатого вала также проводится по расчетной величине относительной суммарной за цикл нагружения протяженности области $\alpha_{h_{доп}}$ где значения h_{min} меньше критической величины. В случае $h_{min} < h_{lim}$ имеет место нарушение режима жидкостной смазки, и подшипник эту часть угла поворота коленчатого вала работает в условиях смешанной смазки. Опыт свидетельствует, что предельная продолжительность зоны смешанной смазки не должна превышать 15–20 % [10]. В случае превышения этого значения резко повышается вероятность возникновения задира в подшипнике.

Наряду с минимальной толщиной смазочного слоя необходимо принимать во внимание величину максимальных гидродинамических давлений, которые определяют не только несущую способность подшипников, но и усталостную долговечность вкладышей трибосопряжения.

В работе [11] предложена расчетно-экспериментальная методика оценки скорости изнашивания радиальных подшипников скольжения коленчатых валов ДВС. Эта методика разработана в соответствии с молекулярно-механической теорией трения и усталостной теорией износа (по И.В. Крагельскому) и объединяет их с гидродинамической теорией смазки.

Методика [11] была интегрирована в пакет прикладных программ [12], который ориентирован на расчёт динамики шатунных и коренных подшипников коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания с учётом конструктивных и режимных факторов. Этапы расчёта следующие:

1. На каждом шаге расчёта подшипника [12] по углу поворота коленчатого вала, где $h_{min} < h_{lim}$ используются основные соотношения и формулы, изложенные в [11].

2. После завершения расчёта цикла нагружения вычисляется путь трения расчётной зоны вкладыша для заданного режима работы двигателя и времени работы двигателя на этом режиме. Поскольку 1 цикл нагружения подшипника равен 2 оборотам коленчатого вала, то для определения количества циклов необходимо частоту вращения двигателя поделить на 2. Таким образом, мы получим путь трения за некоторое количество циклов нагружения подшипника, соответствующее времени работы двигателя по формуле:

$$L_{TP} = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \frac{\alpha_{h_{\partial on}}}{100} \cdot \frac{n_{\partial}}{2} \cdot 60 \cdot \tau_{\partial}, \text{м} \qquad (1)$$

где d – диаметр шейки вала, м; n_{∂} – частота вращения двигателя, мин$^{-1}$; τ_{∂} – первое приближение по времени работы двигателя, в часах.

3. С учётом пути трения рассчитываются условные толщины износа материала вкладыша и шейки вала в зоне контакта, а также скорости изнашивания по формулам, представленным в [11].

4. Полученные значения толщин износа и скоростей, интенсивностей изнашивания поверхностей трения усредняются и затем вычисляется радиальный зазор в зоне граничного трения в подшипнике Δ_p^{τ} на соответствующем режиме через заданное время работы двигателя с учётом средних толщин износа по формуле:

$$\Delta_p^{\tau} = \Delta_p + \Delta\overline{H}_n + \Delta\overline{H}_в. \qquad (2)$$

5. Полученное значение Δ_p^{τ} сравнивается с предельно допустимым значением зазора $\Delta_{p\partial on}^{\tau}$. Если Δ_p^{τ} больше $\Delta_{p\partial on}^{\tau}$, то начальное значение времени работы двигателя τ_{∂} корректируется в сторону уменьшения на 10 % и расчёт пути трения, толщин изношенного материала и скоростей изнашивания повторяется.

Результаты расчёта шатунного подшипника коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5). Необходимо отметить, что величину ресурса шатунного подшипника в значительной мере определяет предельно допустимое увеличение радиального зазора. В связи с этим под предельно допустимым износом подшипника будем понимать увеличение радиального зазора между поверхностями трения, при котором не обеспечивается преимущественно гидродинамический режим трения. Для рассматриваемого подшипника за предельную величину принято значение радиального зазора в зоне износа в 115 мкм.

Результаты расчётной оценки гидромеханических характеристик, интенсивности изнашивания и времени работы шатунного подшипника коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5 до предельного износа в режиме номинальной мощности двигателя представлены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Результаты расчётной оценки гидромеханических характеристик, интенсивности изнашивания и времени работы шатунного подшипника коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5 на режиме номинальной мощности

Материал вкладыша	Характеристика							
	$\inf h_{\min}$, мкм	$\sup p_{\max}$, МПа	N^*, Вт	$h^*_{\min}$, мкм	$p^*_{\max}$, МПа	Q^*_B, 10^{-1} л/с	$T_э$, °С	$\alpha_{h_{доп}}$, %
1	1,623	266,1	2641	5,159	120,1	0,5511	119,3	9,9
–	$\Delta\overline{H}_n$, мкм	$\Delta\overline{H}_в$, мкм	$\bar{I}_{hn}$ $\cdot 10^{-11}$	$\bar{I}_{hв}$ $\cdot 10^{-13}$	Δ^{τ}_p, мкм	$\tau_д$, ч	–	
1*	52,9	0,39	3,2	2,4	114,7	324,7	–	
БрОС1-22	52,1	0,19	5,35	2,0	113,8	191,7	–	

Примечание. *Экспериментальный материал (Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

При оценке ресурса пошдипника были учтены экспериментальные данные об интенсивности изнашивания материала 1 (см. табл.1) вкладыша в условиях граничного трения при удельной нагрузке в 50 МПа, скорости скольжения 5 м/с, смазываемого маслом класса вязкости SAE 10W-40.

Ресурс работы рассматриваемого шатунного подшипника $\tau_д$ в часах необходимо интерпретировать следующим образом. При работе двигателя на режиме номинальной мощности радиальный зазор в зоне износа шатунных подшипников увеличится до значения близкого к предельному 115 мкм за 324,7 часа работы. Однако, это значение не следует рассматривать как моторесурс шатунного подшипника, поскольку двигатель работает на режиме но-

минальной мощности со 100%-ной нагрузкой лишь часть времени. Однако, по имеющимся данным о результатах оценки износа деталей аналогичного двигателя при наработке 12000 моточасов средний темп износа шатунных вкладышей составляет около 0,0067 мкм/ч. В нашем случае средний темп износа шатунного вкладыша составил 0,163 мкм/ч.

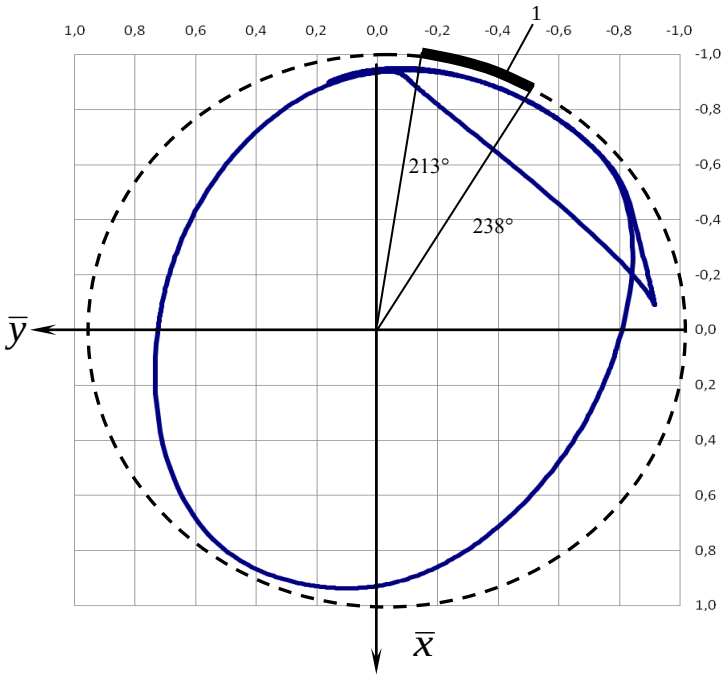


Рис. 1. Траектория движения центра шатунной шейки коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5 относительно подшипника (режим $N_{\max}$)

Таким образом, применение экспериментального материала (с защитными и приработочным слоями) в качестве антифрикционного материала вкладышей шатунных подшипников коленчатого вала двигателей типа 12ЧН18,5/21,5, позволяет прогнозировать увеличение расчётного ресурса вкладышей на 41 % по сравнению с ресурсом вкладышей с антифрикционным слоем из свинцовистой бронзы БрОС1-22.

Результаты расчёта траектории движения шатунной шейки коленчатого вала двигателя ДМ-185 (см. рис. 1) свидетельсвуют о том, что следует ожидать износа верхнего вкладыша подшипника от 213° до 238° по угловой координате подшипника. Продолжительность зоны граничного трения не превышает 10 %.

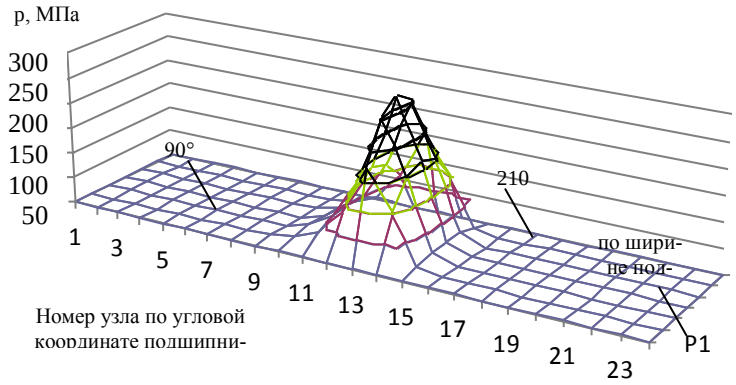


Рис. 2. Эпюра гидродинамических давлений в смазочном слое при 370,3 градусах угла поворота

Гидродинамические давления, возникающие в смазочном слое подшипника, являются следствием воздействия механической нагрузки, прикладываемой к подшипнику. В связи с этим, отдельно была выполнена оценка напряжённо-деформированного состояния (НДС) вкладыша

от действия гидродинамических давлений при угле поворота коленчатого вала, соответствующего наибольшей внешней нагрузке на подшипник. Эпюра гидродинамических давлений в смазочном слое представлена на рис. 2.

Условия закрепления вкладыша во всех расчётах НДС от гидродинамических давлений смазочного слоя заключались в полном ограничении свободы наружной поверхности вкладыша. Эта поверхность условно считалась неподвижной. Температурные деформации вкладышей не учитывались.

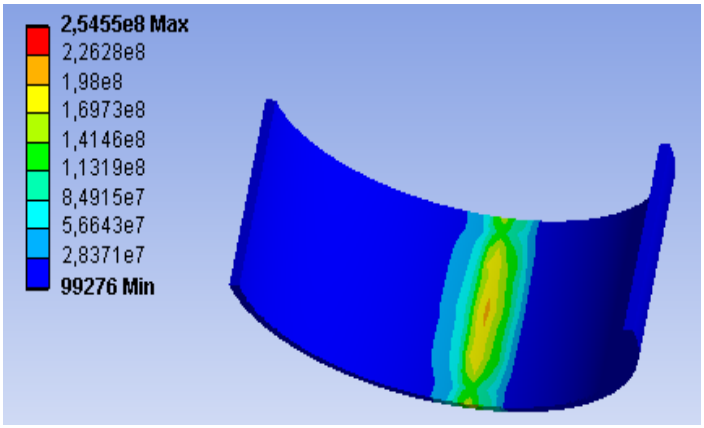


Рис. 3. Эквивалентные напряжения от гидродинамических давлений (Па) при температуре вкладыша 20 °С

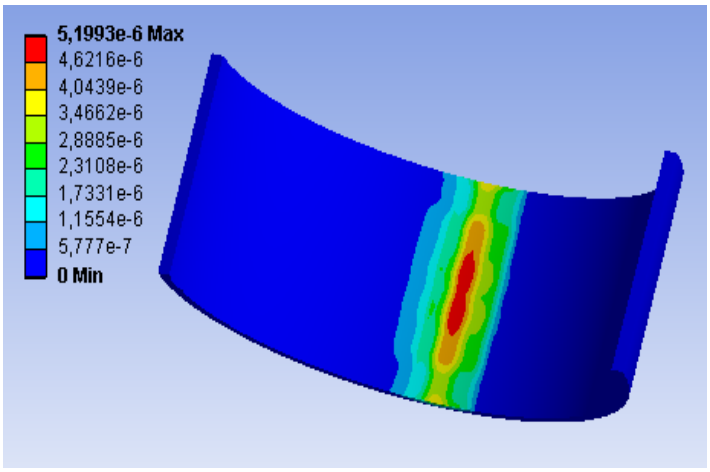


Рис. 4. Общие деформации от гидродинамических давлений (м) при температуре вкладыша 20 °С

Результаты расчёта НДС вкладыша коленчатого вала двигателя 12ЧН18,5/21,5 представлены на рис.3 и рис.4.

Расчётные модели вкладышей представлены как двухслойные, состоящие из соответствующей основы и антифрикционного материала.

При температуре вкладыша 20 °С минимальные эквивалентные напряжения составляют 0,09 МПа, максимальные – 254 МПа.

Общие деформации от гидродинамических давлений при температуре вкладыша 20 °С представлены на рис.4. и составляют от 1 до 5 мкм. Коэффициенты запаса по прочности (относительно предела прочности при сжатии 720 МПа) вкладыша по результатам расчёта составили до 3,2.

Таким образом, на основе результатов расчёта НДС вкладыша от гидродинамических давлений смазочного слоя можно перейти к определению усталостной долговечности вкладыша.

В перспективе планируется проведение экспериментальных исследований вкладышей на работающем дизеле, и дальнейшее совершенствование методики расчёта ресурса вкладышей подшипников коленчатого вала на основе экспериментальных данных.

Библиографический список

1. Буцкий, Ю. О технологиях компонентов ДВС. Часть 3. Вкладыши / Ю. Буцкий // АБС-Авто. – 2012. – № 10. – С. 60–61.

2. Воскресенский, В.А. Расчёт и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка): Справочник / В.А. Воскресенский, В.И. Дьяков. – М.: Машиностроение, 1980. – 224 с.

3. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3-х книгах. Кн. 2. Динамика и конструирование: Учебник для вузов / В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.; под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – 3-е изд. перераб. – М.: Высш. шк., 2007. – 400 с.

4. Колчин, А.И. Расчёт автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. – 496 с.

5. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчёт на прочность поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «ДВС» / Д.Н. Вырубов, С.И. Ефимов, Н.А. Иващенко и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и. доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.

6. Типей, Н.Н. Подшипники скольжения. Расчёт, проектирование, смазка / Н.Н. Типей, В.Н. Константинеску, А. Ника, О. Бицэ. – Бухарест, 1964. – 457 с.

7. Авдеев, Д.Т. Подшипники скольжения с автокомпенсацией износа / Д.Т. Авдеев, Н.В. Бабец, С.С. Мусиенко, Ю.А. Васечко, И.Н. Редько. – Юж. Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2000. – 97 с.

8. Воронков, Б.Д. Подшипники сухого трения / Б.Д. Воронков. – Л.: Машиностроение, 1979. – 224 с.

9. Задорожная, Е.А. Особенности моделирования трибосопряжений поршневых и роторных машин с учётом свойств смазочного материала / Е.А. Задорожная // Известия самарского научного центра российской академии наук. – 2011. – Том 13, № 4–3. – С. 733–738.

10. Суркин, В.И. Расчёт работоспособности трибосопряжения «поршневой палец – верхняя головка шатуна» тракторного дизеля / В.И. Суркин, Е.А. Задорожная, Х.М. Ниязов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроения». – 2012. – № 12 (271). – С. 97–102.

11. Черепанов, Д.А. Расчётно-экспериментальная модель изнашивания опор скольжения коленчатых валов поршневых ДВС: дис. … канд. техн. наук / Д.А. Черепанов. – СПб: СПбГПУ, 2004. – 168 с.

12. Прокопьев, В.Н. Применение пакетов прикладных программ при обосновании конструктивных параметров подшипников коленчатых валов на ранней стадии проектирования поршневых двигателей / В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов / Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2008. – № 23 (123). – С. 13–19.

13. Кавьяров, И.С. Резервы повышения производительности промышленных тракторных агрегатов / И.С. Кавьяров, В.В. Князькин, Б.Л. Магарилло // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1973. – № 7. – С. 6–8.

К содержанию

УДК 621.431.73-048

ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ДЛЯ СИСТЕМЫ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВИГАТЕЛЯ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБИЛЯ

И.Г. Леванов, А.А. Дойкин

В статье представлены некоторые конструкции тепловых аккумуляторов фазового перехода, которые используются в имеющихся на рынке системах подогрева двигателей.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор фазового перехода; предпусковой подогрев двигателя.

Введение. Для российского климата характерна продолжительная и холодная зима. В городах хранение автомобилей личного пользования осуществляется преимущественно на открытых стоянках. В связи с этим надёжный запуск автомобильного двигателя при низких температурах остаётся актуальной задачей.

Предпусковой подогрев двигателя не только облегчает его запуск, но и ускоряет прогрев, снижая пусковой износ деталей, а также способствует снижению расхода топлива. Наиболее эффективным способом предпускового подогрева двигателя является подогрев охлаждающей жидкости и моторного масла с помощью различных устройств [1]. Чаще всего выделяют три группы предпусковых подогревателей: автономные жидкостные, неавтономные электрические, тепловые аккумуляторы.

Тепловые аккумуляторы (ТА) представляют собой устройства, позволяющие при работе двигателя запасать тепло охлаждающей жидкости или отработавших газов, а затем отдавать это тепло двигателю перед последующим запуском при низких температурах окружающего воздуха, а также обогревать салон или кабину мобильной машины. Среди этих устройств можно выделить, так называемые, тепловые аккумуляторы фазового перехода (ТАФП), которые появились в конце 80-ых, начале 90-ых годов XX-го века. В работе В.В. Шульгина [2] представлены вопросы применения ТАФП в системах предпускового подогрева двигателей автотранспортных средств, опыт предыдущих исследователей, обзор существующих конструкций, методики конструкторского и поверочного расчётов ТАФП, вопросы выбора теплоаккумулирующего материала, а также предложены новые конструкции ТАФП.

В данной статье представлены некоторые конструкции ТАФП, которые используются в имеющихся на рынке системах подогрева двигателей.

Обзор конструкций. Известно, что в России ТАФП небольшими партиями производила компания «АвтоПлюсМАДИ» (г. Москва) под названием «Устройство облегчения пуска двигателя» (УОПД). Но на сегодняшний день, к сожалению, нет информации о наличии систем этой компании в продаже. Технические характеристики УОПД представлены в табл. 1 [3].

Таблица 1

Технические характеристики УОПД

Характеристики	УОПД 0,2-2	УОПД 0,2-3	УОПД-0,8
Применяемость: рабочий объём двигателя, л	2	1,5	до 4
Тепловая емкость, кВт/ч	0,23	0,18	0,65
Время подогрева, мин	1	1	5
Время зарядки ТА, мин	2	2	15
Объём охлаждающей жидкости, л	5,1	3,7	3,5
Длинна, мм	465	375	405
Наружный диаметр, мм	150	150	222
Масса (без охлаждающей жидкости), кг	4,7	3,9	19
Потребляемый ток, А	4	4	4

УОПД типа 0,2-2 и 0,2-3 представляют из себя двухкорпусной цилиндрический сосуд с высокоэффективной вакуумно-порошковой изоляцией и не являются ТАФП. Однако, УОПД-0,8 представляет из себя ТАФП с теплообменной матрицей в виде пакета герметично заваренных капсул 6 (см. рис. 1) цилиндрической формы с теплоаккумулирующим материалом (ТАМ) из моногидратом гидроксида натрия с присадкой. Капсулы 6 установлены во внутреннем корпусе при помощи перегородок (диафрагм) 8 определённым образом для лучшего теплообмена. Патент [4] на эту конструкцию принадлежит украинской компании ООО «Мотортехника» (Кудрич В.П., Мальцев П.В., Найдёнов В.В.).

Работает этот тепловой аккумулятор работает следующим образом: при зарядке охлаждающая жидкость через патрубок входа теплоносителя 4 поступает в герметичную полость циркуляции теплоносителя 7, омывая капсулы 6, охлаждающая жидкость нагревает их, расплавляя ТАМ, и через патрубок выхода теплоносителя 5 уходит из аккумулятора. При разрядке теплового аккумулятора холодный теплоноситель поступает через патрубок входа теплоносителя 4 в герметичную полость циркуляции теплоносителя 7, омывает теплоаккумулирующие капсулы 6, отбирая у них тепло. ТАМ, содержащийся в капсулах, отдавая тепло, кристаллизуется.

По данным работы [3] испытания эффективности подогрева двигателя ЗМЗ-410 автомобиля ГАЗ 3302 «Газель» показали, что применение УОПД-0,8 позволило:

– обеспечить легкий и надежный пуск холодного двигателя с 1–2 попыток после выдержки его в течение 36 часов при температуре –30 °С;

– осуществить разогрев охлаждающей жидкости в блоке двигателя до 21 °С за 7 минут разрядки ТА;

– привел к снижению пускового тока стартера на 15–40 А;

– повысил частоту вращения коленчатого вала на 20–25 об/мин;

– снизил расход топлива на пуск и прогрев двигателя до температуры +40 °С на 175 г.

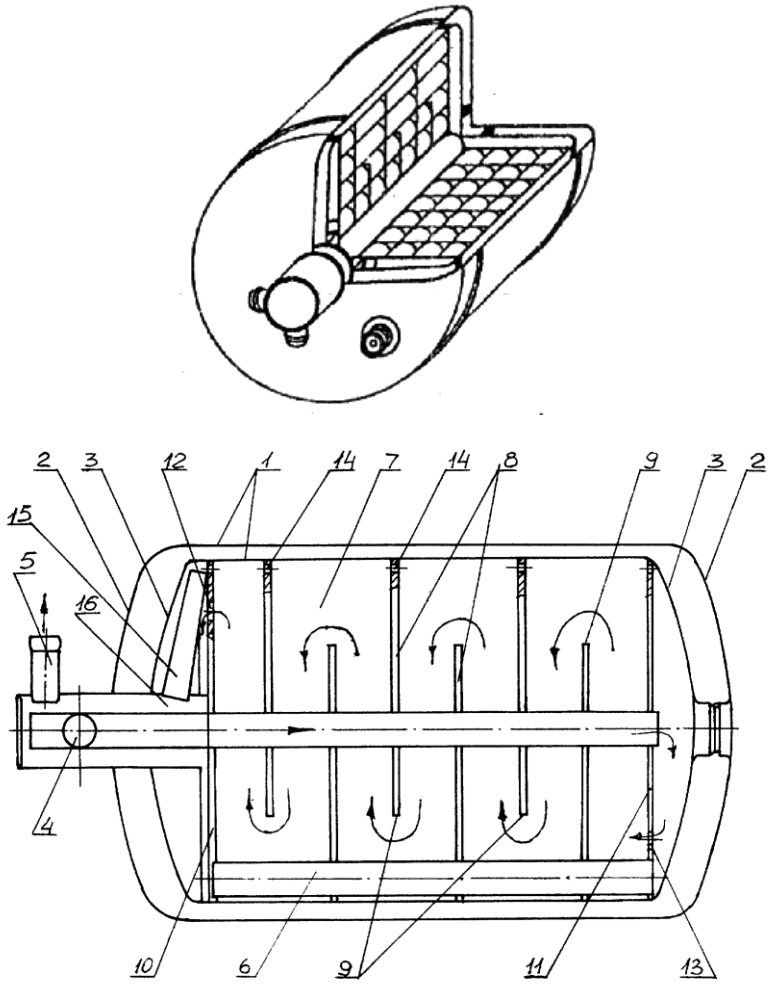


Рис. 1. Тепловой аккумулятор фазового перехода УОПД-0,8 [4]: 1 – двустенный корпус; 2,3 – днища; 4,5 – патрубки входа и выхода теплоносителя; 6 – капсулы; 7 – полость циркуляции теплоносителя; 8 – поперечные диафрагмы; 9 – сегментные срезы; 10, 11 – поперечные перегородки; 12, 13 – перфорация; 14 – отверстия; 15 – наклонная труба; 16 – полость выхода теплоносителя

Впервые серийный ТАПФ для автомобилей предложил немецкий инженер O. Schatz в конце 90-ых годов прошлого столетия. Сегодня по лицензии канадская фирма «CENTAUR Thermal System Inc» выпускает ТАФП четырёх типов, конструкция которых представлена на рис. 2, а некоторые технические характеристики в табл.2.

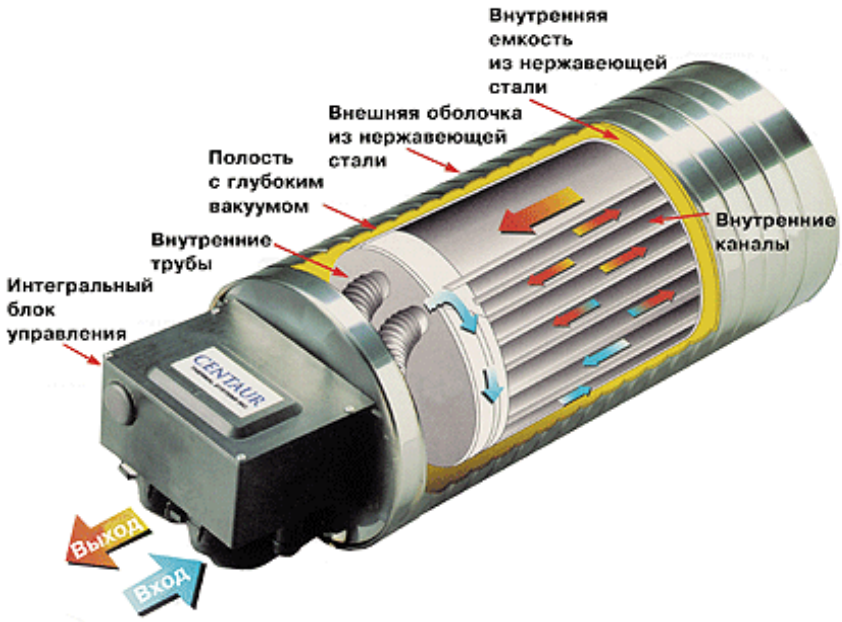


Рис. 2. Тепловой аккумулятор фазового перехода «CENTAUR»

Таблица 2

Технические характеристики ТАФП «CENTAUR»

Модель	4,6	5	7,5	9
Применяемость: рабочий объём двигателя, л	1,0–1,5	1,5–1,8	до 3,0	свыше 3,0
Тепловая емкость (при нагреве от -20 до 90 °С), кВт/ч	0,55	0,60	0,9	1,070
Масса (без охлаждающей жидкости), кг	2,4	2,6	3,3	3,8
Масса заполненного, кг	7	7,6	10,8	12,8
Габариты, мм	164×340	164×370	164×513	164×596
Объём охлаждающей жидкости, л	4,6	5	7,5	9

Конструктивно Centaur (см. рис. 2) отличается от УОПД. В качестве ТАМа используется октогидрат гидроксида бария. Капсулы с ТАМом изготовлены из тонких листов меди. Матрица из капсул помещена во внутренний корпус, изготовленный из нержавеющей стали. Наружный корпус отделён от внутреннего слоем теплоизолятора и вакуумной тепловой изоляцией.

По данным автора работы [5] в результате использования ТАФПа CENTAUR теплый воздух начинает поступать в кабину уже через 30 с, содержание в отработавших газах CO уменьшается на 50 %, а углеводородов – на 30 %, при этом экономия топлива может достигать 14 %.

Несмотря на положительный опыт применения ТАФП на автомобильном транспорте, системы предпускового подогрева с такими устройствами пока не получили массового применения.

По-видимому, в первую очередь это связано с тем, что владельцы автомобилей пока больше доверяют системам на основе автономных подогревателей типа Webasto, Eberspacher, Теплостар и др. Хотя эти системы и обладают рядом недостатков, связанных с тем, что эти подогреватели используют топливо автомобиля, имеют сложную конструкцию и относительно высокую цену, требуют квалификации при установке, пожароопасность в случае не квалифицированного монтажа.

Тем не менее, на отечественном рынке присутствует система подогрева с аккумулятором тепла, разработанная компанией ООО «Гольфстрим» (г. Новосибирск). Эта система основана не на ТАФП, а на аккумуляторе тепла, работающего по принципу термоса с двойной металлической колбой. Схема такой системы представлена на рис. 3.

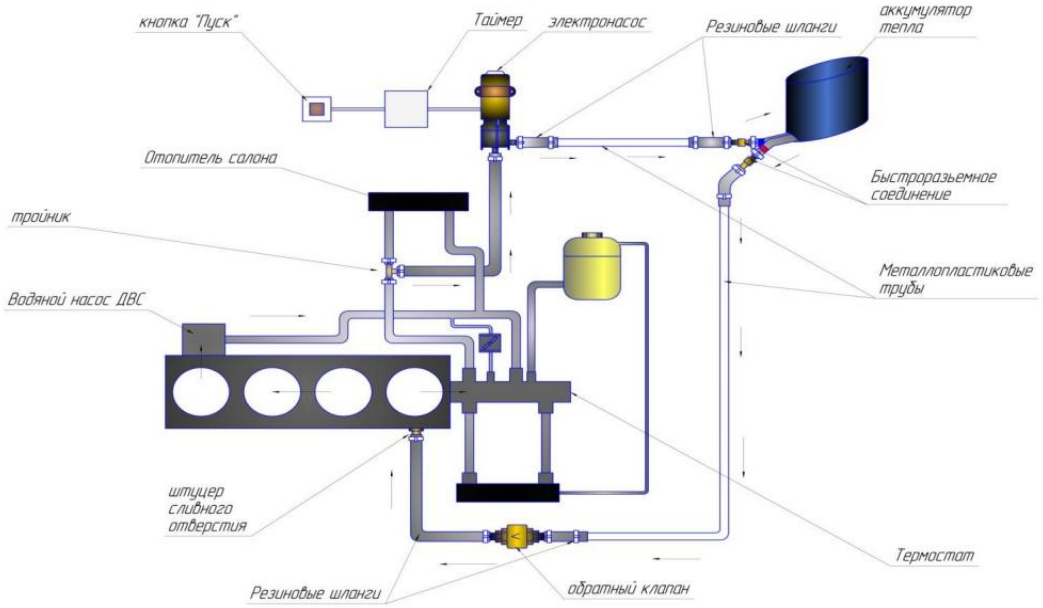


Рис.3. Схема системы подогрева двигателя
на основе аккумулятора тепла АТ (ООО «Гольфстрим»)

Технические характеристики аккумуляторов тепла АТ представлены в табл. 3 [6].

Таблица 3

Технические характеристики аккумуляторов тепла АТ

Технические характеристики	АТ – 6 (М)	АТ – 9 (М)	АТ – 6 МП
Максимальный рабочий объем ДВС, обеспечиваемый эффективным подогревом, л	2,5	До 4	2,5
Время зарядки АТ, мин (зависит от ДВС)	2,5–10	5–15	2,5–10
Объем охлаждающей жидкости дополнительно заливаемой в систему не более, л	10	15	10
Габаритные размеры (д×ш×в), мм	310×150×380	470×150×380	310×150×380
Напряжение сети подогрева АТ, В	–	–	220
Время нагрева жидкости в АТ, мин	–	–	25–35
Масса без охлаждающей жидкости, кг	6,5	9	7
Потеря тепла при низкой температуре воздуха, град/час	1–2		

Преимущества ТАФП над автономными жидкостными подогревателями состоят в следующем: ниже цена, проще монтаж, не потребляют топлива, пожаробезопасные.

Можно выделить некоторые направления для совершенствования систем предпускового подогрева на основе ТАФП для двигателей легковых автомобилей: повышение тепловой ёмкости, снижение потерь тепла при низкой температуре, снижение времени заряда и разряда, упрощение конструкции и технологии изготовления. Дальнейшее развитие отечественных систем предпускового подогрева двигателей на основе ТАФП для легковых и грузовых автомобилей является актуальной задачей.

Библиографический список

1. Типы предпусковых подогревателей двигателя. – URL: http://www.auto-shcool.ru/1688-tipy-predpuskovyx-podogrevatelej-dvigatelya.html.

2. Шульгин, В.А. Теория и практика применение в автотранспортных средствах тепловых аккумуляторов фазового перехода: дис…. д-ра техн. наук / В.В. Шульгин. – СПб, 2004. – 501 с.

3. Все о предпусковых обогревателях и отопителях. – URL: http://modernlib.ru/books/nayman_vladimir/vse_o_predpuskovih_obogrevatelyah_i_otopitelyah/read_6.

4. Тепловой аккумулятор. – URL: http://www.findpatent.ru/patent/214/21-40046.html.

5. Термос для мотора. – URL: http://www.os1.ru/article/service/1998_12_A_2005_11_18-14_56_20/.

6. Технические характеристики аккумуляторов тепла. – URL: http://golfstream-nsk.ru/products/technical_attributes.

К содержанию

УДК 629.113-578/-587 + 629.114.4-578/-587

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ УРАЛ-4320

Р.Ю. Илимбетов, В.В. Дернов

В борьбе за экологию и сокращение расхода топлива многие производители грузовых автомобилей не прекращают поиски альтернативных источников энергии. На сегодняшний день оптимальным решением является разработка в области гибридных технологий. Процесс создания электромеханических трансмиссий не обходится без компьютерного моделирования энергетической установки автомобиля, его узлов и агрегатов.

Ключевые слова: моделирование, автомобиль, трансмиссия.

Обзор программного обеспечения. На сегодняшний день компьютерные технологии обеспечивают не только самый широкий спектр наукоемких инженерных расчетов: прочности, динамики, кинематики, теплопередачи, акустики, аэроупругости, долговечности, ресурса и т.д., но также позволяют виртуально моделировать технологические процессы изготовления и сборки изделий. А самое главное – обеспечивают создание подробных компьютерных моделей сложных машин и механизмов, проводя глубокий их анализ с учетом реальных условий эксплуатации. Таким образом, еще на ранних стадиях проектирования создаются высокоточные компьютерные модели. Из всего многообразия программных продуктов было выделено 6 программных систем (рис. 1) различных производителей, в которых в той или иной степени возможно проектирования современных автомобилей, их узлов и агрегатов. ЭтоUniversal Mechanism(UM),Easy 5, AVL, FRUND, ADAMS и Simulink.

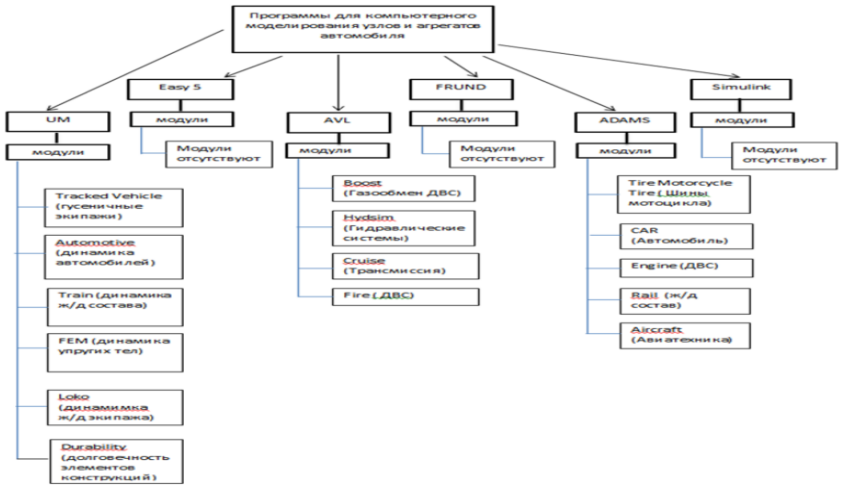


Рис. 1. Классификация программ для компьютерного моделирования узлов и агрегатов автомобиля

На рис. 1 представлена классификация программных комплексов для компьютерного моделирования узлов и агрегатов автомобиля. Откуда видно что три программных системы имеют модульную структуру и в каждой имеется специализированный модуль(и) расчета узлов и агрегатов автомобиля, к ним относятся:UM, AVL иADAMS.

На рис. 2 изображены окна всех шести программных систем.

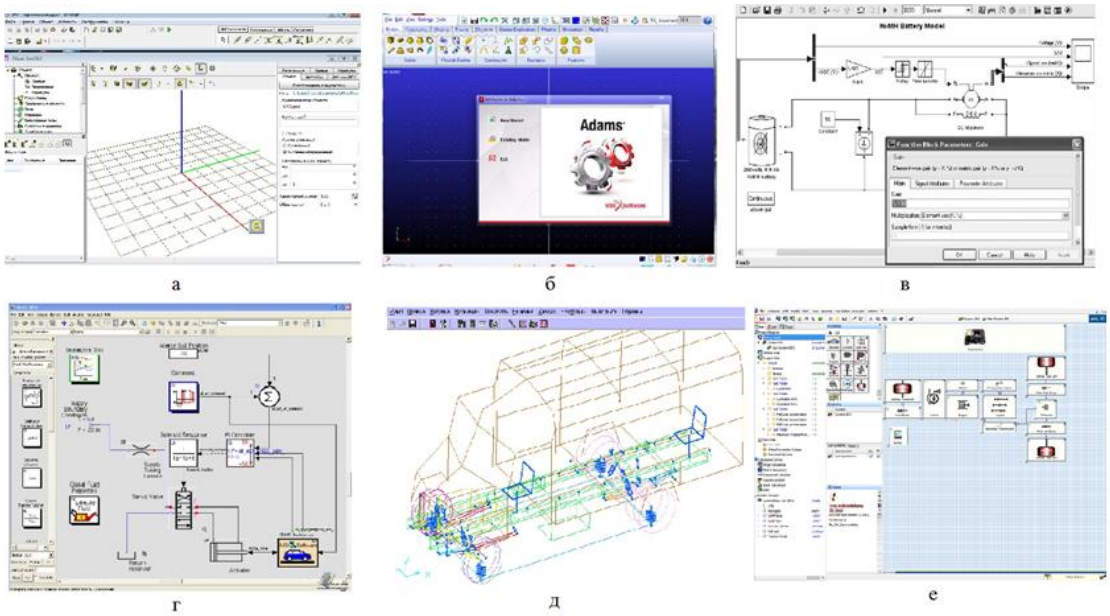


Рис. 2. Окна программных систем:
а) UM; б) Adams; в) Simulink; г) Easy5; д) FRUND; е)AVL

Представленные программы были проанализированы по нескольким критериям и по ним была составлена таблица.

Таблица

Сравнительная таблица программных комплексов

№п/п	Критерии	FRUND	Simulink	AVL	Easy5	UM	ADAMS
1	Наличие модулей	-	-	+	-	+	+
2	Импорт CAD систем	+	-	+	+	+	+
3	Наличие библиотеки	-	+	+	+	+	+
4	3-D моделирование	+	-	-	-	+	+
5	Создание собственных математических моделей	+	-	-	+	+	+
6	Расчет электромеханических трансмиссий	-	-	+	-	-	-
	Баллы	3	1	4	3	5	5

Согласно таблице были определены достоинства и недостатки всех представленных программных систем моделирования.

1. Universal Mechanism

Достоинство

UM широко использует современные методы компьютерной графики, поддерживает импорт данных большинства современных моделирующих программ. Наличие 3-D моделирования.

Недостатки

Программа лишена понимания языков программирования. Использование при моделировании лишь абсолютно твердых тел накладывает определенные ограничения на класс задач, которые могут быть решены с помощью UM. Программный комплекс не имеет возможности расчета систем управления, энергопотребления и токсичности [1].

2. ADAMS

Достоинства

Широкие возможности программного пакета, высокая надёжность и малая трудоёмкость его использования позволяют исследовать десятки вариантов конструкции сложных машин и механизмов. Программа позволяет не только моделировать, но и оптимизировать полученный результат, она поддерживает импорт файлов большинства CAD программ и создание 3-D моделей.

Недостатки

Программа является проблемно-ориентированной, она направлена на построение отдельных узлов и агрегатов, а также расчета механических воздействий, и не направлена на комплексный расчет энергетических потоков, КПД системы и выбросов в атмосферу [2].

3. Simulink

Достоинства

«Симулинк» поддерживает языки программирования, имеет большую библиотеку блоков и направлен на расчет систем управления, электрических характеристик цепи, решения математических уравнений и вопросов схемотехники.

Недостатки

Программа имеет сложный интерфейс, поиск ошибок готовой модели является трудоемким процессом. Программа не поддерживает импорт CAD систем, в ней отсутствует 3-D моделирование и возможность расчета кинематических и динамических характеристик модели [5].

4. Easy 5

Достоинства

При интеграции EASY5 с другими системами msc возможно создать полные функциональные модели самолетов, автомобилей, танков, экскаваторов, приборов и т.д. Программа поддерживает языки программирования и импорт

данных других моделирующих систем. Пользователям EASY5 предложены библиотеки компонентов для многодисциплинарного анализа, включая специализированные наборы для аэрокосмической, автомобильной и других отраслей промышленности, предусмотрена возможность создание собственных математических моделей.

Недостатки

ПО не ориентировано на решение задач экономии, экологии, энерго затрат и энергетического баланса[4].

5. FRUND

Достоинства

Пользователь программы имеет возможность импортировать универсальные форматы CAD геометрии, создавать составные геометрические объекты любой сложности[6].

Недостатки

Программа обладает плохой графикой, не воспринимает языков программирования, отсутствует библиотека готовых математических моделей. FRUND решает комплексные задачи кинематики и динамики механизма, и не способна решать вопросы эффективности, экономичности и построения систем управления.

6. AVL

Достоинства

Программный комплекс AVL является узкоспециализированным, он направлен на решение задач в области автомобилестроения. Комплекс способен просчитать по отдельности все узлы и агрегаты автомобиля, их взаимодействие и систему управления. Результат представляется в виде энергетических характеристик, графиков движения, распределения крутящего момента, скорости, токов и т.д. Программа охватывает практически весь спектр задач в области расчета автомобиля. AVL поддерживает импорт файлов системы MATLAB, Easy5, Simulink, язык программирования C++. Располагает полной библиотекой узлов автомобиля для моделирования: легковых и грузовых автомобилей, автобусов, мотоциклов, гибридных автомобилей и электромобилей [3].

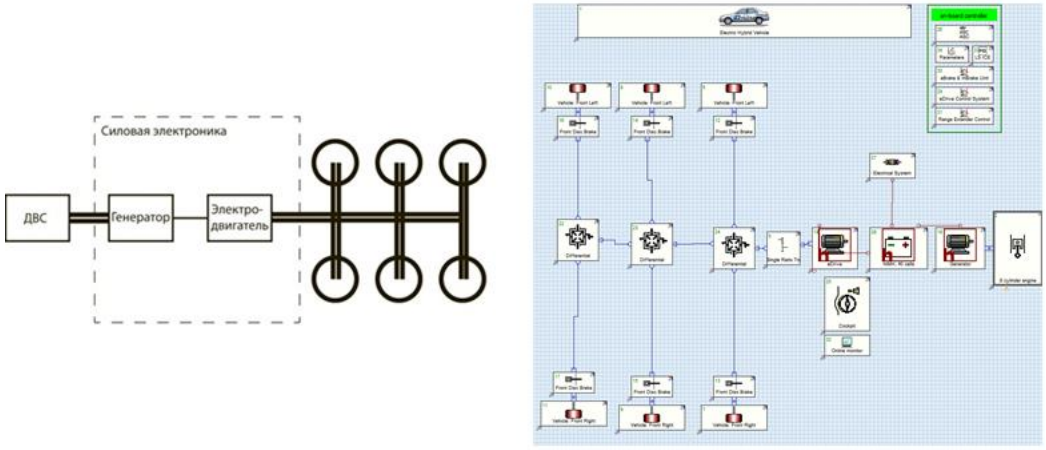
Недостатки

Минусом программы является отсутствие 3-D моделирования.

В ходе анализа программных продуктов были определены достоинства и недостатки всех шести программ. Анализ показал, что для комплексного расчета электромеханической трансмиссии грузового автомобиля более всего подходит программная система AVL.

Моделирование электромеханической трансмиссии грузового автомобиля УРАЛ-4320. В данном разделе представлены результаты моделирования электромеханической трансмиссии грузового автомобиля УРАЛ – 4320 в 3 вариантах исполнения. Все расчеты производились в программном модуле AVLCruise.

Модель с одним тяговым электродвигателем

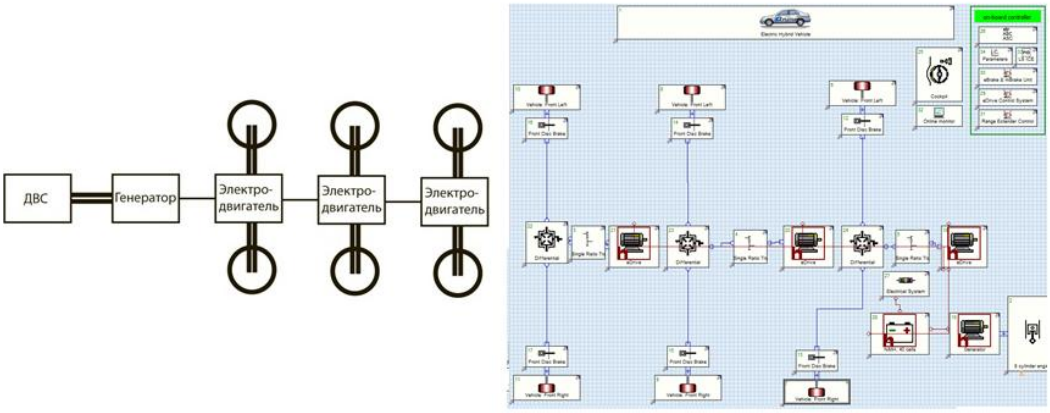


а б

Рис. 3. Модель с одним тяговым электродвигателем
а) компоновочная схема электромеханической трансмиссии с одним электродвигателем
б) схема электромеханической трансмиссии в программе AVL Cruise

Результаты моделирования. В связи с высокой массой данного автомобиля, низким КПД трансмиссии и малой мощностью электродвигателя, во время расчета программа AVL Cruise не способна смоделировать участки движения со скоростью превышающей 70 км/ч. Данная схема электромеханической трансмиссии по всем параметрам и характеристикам уступает двум оставшимся типам трансмиссии.

Схема модели с тремя электродвигателями



а б

Рис. 4. Модель с тремя тяговыми электродвигателями
а) компоновочная схема электромеханической трансмиссии с тремя электродвигателями
б) схема электромеханической трансмиссии в программе AVL Cruise)

Результаты моделирования при массе автомобиля 8699 кг: пройденная дистанция составила 10700 м, средний расход топлива 19,28л/100 км, потеря энергии 0,5 кВт×ч за цикл, эмиссия CO_2 в атмосферу 462 г/100 км. При полной массе автомобиля 14775 кг: пройденная дистанция составила 10907 м, средний расход топлива 24,93л/100 км, потеря энергии 0,87 кВт×ч за цикл, эмиссия CO_2 в атмосферу 697 г/100 км.

Схема модели с шестью электродвигателями, типа «мотор-колесо»

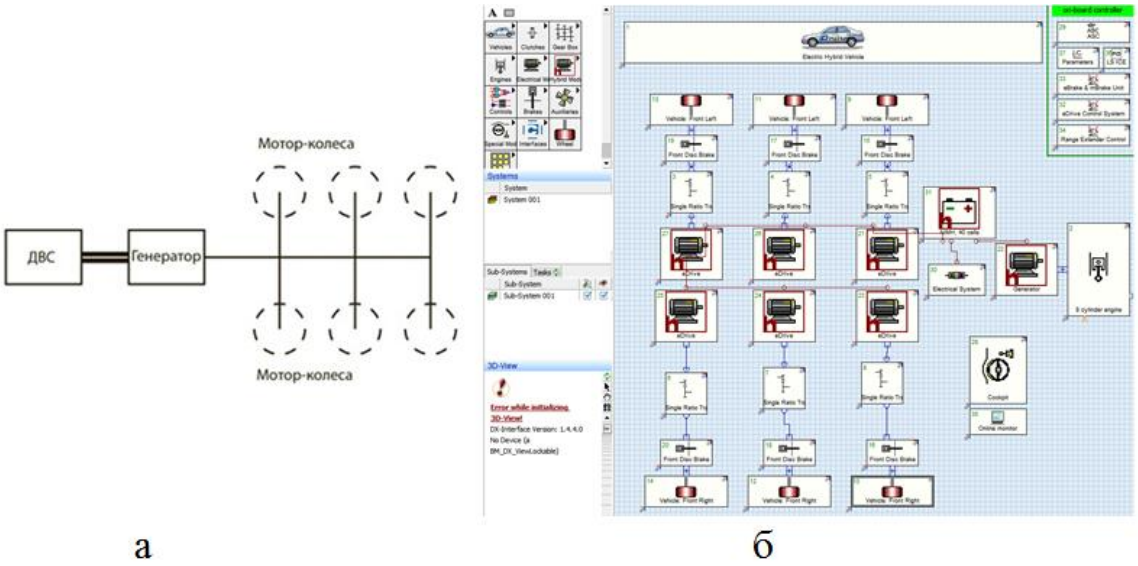


Рис. 5. Модель с шестью тяговыми электродвигателями
а) компоновочная схема электромеханической трансмиссии с шестью электродвигателями
б) схема электромеханической трансмиссии в программе AVL Cruise

Результаты моделирования при массе автомобиля 6827 кг: пройденная дистанция составила 10691 м, средний расход топлива 15,86л/100 км, потеря энергии 0,14кВт×ч за цикл, эмиссия CO_2 в атмосферу 380 г/100 км. При полной массе автомобиля 12877 кг: пройденная дистанция составила 10850 м, средний расход топлива 21,61л/100 км, потеря энергии 0,44кВт×ч за цикл, эмиссия CO_2 в атмосферу 517 г/100 км.

Из полученных результатов моделирования видно, что электромеханическая трансмиссия на 6 «мотор-колесах» превосходит существующий на сегодняшний день автомобиль Урал – 4320 по следующим параметрам:

1) по массе, электромеханическая трансмиссия стала легче аналога на 9 %;

2) по среднему расходу топлива и эмиссии вредных веществ в атмосферу, расход топлива уменьшился на 50 % с 30 л/100 км до 15,86 л/100 км;

3) по запасу хода, возросшему вследствие снижения расхода топлива.

Библиографический список

1. Universalmechanism 6.0 / Моделирование динамики автомобилей. Руководство пользователя.
2. Ке Чен, Джиху Ланг. MSC.Adamsbasictrainingandexamples. SHENYANG LIGONG UNIVERSITY, 2007. – 164 с.
3. Скрипник, А.Н. Программное обеспечение для моделирования силовых агрегатов: Ноу-Хау AVL в увеличении исследовательских работ на ранних стадиях проектирования / А.Н. Скрипник. – АПС Консалтинг.
4. ПО компании msc. Software. – URL: http://www.mscsoftware.ru/.
5. Моделирование в системе Simulink. – URL: http://matlab.ru/products/simulink.
6. Сайт разработчика FRUND. – URL: www.frund.vstu.ru.

К содержанию

УДК 621.43.01 + 621.431.73-04

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ДВС С РАЗДЕЛЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ СЖАТИЯ И РАСШИРЕНИЯ

В.С. Кукис

Представлены результаты выбора оптимальных значений конструктивных и регулировочных показателей на параметры расширительной машины предложенного автором ДВС с разделенными процессами сжатия и расширения. Установлено, что при сравнении с прототипом (дизелем 1Ч15,0/20,5) при одинаковых геометрических характеристиках, частотах повторения рабочего цикла и вырабатываемой мощности предложенный ДВС обеспечивает: снижение удельного индикаторного расхода топлива в 3,8 раза; увеличение крутящего момента практически в 2 раза; снижение максимальной температуры рабочего тела в 2,3 раза; снижение максимального давления рабочего тела 2,8 раза; уменьшение максимальной скорости нарастания давления в 3,4 раза; снижение содержания токсичных компонентов в ОГ (NO_x в 82,5 раза, CO в 10 раз).

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; расширительная машина; давление: мощность; расход топлива; температура.

Одним из серьезных недостатков традиционных поршневых ДВС является то, что в конце процесса расширения, который обычно называют рабочим ходом, давление продуктов сгорания остается весьма высоким – в 5–6 раз больше атмосферного. На рис. 1 показан рабочий процесс современного (бескомпрессорного) дизеля *e–a–c– z' –z–b–a–e* с учетом основных допущений, характерных для термодинамического цикла с комбинированным подводом теплоты.

На рисунке замкнутый процесс *a–c–z'–z–b* представляет собой термодинамический цикл современного дизеля. Площадь внутри этого контура эквивалентна полезной работе цикла. Заметим, что площадь под линией *a–c* соответствует затратам работы на сжатие воздуха перед впрыскиванием топлива в цилиндр и сгоранием.

Обеспечить полное расширение продуктов сгорания в цилиндре поршневых двигателей (а значит, и получить дополнительную полезную работу, эквивалентную площади *b–d–a),* принципиально невозможно, так как сжатие и расширение происходят в одном и том же надпоршневом пространстве при перемещении поршня между ВМТ и НМТ.

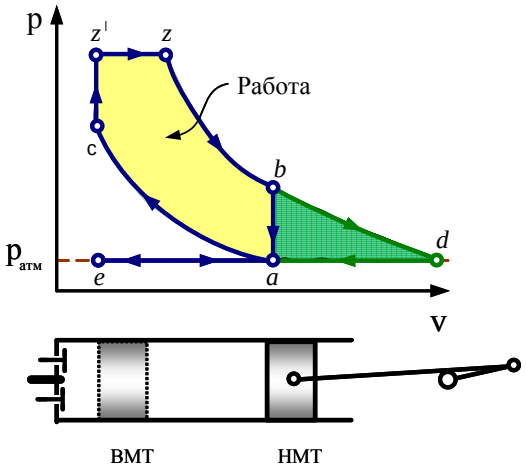


Рис. 1. Рабочий процесс современного дизеля

Автором статьи (в соавторстве) предложен ДВС (рис. 2) [1], в котором расширение происходит практически до давления окружающей среды в расширительной машине (РМ), а сжатие осуществляется компрессором, привод которого обеспечивает электроэнергия, вырабатываемая высокочастотным генератором, приводимым в действие газовой турбиной, работающим за счет кинетической энергии выходящих из РМ отработавших газов (ОГ).

Работает предложен ДВС следующим образом. В момент, когда поршень в РМ начинает перемещаться сверху вниз, открывается впускной клапан и из ресивера сжатый воздух, имеющий высокую температуру (превышающую температуру самовоспламенения топлива), поступает в цилиндр, туда же одновременно через форсунку подается топливо. Топливо воспламеняется, и дальше все происходит, так как в обычном дизеле. Однако теперь приводной механизм рассчитывается таким образом, что позволяет увеличивать объем продуктов сгорания до тех пор, пока давление рабочего тела не снизится до атмосферного. В результате при расширении получается больше работы, чем в традиционном поршневом двигателе. Кроме того, для сжатия воздуха энергия не затрачивается – это сжатие осуществляется в компрессоре за счет ути-

лизации энергии ОГ. Как видно (рис. 3), теперь почти вся работа расширения (кроме затрат на выталкивание из цилиндра продуктов сгорания (эквивалентная площади под линией 1–2 на рис. 3) может быть полезно использована.

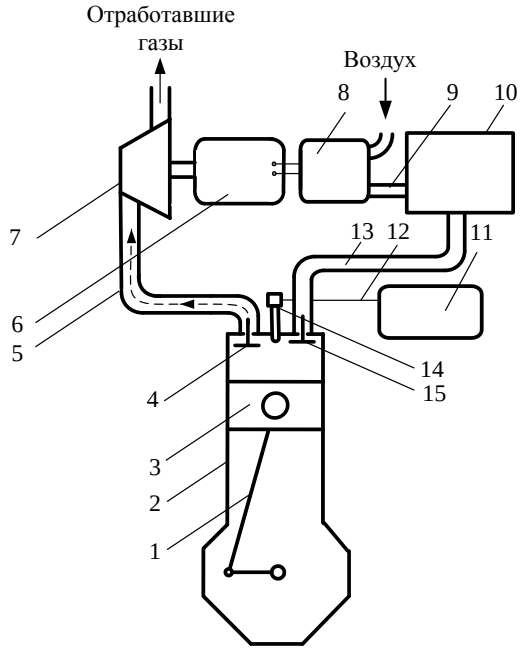


Рис. 2. Принципиальная схема ДВС с разделенными процессами сжатия и расширения и утилизацией кинетической энергии отработавших газов: 1 – кривошипно-шатунный механизм; 2 – поршневая расширительная машин; 3 – поршень; 4 – выпускной клапан; 5 – выпускной коллектор; 6 – высокочастотный электрогенератор; 7 – газовая турбина; 8 – компрессор; 9 – трубопровод; 10 – ресивер; 11 – топливный бак; 12 – топливопровод; 13 – впускной коллектор; 14 – форсунка; 15 – выпускной клапан

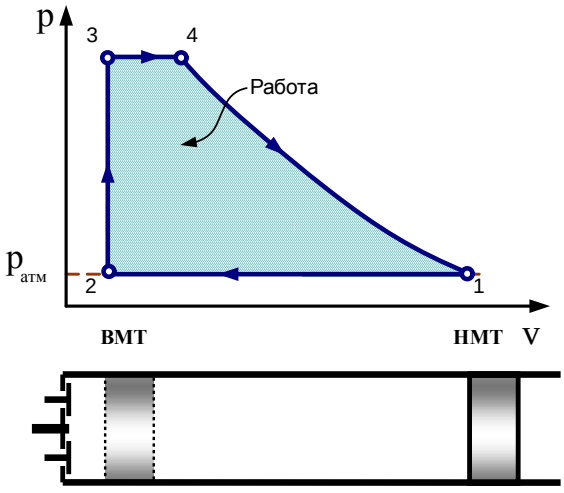


Рис. 3. Термодинамический цикл ДВС с разделенными процессами сжатия-расширения и утилизацией теплоты отработавших газов

Для оценки влияния конструктивных и регулировочных показателей на параметры расширительной машины предложенного двигателя был проведен вычислительный эксперимент с помощью программного пакета FIRE фирмы AVL.

Исходные данные для расчета (табл. 1) соответствовали прототипу – дизелю 1Ч15,0/20,5, с которым впоследствии сравнивали полученные результаты.

Таблица 1

Исходные данные для расчета рабочего процесса РМ

Исходные данные	*Значения*
Условия на впуске	
Конструкция впускного коллектора и клапана как у прототипа	–
Рабочее тело – воздух	N_2-76,7 %, O_2-23,3 %
Условия впрыскивания топлива	
Распылитель форсунки	6x0,4x130
Угол начала впрыскивания топлива, град ПКВ до ВМТ	24
Максимальное давление впрыскивания топлива, МПа	65
Цикловая подача топлива, мг/цикл	60
Цилиндропоршневая группа	
Геометрические характеристики	
Диаметр, мм	150
Ход поршня, мм	205
Длина шатуна, мм	300
Тип камеры сгорания	ЦНИДИ
Надпоршневой зазор, мм	0,5
Степень сжатия	14,0
Число клапанов на цилиндр	2
Характерные температуры	
Средняя температура головки цилиндра, К	550
Средняя температура головки поршня, К	590
Средняя температура гильзы цилиндра, К	450
Рабочий процесс	
Частота циклов расширительной машины, $мин^{-1}$	625
Показатель характера сгорания m	0,12 [3]
Граничные условия на выпуске	
Конструкция выпускного коллектора и выпускного клапана как у прототипа	–
Рабочее тело – отработавшие газы	N_2 – 77 %, O_2 – 12 % H_2O – 3 %, CO_2 – 7 % CO – 0,5 %, CH – 0,5 %

Примечание: Исходные данные, выделенные курсивом, рекомендованы применяемой программой для расчета рабочего процесса.

В качестве оценочных параметров РМ были приняты: среднее индикаторное давление (p_i), удельный индикаторный расход топлива (g_i), максимальное давление рабочего тела (p_z), максимальная скорость нарастания давления по углу ПКВ ($W_{p\ max}$), часовой расход воздуха ($G_в$), максимальная температура рабочего тела (t_z), средняя температура ОГ на выпуске из цилиндра РМ ($t_{ог}$) и расход, подаваемого в цилиндр сжатого воздуха ($G_в$).

При оценке влияния давления воздуха на впуске на параметры расширительной машины в дополнение к указанным в табл. 1 исходным данным были приняты: угол, соответствующий моменту начала открытия впускного клапана был принят равным 20 град ПКВ до ВМТ; угол, соответствующий моменту начала впрыскивания топлива – 8 град ПКВ до ВМТ; угол, соответствующий моменту начала открытия выпускного клапана – 170 град ПКВ после ВМТ; продолжительность открытия впускного клапана – 80 град ПКВ; продолжительность открытия выпускного клапана – 200 град ПКВ.

На рис. 4 приведены индикаторные диаграммы рабочего процесса при различных значениях давления воздуха на впуске в цилиндр расширительной машины, а на рис. 5 показан характер влияния величины давления воздуха на впуске в цилиндр РМ на принятые оценочные параметры.

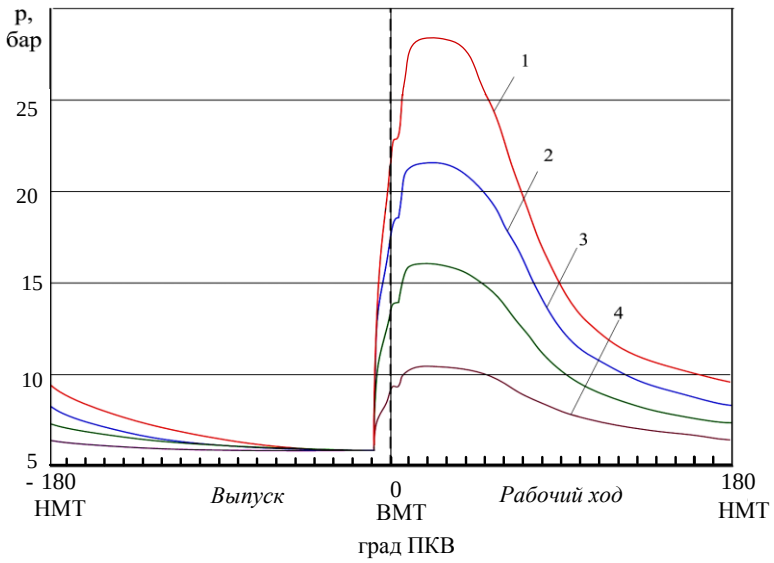


Рис. 4. Индикаторные диаграммы рабочего процесса РМ
при различных значениях давления воздуха на впуске в цилиндр:
1 – $p_{вп}$=25 бар; 2 – $p_{вп}$=20 бар; 3 – $p_{вп}$=15 бар; 4 – $p_{вп}$=10 бар

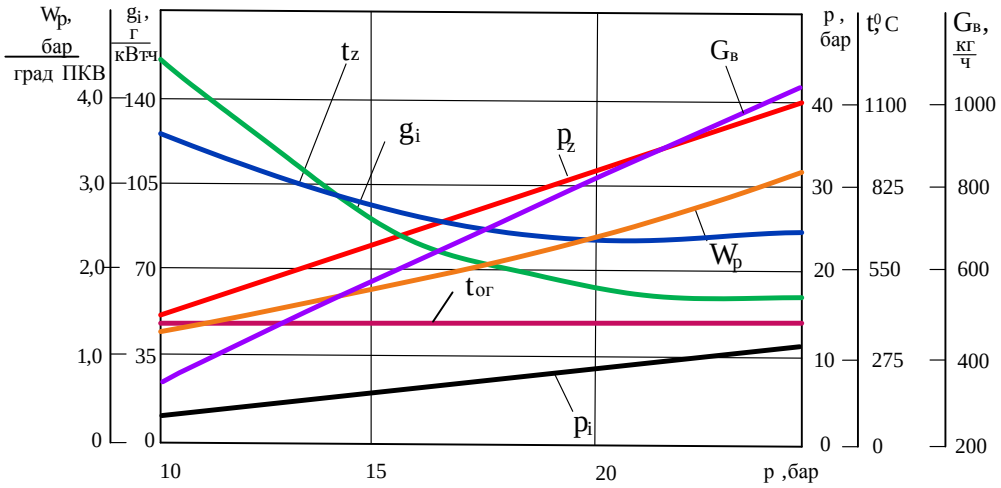


Рис. 5. Влияние величины давления воздуха на впуске
в цилиндр РМ на параметры ее рабочего цикла

Данные по влиянию величины давления воздуха на впуске в цилиндр РМ на параметры ее рабочего цикла позволили оценить их совместное влияние на качество рабочего процесса по методике, изложенной в монографии [2], с помощью интегрального коэффициента положительного изменения параметров для f-го давления ($\sum K^{f}_{пип}$), изменение которого в функции давления на впуске показано на рис. 6.

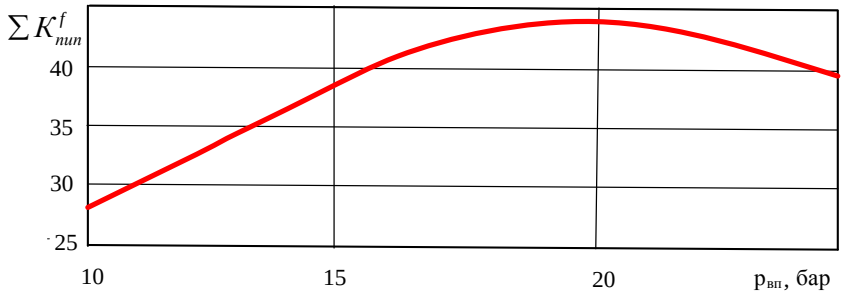
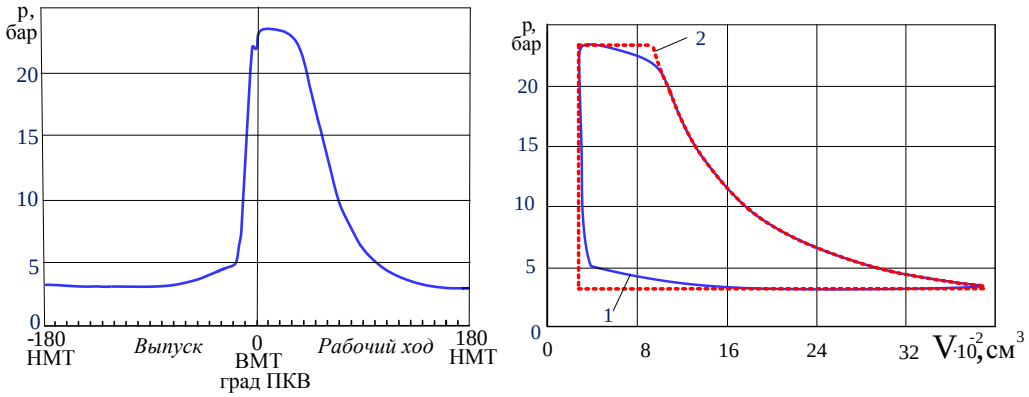


Рис. 6. Изменение интегрального коэффициента
положительного изменения параметров рабочего процесса
в зависимости от давления воздуха на впуске в цилиндр РМ

Как видно, величина интегрального коэффициента с ростом давления воздуха имеет экстремум при $p_{вп}$=20 бар. Это давление было принято для дальнейших расчетов.

Аналогичным образом оценивалось влияние на параметры РМ и определялись оптимальные значения момента начала открытия впускного клапана (15 град ПКВ до ВМТ), продолжительности открытия впускного клапана (85 град ПКВ), момента начала открытия выпускного клапана на параметры расширительной машины (170 град ПКВ после ВМТ).

Используя оптимальные значения исследованных регулировочных параметров и при принятых других исходных были получены соответствующие развернутую, свернутую индикаторные диаграммы (рис. 7*а,* 7*б*) РМ и рассчитаны мощностные, экономические и экологические показатели двигателя с разделенными процессами сжатия и расширения (табл. 2).



а *б*

Рис. 7. Развернутая (*а*) и свернутая (*б*) индикаторные диаграммы рабочего процесса РМ при индикаторной мощности 39,9 кВт:
1 – индикаторная диаграмма; 2 – термодинамический цикл

Таблица 2

Сравнение показателей ДВС (РМ) с разделенными процессами сжатия и расширения и дизеля 1Ч15,0/20,5 (при одинаковых: частоте рабочих циклов, индикаторной мощности и цикловой подаче топлива)

Показатель	*Расширительная машина*	*Дизель 1Ч15,0/20,5*
Удельный индикаторный расход топлива, г/(кВт·ч)	50,7	197,7
Индикаторный крутящий момент, Н·м	494,3	246
Часовой расход воздуха, кг/ч	1300	650
Температура ОГ, К	649	625
Максимальная температура сгорания, К	847	1907
Максимальное давление сгорания, бар	25,7	72,8
Среднее индикаторное давление, МПа	0,89	0,85
Максимальная скорость нарастания давления, МПа/град ПКВ	0,246	0,844
Удельный выброс оксидов азота, г/(кВт·ч)	14,2	0,17
Удельный выброс оксида углерода, г/(кВт·ч)	0,3	0,03

Заметим, что дополнительным условием при расчете служило обеспечение одинаковой индикаторной мощности прототипа (дизеля 1Ч15,0/20,5) и рассматриваемого двигателя. Рассмотрение свернутой индикаторной диаграммы свидетельствует о том, что она по конфигурации весьма незначительно отличается от термодинамического цикла ДВС с разделенными процессами сжатия и расширения, приведенной на рис. 3. Факт расширения рабочего тела в цилиндре РМ не до давления окружающей среды, а лишь до 3,57 бар (отраженный на рис. рис. 7*а,* 7*б*), связан с тем, что в расчетах были использованы конструктивные размеры кривошипно-шатунного механизма прототипа (дизеля 1Ч15,0/20,5), ограничивающего перемещение поршня соответствующим положением НМТ.

Очевидно, что в реальных условиях эксплуатации даже при снятии указанного ограничения минимальное давление в цилиндре будет также несколько выше давления окружающей среды в связи с гидравлическим сопротивлением выпускной системы РМ.

Таким образом, в результате расчетного исследования рабочего процесса в ДВС с разделенными процессами сжатия и расширения:

1. Подтверждена принципиальная возможность реализация ТСУ с разделенными процессами сжатия и расширения с максимальным приближением рабочего процесса в РМ к термодинамическому циклу, приведенному на рис. 3.

2. Установлено, что при одинаковых с прототипом геометрических характеристиках, частотах повторения рабочего цикла и вырабатываемой мощности ТСУ обеспечивает: снижение удельного индикаторного расхода топлива в 3,8 раза; увеличение крутящего момента практически в 2 раза; снижение максимальной температуры рабочего тела в 2,3 раза; снижение максимального давления рабочего тела 2,8 раза; уменьшение максимальной скорости нарастания давления в 3,4 раза; снижение содержания токсичных компонентов в ОГ (NO_x в 82,5 раза, CO в 10 раз). Однако отмеченные положительные особенности происходят на фоне двукратного увеличения расхода воздуха

3. Для обеспечения максимально возможного снижения давления продуктов сгорания в РМ в ходе расширения необходима разработка кривошипно-шатунного механизма с соответствующими конструктивными характеристиками.

4. Большой расход сжатого воздуха, необходимый для обеспечения работы РМ с размерностью 15,0/20,5 свидетельствует о нецелесообразности создания предлагаемых ДВС с большим литражом.

Библиографический список

1. Патент на полезную модель РФ 127824. Комбинированный двигатель с газотурбинным наддувом и пневматическим распыливанием топлива / В.С. Кукис, В.А. Романов, И.А. Харенко. – Опубл. 10.05.13. Бюл. № 13.

2. Кукис, В.С. Повышение эффективности ДВС путем использования сжатого воздуха: моногр. / В.С. Кукис, В.А. Романов. – Saarbuchen: Palmarium Academic publishing, 2014. – 144 с.

3. Лазарев, Е.А. Основные принципы, методы и эффективность средств совершенствования процесса сгорания топлива для повышения технического уровня тракторных дизелей / Е.А. Лазарев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 288 с.

К содержанию

УДК 339.166:629.113 + 629.113

ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РЫНКА НОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

А.Д. Рулевский

Был проведен анализ рынка новых автомобилей Челябинской области в 2013 году. Выявлены основные факторы, влияющие на изменение динамики его функционирования. Составлен прогноз развития регионального рынка в 2014 году.

Ключевые слова: автомобили; рынок; регион; прогноз.

В настоящее время автомобильный рынок Челябинской области является одним из ведущих в Российской Федерации. Так, по итогам продаж новых автомобилей в 2013 году он занимает второе место в Уральском Федеральном округе (табл. 1).

Таблица 1

Рынок новых легковых автомобилей в УрФО в 2013 году

№	Регион	Продажи, шт		Динамика изменений, %
		2013	2012	
1	Свердловская обл.	80867	86901	93,06
2	Челябинская обл.	70711	75857	93,02
3	ХМАО	45462	50569	89,1
4	Тюменская обл.	35258	36124	97,6
5	Курганская обл.	11687	12357	94,48
6	ЯНАО	10373	11164	92,91
Всего		254358	272972	93,2

В 2013 году в Челябинской области было продано 70711 новых легковых и легких коммерческих автомобилей отечественных и зарубежных марок. Этот показатель почти на 5146 машин (или на 6,8 %) меньше, чем составлял объем реализации по итогам 2012 году.

По продажам новых автомобилей за 2013 год Челябинская область опережает такие европейские страны, как Болгария (19352 машины), Венгрия (56139), Греция (58694), Латвия (10637), Литва (12152), Люксембург (46624), Румыния (57710), Словакия (66000), Словения (50878), Эстония (19500). Большинство из этих государств существенно превосходят Челябинскую область по численности населения.

Что касается показателей Южного Урала в масштабах Российской Федерации, то по итогам 2013 года доля регионального рынка составляет 2,55 % от общероссийского. В докризисный период (2007–2008 гг.) этот показатель имел значение 2,7 %. В I полугодии 2009 года доля регионального рынка снизилась до 1,7 %. Это объяснялось тем, что падение продаж новых автомобилей на Южном Урале было более глубоким, чем в целом по России.

Однако с начала 2010 года наблюдается явная тенденция восстановления уровня регионального рынка. Так, по итогам января-марта 2010 года, его доля уже составляла 2,2 %, а в декабре – 2,4 %. Спустя еще шесть месяцев региональный рынок фактический вернулся на докризисный уровень и его доля на общероссийском рынке новых автомобилей повысилась до 2,7 %, но по итогам 2012 года она вновь снизилась до 2,6 %. За 2013 год доля регионального рынка сократилась еще на 0,05 %.

Общая структура рынка новых автомобилей Челябинской области представлена на рис.1.

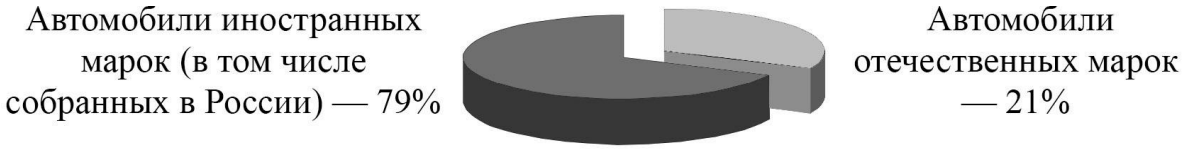


Рис. 1. Общая структура рынка новых автомобилей Челябинской области

Как видно из диаграммы на рис. 1, по итогам 2013 года доля автомобилей отечественных марок на региональном рынке снизилась до 21 %. В докризисный период (2007–2008 гг.) этот показатель имел значение 27–28 %. В декабре 2010 года доля новых автомобилей традиционно российских марок составляла на рынке Южного Урала 31,5 %, а в марте 2011 года достигла своего максимального значения – 31,7 %. Затем началось ее снижение, и уже через три месяца она достигала 31,0 %.

Особенно резко доля автомобилей российских марок стала падать после прекращения действия всех государственных программ по стимулированию спроса. В результате, в I квартале 2012 года она составляла 24,0 %, а по итогам 2012 года снизилась еще на 0,6 %. И хотя в 2013 году была запущена новая государственная программа льготного автокредитования, доля российских автомобилей на рынке Южного Урала снизилась еще на 2,4 %.

Рост сегмента автомобилей иностранных марок объясняется двумя основными факторами – повышением покупательной способности населения и сближением отпускных цен новых российских автомобилей и моделей зарубежных марок, относящихся к бюджетному сегменту.

Примерная ценовая структура рынка новых автомобилей Челябинской области представлена на рис. 2.

Информация о ценах набиралась исходя из данных о количестве проданных автомобилей той или иной модели. Учитывая, что окончательная комплектация реализованных машин была неизвестна, предлагаемая структура носит оценочный характер. Исходя из параметров диаграммы на рис. 2, можно рассчитать, что средняя стоимость нового автомобиля, проданного в 2013 году в Челябинской области, составляет 780 тысяч рублей.

Рис. 2. Примерная ценовая структура рынка новых автомобилей Челябинской области

На рис. 3 представлена географическая структура регионального рынка новых автомобилей.

Из данных диаграммы на рис.3 видно, что в Челябинской области сложились три устойчивые торговые площадки по продажам новых легковых автомобилей отечественных и иностранных марок – Челябинск, Магнитогорск и Миасс. Кроме них реализация новых машин ведется в Златоусте, Южноуральске, Копейске и Каслях.

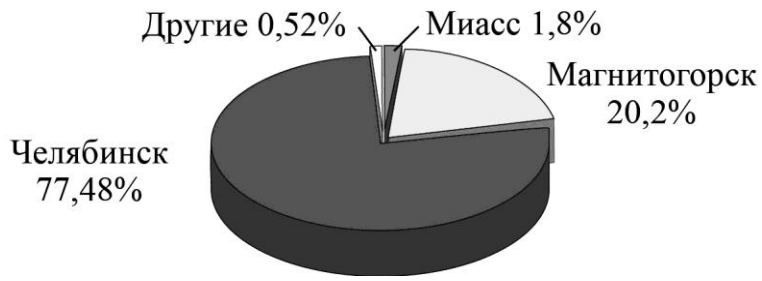


Рис. 3. Географическая структура рыка новых автомобилей Челябинской области

Хотя объемы продаж на региональном рынке в 2013 год оказались ниже, чем в 2012 году, но считать его неудачным было бы неправильно. На диаграмме, представленной на рис. 4, представлена динамика продаж новых автомобилей на рынке Южного Урала за период 2008–2013 гг. Видно, что показатель 2013 года уступает лишь результатам 2008, 2011 и 2012 годов.

Для оценки перспектив развития рынка новых автомобилей в Челябинской области на 2014 год, был проведен анализ выявленных особенностей его функционирования в 2013 году. С большой долей вероятности можно утверждать, что они будут проявляться и в 2014 году. К основным из них относятся.

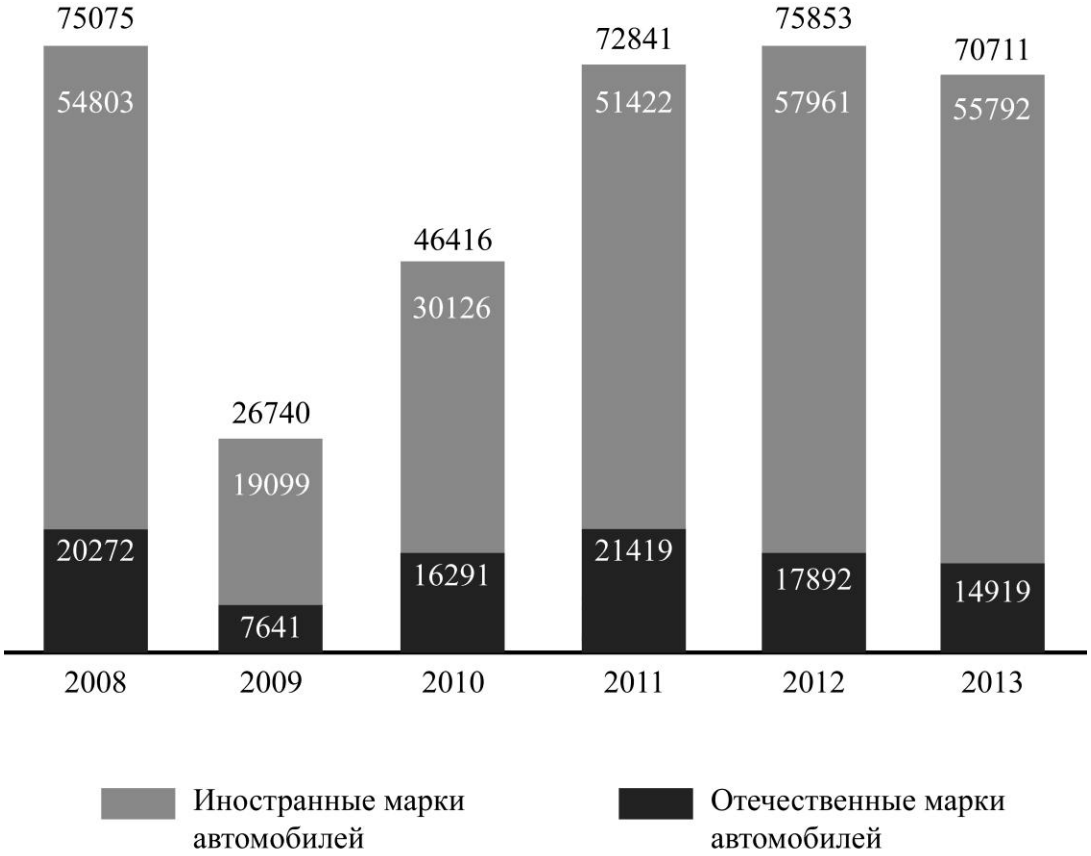


Рис. 4. Динамика продаж новых автомобилей в Челябинской области в 2008–2013 гг.

1. Региональный рынок близок к состоянию насыщения

В настоящее время уровень автомобилизации региона составляет около 310 (в Челябинске порядка 340) автомобилей на 1000 человек населения. Это означает, что фактически каждая семья уже имеет автомобиль. В результате его приобретение из категории «необходимого», как это было 5–6 лет назад, перешло в статус «возможного», поскольку речь идет о замене имеющегося на новый. Соответственно, если раньше потребителям автомобили были нужны «здесь и сейчас», то в настоящее время они сами выбирают время для их приобретения с точки зрения наличия благоприятных условий и возможностей.

2. Ужесточение политики производителей по отношению к дилерам

Нужно учитывать, что сегодня большинство ведущих автопроизводителей имеют в России свои сборочные предприятия. Поэтому в их политике к отечественному рынку превалирует стремление оправдать вложенные в развитие производств инвестиции. А раз так, то целью становится обеспечение максимальных объемов продаж автомобилей.

Общепринятой практикой стало формирование планов исходя из собственных интересов производителей, при этом не учитывается объективная ситуация, складывающаяся на рынке. Именно из-за такого подхода в последние два года возникало затоваривание рынка и, как следствие, его «перегрев». Это приводило к распродажам, наносившим немалый вред экономике дилерских предприятий. В результате рентабельность большинства из них значительно снизилась.

Можно констатировать, что автомобильный бизнес из высокодоходного перешел в разряд умеренно доходного, соответственно сроки окупаемости бизнес-проекта любого дилерского предприятия составляют уже не три–пять и даже не пять–семь, а все десять лет. При этом на фоне падающей рентабельности и снижающейся доходности дилерских компаний, требования к ним со стороны производителей все время возрастают. Рынок насыщен не только автомобилями, но и автомобильным бизнесом.

3. Внутренняя разбалансированность

Автомобильный рынок перестал быть однородным. Раньше вектор развития всегда был общим: если был подъем, то это касалось всех марок, если спад, то, соответственно, страдали тоже все. Сейчас продажи автомобилей одних марок растут, а других падают, причем это касается всех ценовых сегментов. В «траектории» реализации каждого конкретного бренда есть свои составляющие – наличие востребованных моделей, политика производителя на российском рынке, эффективность работы его дилерских компаний и целый ряд других факторов.

4. Активная политика банков в сфере автокредитования

В последние годы наблюдался устойчивый рост объемов кредитования (табл. 2). Это стало возможным благодаря упрощению процедуры оформле-

ния кредитов и времени, необходимого для заключения соответствующих договоров. Существенную роль сыграло и расширение банками списка предлагаемых программ (как общих, так и в партнерстве с автопроизводителями). 2013 год стал показательным в силу того, что конкуренции между банками на рынке автокредитования перешла с размера ставок, на уровень технологии работы с клиентами.

Что касается перспектив развития регионального рынка автокредитования в 2014 году, то существует серьезная проблема, являющаяся объективным ограничителем его дальнейшего роста – высокое кредитное обременение населения. Согласно данным статистики, сегодня фактически каждая семья, проживающая в Челябинской области, является пользователем различных кредитных ресурсов.

Кроме этого, учитывая неблагоприятную конъюнктуру, сложившуюся на отечественном финансовом рынке в начале 2014 года, следует ожидать как роста процентных ставок по автокредитам, так и ужесточения требований к заемщикам. Поэтому есть все основания ожидать в 2014 году снижения объемов выдачи автокредитов на региональном рынке.

5. Переток финансовых ресурсов населения на жилищный рынок

В 2013 году наметилась тенденция перетока финансовых ресурсов населения на жилищный рынок. Это стало следствием активного строительства жилья в регионе и, прежде всего, в Челябинске. По вводу в строй нового жилья в 2013 году столица Южного Урала с показателем 903 тыс. кв. метров заняла шестое место в стране (впереди только Москва – 3132 тыс. кв. метров, Санкт-Петербург – 2584, Новосибирск – 1180, Ростов-на-Дону – 1025, Самара – 909).

Таблица 2

Основные параметры рынка автокредитования Челябинской области

Автомобили	Продажи в 2013 году	Прогноз на 2014 год, шт		
		пессимистический сценарий	базовый сценарий	оптимистический сценарий
Автомобили отечественных марок	14919	12500	14000	15000
Автомобили иностранных марок	55828	51200	53500	55750
Всего	70741	63700	67500	70750

На приобретение жилья в 2013 году население потратило колоссальные финансовые ресурсы, как собственные, так и заемные (ипотечные кредиты), которые в результате не попали на автомобильный рынок. Поскольку большой объем жилья в настоящее время продолжает строиться, есть все основания предполагать, что отмеченная тенденция будет характерна и для 2014 года.

Кроме того, при составлении прогноза функционирования рынка новых автомобилей в Челябинской области в 2014 году, во внимание были приняты факторы, как способствующие росту объемов продаж новых автомобилей, так и тормозящие его.

К первым относятся:

1) относительно доступные автокредиты;

2) большой объем рынка ликвидных автомобилей с пробегом, владельцы которых предполагают менять их на новые машины;

3) большое количество новых моделей, относящихся к «бюджетному» ценовому сегменту, которые должны выйти на рынок в 2014 году

4) возможный запуск новой государственной программы стимулирования спроса на новые автомобили.

Среди факторов, объективно работающих на замедление автомобильного рынка, отметим:

1) политические риски, связанные с событиями на Украине;

2) снижение курса национальной валюты;

3) возможное увеличение ставок по автокредитам;

4) большой объем предложения относительно доступного жилья в Челябинске, что вызывает перетекание финансовых ресурсов населения.

Особо отметим, что учесть все последствия возможных экономических санкций против России из-за событий в Крыму, в настоящее время просто невозможно, поэтому в данном прогнозе они не рассматривались.

Анализ приведенных выше факторов позволил сделать вывод:

1) если не произойдет резкого ухудшения экономической ситуации, вызванного как собственно экономическими, так и политическими причинами, то в ближайшие 2–3 года, объем продаж на региональном рынке будет находиться в «коридоре» – 63,5–70,5 тысяч новых автомобилей в год;

2) объем рынка в 75,5–77,5 тысяч штук – это текущий предел, его дальнейший рост возможен только при существенном повышении благосостоянии населения.

Учитывая высказанные предположения, был сделан прогноз развития рынка новых автомобилей Челябинской области в 2014 году (табл. 3).

Таблица 3

Прогноз развития регионального автомобильного рынка в 2014 году

Автомобили	Продажи в 2013 году	Прогноз на 2014 год, шт		
		пессимистический сценарий	базовый сценарий	оптимистический сценарий
Автомобили отечественных марок	14919	12500	14000	15000
Автомобили иностранных марок	55828	51200	53500	55750
Всего	70741	63700	67500	70750

Как видно из представленного прогноза, в 2014 году региональный рынок ожидает дальнейшее снижение объемов продаж. В лучшем случае они остануться на уровне 2013 года.

Библиографический список

1. Рулевский, А.Д. Региональный автомобильный рынок Челябинской области. Анализ и тенденции / А.Д. Рулевский. – Челябинск: Ассоциация ЧАД, 2014. – 60 с.

К содержанию

УДК 621.436.038

УМЕНЬШЕНИЕ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ КАТАЛИТИЧЕСКИХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

М.П. Грабец

Проведены испытания дизельного двигателя с использованием нейтрализатора отработавших газов. Сформулированы выводы по результатам, полученным в ходе испытаний.

Ключевые слова: дизель; экология; испытания; уменьшение вредных выбросов.

Основной проблемой, встающей перед конструкторами дизелей, является понижение вредных выбросов с отработавшими газами, это достигается или изменением конструкции, или установкой нейтрализаторов отработавших газов и противосажевых фильтров.

Нейтрализаторы бывают трех типов: каталитические, термические и жидкостные. Каталитические нейтрализаторы бывают двух типов: окислительные и восстановительные [1].

Нейтрализаторы, существующие в настоящее время, не обеспечивают одновременного снижения оксидов азота и твердых частиц. Если они снижают оксиды азота, то при этом твердые частицы остаются – это их главный недостаток, поэтому необходимо использовать дополнительные системы – сажевые фильтры.

Одной из основных проблем для всех типов и конструкций фильтров является их регенерация, т.е. восстановление функциональных свойств. Лучшие образцы зарубежных фильтров способны эффективно работать в течение 10…12 часов, после чего их сопротивление становится недопустимо высоким из-за большого скопления твердых частиц. Регенерация обычно производится

посредством выжигания частиц за счет разогрева фильтра либо электроэнергией, либо пропускания горячих газов от автономной горелки. Температура фильтра, при этом, должна быть не менее 800 °С. Продолжительность регенерации 3…5 мин. Для гарантированного выгорания сажи поверхность каналов фильтра покрывают катализатором: обычно, благородными металлами или медью, что приводит к снижению температуры воспламенения сажи с 600…700 до 300…400 °С. Система регенерации включает в себя топливную горелку с подачей дизельного топлива (хотя возможно использование бензина, газа и других топлив), устанавливаемую до фильтрующего блока по ходу движения отработавших газов.

Южно-Уральским государственным университетом (ЮУрГУ) было предложено использовать каталитический нейтрализатор типа «КНД-Рила».

Каталитический нейтрализатор «КНД-Рила» предназначен для снижения концентрации вредных компонентов отработавших газов дизельных двигателей (в том числе «тяжелых») и может устанавливаться на любые транспортные средства.

Рабочим веществом нейтрализатора «КНД-Рила» является катализатор типа «РИЛА». Этот катализатор нечувствителен к каталитическим ядам, включая диоксид серы, что позволяет использовать стандартное, а не специальное дизельное топливо с низким (менее 50 ppm) содержанием серы. Катализатор начинает действовать при температуре отработавших газов выше 200 °С, но также не менее эффективно и устойчиво работает при температуре газов выше 280 °С.

Нейтрализатор предназначен для обезвреживания основных вредных компонентов отработавших газов – вредных частиц и оксидов азота. Из-за высокого содержания кислорода в отработавших газах дизельных двигателей степень восстановления NOx зависит от содержания CO, CH и вредных частиц в отработавших газах, что не вызывает необходимость дополнительной подачи воздуха. Достигаемая степень нейтрализации составляет: до 80 % – для оксида углерода (II), до 70 % – для углеводородов, до 30 % – для оксидов азота и до 70 % – для вредных частиц. Комплексная эффективность нейтрализации отработавших газов, с учетом относительной токсичности вредных компонентов, при использовании «КНД-Рила», может достигать 40 % («KND-Rila». Technical description. Bulgaria, 2000. 3 p.).

Катализатор не является фильтром для сокращения дымности, а действует как химически активный катализатор, который «дожигает» органические вещества и самую вредную часть отработавших газов, в которой содержатся тяжелые нефтяные фракции с высокой канцерогенностью.

Важное качество «КНД-Рила» то, что при ухудшенных характеристиках (по содержанию вредных компонентов) режима работы двигателя, степень нейтрализации отработавших газов повышается.

В нейтрализаторе в качестве носителя используются гранулы окиси алюминия, обеспечивающие самоочистку в процессе работы двигателя за счет вибрации.

Наилучшей схемой реактора с применением гранулированного катализатора является схема, в которой впуск отработавших газов осуществляется в верхнюю зону реактора. Затем газы «продавливаются» через катализатор, с одновременным «прижатием» гранул к нижней сетке. Это позволяет избежать эффекта «вспенивания» и механического повреждения гранул. Выпуск производится через нижнюю часть реактора. Такая схема обеспечивает наиболее эффективную работу каталитического нейтрализатора.

Ниже приведены достоинства нейтрализатора «КНД-Рила»:

1. Снижение выбросов вредных веществ с отработавшими газами до 40 %.

2. В состав активного вещества не входят драгоценные и редкоземельные элементы.

3. Для работы нейтрализатора не требуется дизельное топливо с пониженным содержанием серы. Двигатель может работать на обычном топливе.

4. Температура отработавших газов, при которой начинает функционировать нейтрализатор – 200 °С, что позволяет использовать нейтрализатор для любых типов дизелей широкого диапазона мощности.

5. Нейтрализатор не требует обслуживания в течение длительного времени (до 100 000 км пробега).

6. Более эффективное, по сравнению с обычным глушителем, снижение шума выпуска.

7. Снижение сопротивления на выпуске по сравнению с серийными системами нейтрализации, что влечет уменьшение удельного расхода топлива.

Методика проведения экспериментального исследования заключается в том, что нейтрализатор «КНД-Рила» устанавливается на дизель четырехтактный, четырехцилиндровый с рядным расположением цилиндров (установка производится именно на этот дизель, потому что он устанавливается на большое количество тракторов) и испытывается в несколько этапов:

1. Определение параметров назначения, дымности, выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизеля в исходной комплектации (без нейтрализатора).

2. Определение параметров назначения, дымности, выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизеля с каталитическим нейтрализатором отработавших газов «КНД-Рила».

3. Определение параметров назначения, дымности, выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизеля с устройством, имитирующим сопротивление нейтрализатора (для определения эффективности работы нейтрализатора).

4. Оценка влияния направления движения потока отработавших газов в нейтрализаторе на параметры назначения, дымности, выбросов вредных веществ с отработавшими газами (для определения эффективности работы нейтрализатора).

Испытания проводились по восьмирежимному циклу ГОСТ Р 41.96-2011, представленному в таблице 1 [2].

В соответствии с методикой испытаний, с целью оценки влияния сопротивления нейтрализатора и глушителя на параметры дизеля, были определены параметры дизеля в комплектации с имитатором сопротивления. Необходимость проведения этого этапа обусловлена тем, что в базовой комплектации дизеля, отсутствует глушитель, обладающий определённым сопротивлением, которое нужно учитывать.

Таблица 1

Восьмирежимный цикл

Номер режима	Число оборотов двигателя	Нагрузка, в %
1	Номинальное	100
2	Номинальное	75
3	Номинальное	50
4	Номинальное	10
5	Промежуточное	100
6	Промежуточное	75
7	Промежуточное	50
8	Холостой ход	–

Исходя из полученных значений удельных выбросов вредных веществ с отработавшими газами и дымности дизеля в комплектации с имитатором нейтрализатора, можно сделать вывод, что нейтрализатор снижает выбросы оксида углерода (II) на 35 %, более низкие значения выбросов объясняются меньшим сопротивлением на выпуске.

Из данных, полученных в ходе проведения испытаний с использованием нейтрализатора ОГ, а также при использовании того же нейтрализатора ОГ (с обратным потоком), следует, что изменение направления потока отработавших газов в нейтрализаторе привело к заметному снижению сопротивления нейтрализатора, некоторому уменьшению удельного расхода топлива и «разнонаправленному» изменению эффективности работы нейтрализатора, в частности, удельные выбросы оксидов азота и дымность отработавших газов незначительно возросли, выбросы углеводородов, а также суммарных выбросов оксидов азота и неметановых углеводородов (NOx+NMHC) существенно снизились. Отсюда следует, что целесообразность применения данного технического решения зависит от величины выбросов конкретного двигателя.

Описание результатов проведенного экспериментального исследования приведено ниже:

1) наибольший эффект на выбросы вредных частиц нейтрализатор дает на малых нагрузках, в то время как на режиме номинальной мощности и максимального крутящего момента удельные выбросы двигателя с нейтрализатором превышают базовые (вероятной причиной этого является повышение гидродинамического сопротивления выпускного тракта, что влечет ухудшение рабочего процесса);

2) на концентрацию оксидов азота нейтрализатор оказывает противоположное влияние. При малых нагрузках выбросы NO_x несколько выше, чем при средних и больших, что хорошо согласуется с теорией рабочих процессов (чем больше выбросы вредных частиц, тем меньше выбросы оксидов азота и наоборот);

3) на выбросы углеводородов нейтрализатор на всех режимах оказывает однозначно положительное влияние;

4) наибольший эффект на концентрацию CO_2 нейтрализатор оказывает на режиме максимального крутящего момента, на остальных режимах выбросы оксида углерода (II) увеличиваются (этот факт соответствует информации разработчика нейтрализатора «КНД-Рила» и объясняется особенностями химических реакций на поверхности катализатора);

5) наблюдается увеличение на 50…100 °С температуры отработавших газов после турбокомпрессора вследствие увеличения гидродинамического сопротивления выпускного тракта.

Таким образом, исходя из результатов, полученных в ходе экспериментального исследования можно сделать вывод о том, что установка системы нейтрализации отработавших газов позволяет понизить выбросы: вредных частиц – на 36 %, оксидов азота – на 8 %, оксида углерода (II) – на 35 %, углеводородов – на 73 %. Следовательно, можно считать использование нейтрализатора «КНД-Рила» перспективным на различных дизелях.

Изменение направления течения отработавших газов через нейтрализатор приводит к снижению потерь давления в нейтрализаторе на 13 % (на режиме номинальной мощности) и на 21 % (на режиме максимального крутящего момента), уменьшению удельных выбросов углеводородов в 3 раза, выбросы оксидов азота, углерода (II) и дымность отработавших газов практически не изменяются.

Библиографический список

1. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. – 2-е изд., перер. – М.: «Машиностроение», 1981. – 160 с.

2. ГОСТ Р 41.96-2011. Единообразные предписания, касающиеся двигателей с воспламенением от сжатия, предназначенных для установки на сельскохозяйственных и лесных тракторах и внедорожной технике, в отношении выброса вредных веществ этими двигателями. – М.: Стандартинформ, 2013. – 64 с.

К содержанию

УДК 629.113.03:51

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОЙ ГУСЕНИЧНОЙ ПЛАТФОРМЫ С БОРТОВОЙ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИЕЙ

С.В. Кондаков, О.О. Павловская, Е.А. Горелый, Н.К. Горяев

Приведены результаты исследования алгоритмов управления криволинейным движением гусеничной машиной с бесступенчатой трансмиссией в беспилотном режиме на основе анализа математической модели человека-оператора, обладающего свойством предвидения дорожной ситуации. Определены параметры автоматической системы, способной заменить человека. Результаты могут быть использованы при проектировании автоматических гусеничных платформ гражданского и военного назначения.

Ключевые слова: беспилотная платформа, автоматическая система управления движением, гидрообъёмная передача, параметр регулирования, упреждение, оптимизация управления.

В последнее время все большее пристальное внимание уделяется вопросам теории и практики использования гидростатических трансмиссий [1]. Эффективность их применения в силовых приводах тяжёлых колёсных и гусеничных машин растёт по мере увеличения тягового класса таких машин [2]. В связи с этим и математическое моделирование процессов работы гидрообъёмной передачи (ГОП) получает развитие, с точки зрения оптимизации их управления [3]. Испытания ГОП в составе МТУ гусеничных машин различного назначения проводятся достаточно давно и показали на практике их эффективность [4]. Исследования последних лет связаны с вопросами управляемости транспортных средств человеком и автоматическими системами [5], в том числе через автоматизацию ГОП и создание совершенно новых транспортных платформ, способных ориентироваться в пространстве и перемещаться без непосредственного контроля человека.

Внедрение в технологические процессы беспилотных транспортных средств является актуальной задачей для многих производств, в которых использование традиционного управления человеком вручную либо экономиче-

ски невыгодно (внутрицеховые, складские перевозки по стандартным маршрутам), либо опасно для жизни человека (вредные производства, заражённые местности, зоны боевых действий). В ряде случаев оператора на машине можно заменить радиоуправлением, но в этом случае человек всё-таки задействован в работе. Особый интерес представляют производства, где человека можно полностью исключить из техпроцесса, заменив его автоматической системой управления движением транспорта.

Объектом математического моделирования является транспортная платформа с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), гидростатической трансмиссией, выполненной по бортовой схеме, и гусеничным движителем. Прототипом платформы является промышленный трактор класса 15 т производства ОАО «Завод дорожно-строительной техники «Урал», г. Челябинск.

Структурная схема моторно-трансмиссионной установки платформы представлена на рис. 1. Управление движением осуществляется регулированием подачи насосов ГОП, при нерегулируемых моторах. При прямолинейном движении насосы регулируются синхронно, а при повороте изменением подачи насоса одного из бортов.

Расчётная схема движения гусеничной платформы, справедливая для любой гусеничной машины, приведена на рис. 2.

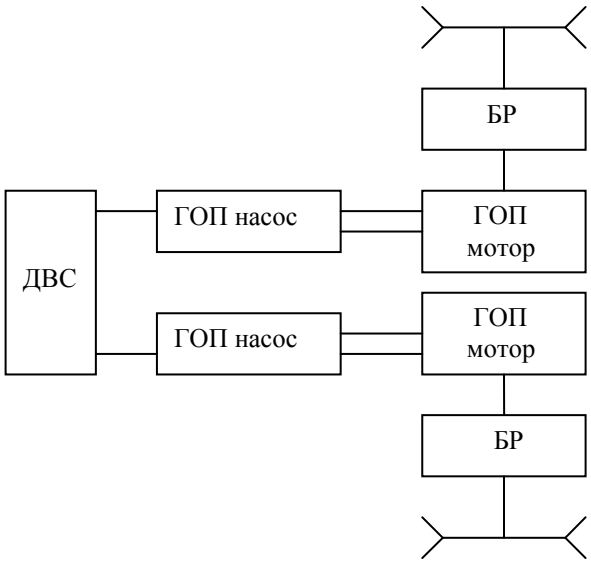


Рис. 1. Структурная схема моторно-трансмиссионной установки платформы

Математическая модель движения платформы на плоскости представляет собой систему трёх дифференциальных уравнений второго порядка [6–8]:

$$\frac{d^2X_c}{dT^2} = \left[\left(T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2\right)\sin\varphi + \left(T_{y2} + T_{y1}\right)\cos\varphi\right]\frac{g}{G};$$

$$\frac{d^2Y_c}{dT^2} = \left[\left(T_{x2} + T_{x1} - F_1 - F_2\right)\cos\varphi - \left(T_{y2} + T_{y1}\right)\sin\varphi\right]\frac{g}{G};$$

$$\frac{d^2\varphi}{dT^2} = \left[\left(T_{y2}\left(\frac{B}{2} + x_2\right) - T_{y1}\left(\frac{B}{2} - x_1\right) + F_1 - F_2\right)\frac{B}{2} - \text{sign}\,\frac{d\varphi}{dT}M_c\right]\frac{1}{J_c};$$

где M_c – момент сопротивления повороту, формирующийся силами и моментами трения, G – вес платформы, J_c – момент инерции платформы относительно вертикальной оси, проходящей через центр тяжести.

Моторно-трансмиссионная установка имеет три степени свободы и описывается тремя дифференциальными уравнениями первого порядка:

$$\frac{d\omega_д}{dt} = \left[M_д - M_{н1} - M_{н2}\right]\frac{1}{J_1};$$

$$\frac{d\omega_{м1}}{dt} = \left[M_{м1} - \frac{P_1 R_{вк}}{i_{бр}}\right]\frac{1}{J_2};$$

$$\frac{d\omega_{м2}}{dt} = \left[M_{м2} - \frac{P_2 R_{вк}}{i_{бр}}\right]\frac{1}{J_3};$$

где $\omega_д$, $\omega_{м1}$, $\omega_{дм2}$ – угловые скорости валов ДВС и моторов ГОП, $M_д$, $M_{н1}$, $M_{н2}$ – крутящие моменты на валах ДВС и насосов гидрообъёмных передач (ГОП), $M_{м1}$, $M_{м2}$ – моменты на моторах ГОП, $R_{вк}$ – радиус ведущего колеса, $i_{бр}$ – передаточное число бортового редуктора, J_1, J_2, J_3 – моменты инерции соответствующих масс.

Гидрообъёмные передачи (ГОП) – уравнениями для давления в каждой из магистралей:

$$\frac{dP_{11}}{dt} = \left(Q_{н1} - Q_{м1} - Q_{k11} + Q_{k12} + Q_{kpp11} - \Delta Q_{н11} - \Delta Q_{м11}\right)\frac{E}{V_1};$$

$$\frac{dP_{12}}{dt} = \left(Q_{м1} - Q_{н1} + Q_{k11} - Q_{k12} + Q_{kpp12} - \Delta Q_{н12} - \Delta Q_{м12}\right)\frac{E}{V_2};$$

$$\frac{dP_{21}}{dt} = \left(Q_{н2} - Q_{м2} - Q_{k21} + Q_{k22} + Q_{kpp21} - \Delta Q_{н21} - \Delta Q_{м21}\right)\frac{E}{V_1};$$

$$\frac{dP_{22}}{dt} = \left(Q_{м2} - Q_{н2} + Q_{k22} - Q_{k22} + Q_{kpp22} - \Delta Q_{н22} - \Delta Q_{м22}\right)\frac{E}{V_2};$$

где P_{11}, P_{12} – давления в магистралях первой ГОП, P_{21}, P_{22} – давления в магистралях второй ГОП, $Q_{н1}$, $Q_{м1}$ – расходы насоса и мотора первой ГОП, $Q_{н2}$, $Q_{м2}$ – расходы насоса и мотора второй ГОП, Q_{k11}, Q_{k12}, Q_{k21} Q_{k22} – расходы предохранительных клапанов, Q_{kpp11}, Q_{kpp12}, Q_{kpp21}, Q_{kpp22} – расходы клапанов подпитки,

$\Delta Q_н$ $\Delta Q_м$ – утечки в насосах и моторах [9]. Каждая из магистралей ГОП может быть высокого или низкого давления в зависимости от условий движения (вперёд–назад, поворот вправо–влево, переходные процессы движения: разгон–торможение, вход–выход из поворота).

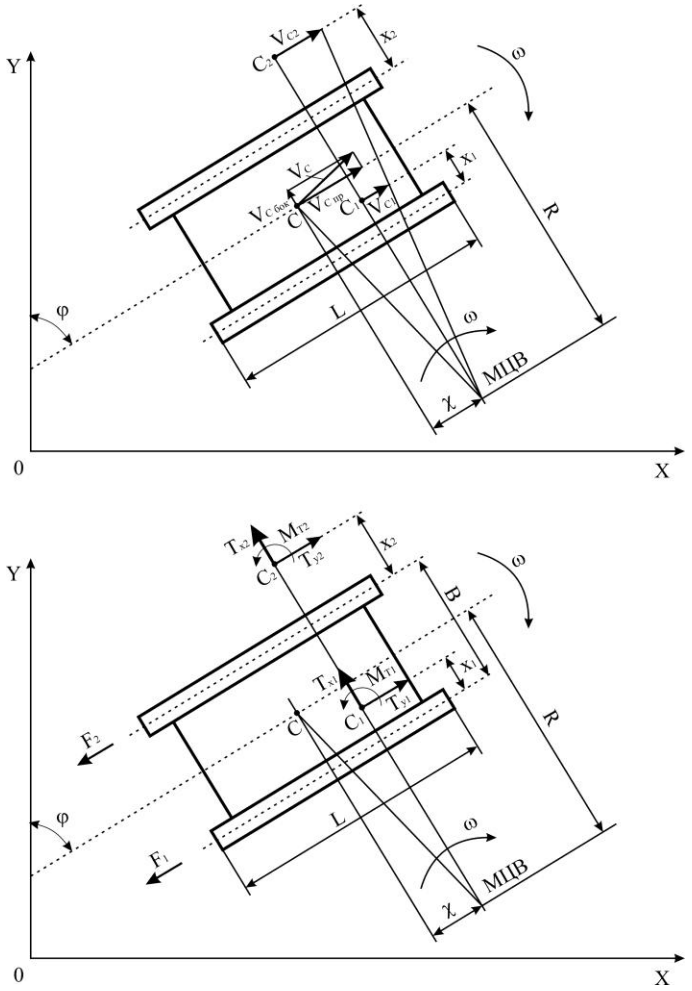


Рис. 2. Расчетная схема: X,Y – декартовы координаты, φ – курсовой угол, МЦВ – мгновенный центр вращения, F_1,F_2 – силы сопротивления на отстающем и забегающем борту, V_c – линейная скорость центра тяжести, χ – продольное смещение полюса поворота, L – продольная база машины, B – поперечная база машины, x_1 – поперечное смещение полюса поворота отстающей гусеницы, x_2 – поперечное смещение полюса поворота забегающей гусеницы, $V_{C\ бок}$ – составляющая V_C , направленная перпендикулярно оси корпуса машины, $V_{C\ пр}$ – составляющая V_C , направленная вдоль оси корпуса машины, T_{x1} , T_{y1} – составляющие результирующей силы трения отстающей гусеницы о грунт, T_{x2} , T_{y2} – составляющие результирующей силы трения забегающей гусеницы о грунт, $M_{т1}$, $M_{т2}$ – результирующие моменты трения отстающей и забегающей гусениц относительно полюсов поворота C_1 и C_2 соответственно, ω=dφ/dt – угловая скорость поворота корпуса, V_{C1} , V_{C2} – скорости полюсов поворота отстающей и забегающей гусениц соответственно.

Управление движением платформы осуществляется изменением производительности (подачи) насосов ГОП. Гидромоторы имеют два режима – рабочий и транспортный. Иными словами, насосы непрерывно регулируемые, а моторы двухпозиционные. При движении прямо насосы регулируются синхронно, а при повороте уменьшается подача насоса отстающего борта.

Задачей данного исследования является отработка алгоритма управления движением платформы по произвольной криволинейной траектории в автономном беспилотном режиме.

Необходимым условием реализации поставленной задачи являются наличие ориентиров на местности и соответствующих датчиков на платформе. В качестве одного из вариантов в данном случае траектория задана линией на местности, а платформа оборудована системой датчиков, замеряющих отклонение этой линии от продольной оси платформы. Датчики установлены на некотором расстоянии перед центром тяжести платформы и таким образом формируют сигнал о кривизне дороги с некоторым упреждением. Пересчёт показаний датчиков расстояния в кривизну траектории (рис. 3) осуществляется по формуле:

$$Kr = \frac{2x}{\Delta L^2},$$

где x – отклонение линии на местности от продольной оси платформы, ΔL – расстояние от центра тяжести до места установки датчиков. Сделано допущение что при малых x центр тяжести А и точка С на местности принадлежат одной окружности радиуса $R = \frac{1}{Kr}$, а в прямоугольном треугольнике ΔABC гипотенуза близка по длине большему катету.

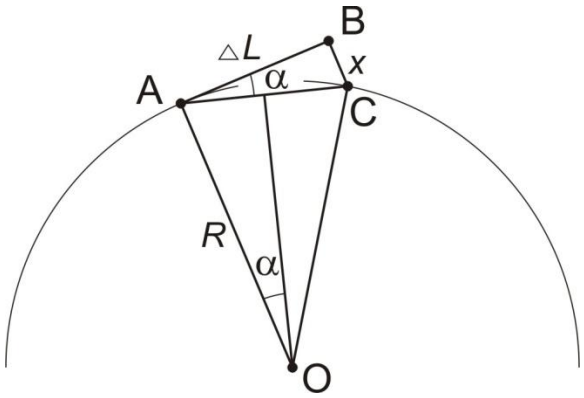


Рис. 3. Геометрическая связь между отклонением *x*
продольной оси машины от траектории дороги
и кривизной траектории *Krд* на расстоянии ΔL от центра тяжести

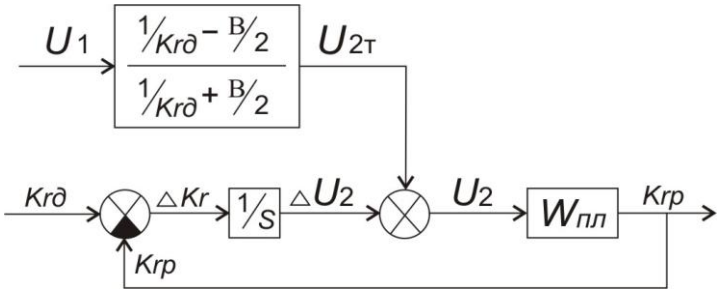


Рис. 4. Структурная схема АС управления движением беспилотной гусеничной платформы

Автоматическая система (АС) управления подачей насоса отстающего борта (рис. 4) работает следующим образом: опорный сигнал U_1 подачи насоса забегающего борта задает скорость прямолинейного движения платформы. В случае нулевой кривизны проложенной трассы и отсутствии внешних помех движению параметр регулирования подачи насоса отстающего борта $U_2 = U_1$ и платформа движется прямо. При появлении помех, например буксования одной из гусениц, или утечек в одной из ГОП, АС по разности кривизны реальной траектории центра тяжести и заданной линией на местности корректирует подачу насоса отстающего борта и прямолинейное движение восстанавливается. При повороте соотношение U_1 и U_2 задается кривизной трассы, что схеме. Единичная обратная связь и интегрирующее звено обеспечивают точное соответствие кривизны траектории центра тяжести проложенной на местности линии маршрута.

На рис. 4 $Krд$ – кривизна линии маршрута, Krp – кривизна траектории центра тяжести платформы, вычисляемая в модели по формуле:

$$Krp = \frac{d\varphi / dt}{\sqrt{\left(dX/dt\right)^2 + \left(dY/dt\right)^2}}.$$

Математическая модель и алгоритм управления движением беспилотной гусеничной платформы реализован в среде программирования VISSIM. В качестве иллюстрации качества управления на рис. 5 приведён эпизод входа в поворот с кривизной линии маршрута $Krд = 0.06м^{-1}$. Скорость движения платформы 0,6 м/с соответствует внутрицеховому безопасному маневрированию.

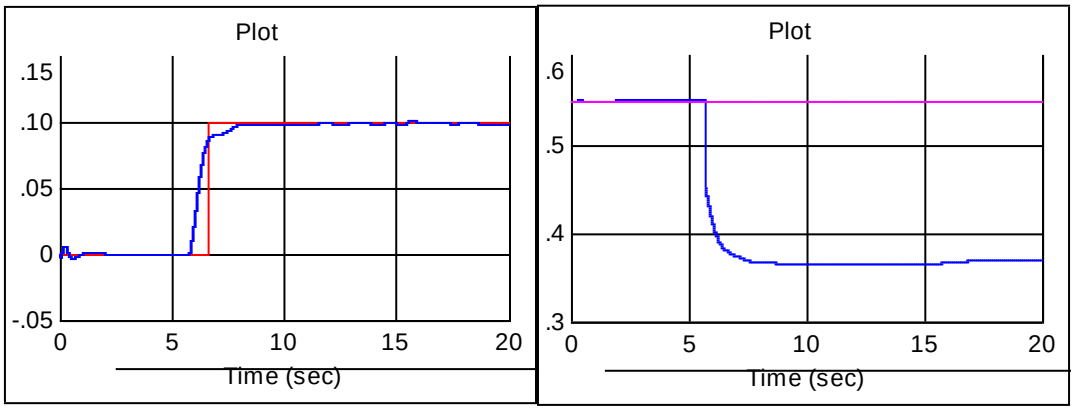


Рис. 5. Траектории и параметры регулирования

Расположение датчика впереди центра тяжести позволило ввести упреждающее управление, что соответствует управлению человеком, следящим за дорогой перед машиной. Расстояние между центром тяжести платформы и датчиками, следящими за линией на местности, определено из соображений наилучшего соответствия качества автоматического регулирования качеству регулирования опытным человеком-оператором.

Полученный результат является развитием математического представления о модели человека, управляющего транспортным средством [6, 10–13]. Для сравнения приведен график на рис. 6 (из ранее опубликованных работ авторов), иллюстрирующий переходный процесс входа в поворот гусеничной машины, управляемой человеком по информации о кривизне дороги непосредственно под центром тяжести машины, то есть не предвидящим развитие дорожной ситуации. В этом смысле представленная в данной статье модель является более полной, дополнительно включающей важное свойство человека-оператора, такое как предвидение.

Сравнение графиков на рисунках 5 и 6 указывает на большее соответствие реальному процессу управления поворотом именно рис. 5, поскольку поворот штурвала начинается до входа в поворот, что соответствует работе человека как управляющего звена.

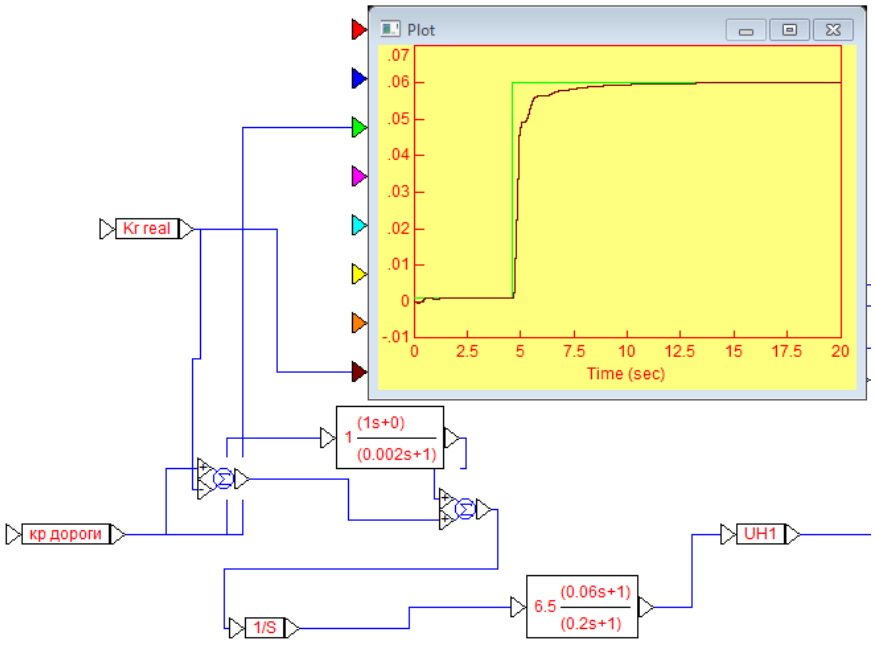


Рис. 6. Переходная характеристика системы управления БГМ при найденных программным путем параметрах модели механика-водителя ($K_{2опт}$; $T_{2опт}$) [6, 13]

Выводы

– развиты вопросы теории моделирования человека-оператора, управляющего гусеничной машиной, количественно определены величины, характеризующие оценку человеком развития дорожной ситуации, сделано предположение о возможности выполнения этих функций автоматической системой управления криволинейным движением, ориентирующейся на дороге аналогично человеку;

– представлена математическая модель движения гусеничной машины с бортовой гидростатической трансмиссией;

– определён алгоритм управления движением беспилотной гусеничной платформы, основанный на упреждающем воздействии на подачу насоса ГОП отстающего борта в пропорции, определяемой кривизной линии маршрута, и корректирующий подачу насоса отстающего борта по отклонению кривизны траектории центра тяжести от заданного маршрута;

– анализ переходного процесса входа в поворот показал приемлемое качестве качество регулирования.

Библиографический список

1. Karl Th. Renius, Rainer Resch. 2005. Continuously Variable Tractor Transmissions. ASAE Distinguished Lecture No. 29, pp. 1–37.

2. Karl-Erik Rydberg. 1997. Hydrostatic Drives in Heavy Mobil Machinery – New Concept and Development Trends. Linkoping University. SAE paper No. 981989. ASAE.

3. Ali Volkan Akkaya. 2006. Effect of bulk modulus on performance of a hydrostatic transmission control system. Yildiz Technical University, Turkey. Sadhana Vol. 31, Part 5, October 2006, pp. 543–556.

4. Installation and test of hydrostatic drive transmission in a government furnished M-113 vehicles. David Taylor Research Center. Monitoring organization report number DTRC-SSID-CR-6-89. – URL: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a204960.pdf.

5. Iliyan Lilov, Lalyo Lalev. 2006. Mathematical Modeling of Processes in the System Environment-Driver-Caterpillar Vehicle for Motion on Rout with Changeable Structure. – URL: http://www.actrus.ro/reviste/3_2006_eng/a15.pdf.

6. Кондаков, С.В. Автоматизированное управление движением быстроходной гусеничной машины: монография / С.В. Кондаков, О.О. Павловская. – Saarbrucken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 105 с.

7. Кондаков, С.В. Повышение подвижности быстроходной гусеничной машины путем автоматизации системы управления криволинейным движением: монография / С.В. Кондаков. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. – 108 с.

8. Кондаков, С.В. Интеллектуальная бесступенчатая трансмиссия – регулятор расхода топлива ДВС и крутящего момента ведущих колёс / С.В. Кондаков, О.О. Павловская // Вестник машиностроения. – 2013. – № 7. – С. 3–11.

9. Объёмные гидромеханические трансмиссии / под ред. Е.С. Кисточкина. – Л.: Машиностроение, 1987. – 256 с.

10. Кондаков, С.В. Исследование подвижности быстроходной гусеничной машины при движении по заданной трассе / С.В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 15. – № 10 (186). – С. 63–66.

11. Кондаков, С.В. Имитационное моделирование движения быстроходной гусеничной машины с механиком-водителем / С.В. Кондаков, Н.Н. Корнаева, О.О. Павловская, С.И. Черепанов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вып. 16. – № 29(205). – С. 59–64.

12. Павловская, О.О. Методы определения параметров линейной математической модели человека-оператора / О.О. Павловская // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 41–44.

13. Павловская, О.О. Алгоритм определения параметров математической модели механика-водителя, управляющего криволинейным движением быстроходной гусеничной машины / О.О. Павловская, С.В. Кондаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 15. – № 2 (262). – С. 43–47.

К содержанию

УДК 625.7.06/.07

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ УПЛОТНЕНИЯ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.И. Кромский, А.А. Юсупов

Приведены принципиальные схемы рабочих органов машин для уплотнения дорожно-строительных материалов. Показаны преимущества технологии уплотнения сыпучих сред с использованием конусообразных вальцов.

Ключевые слова: уплотнение материалов, машины для уплотнения, композиционные материалы, вальцы конусообразной формы.

В настоящее время в виду высоких скоростей движения автотранспорта и увеличивающихся нагрузках на ось предъявляются повышенные требования к прочности и ровности поверхности дорожных покрытий, что в значительной мере зависит от качества уплотнения всех конструктивных слоев автомобильной дороги.

Дорожно-строительные материалы: щебень, гравий, асфальтобетонные, цементно-бетонные смеси и др., укладываемые в процессе строительства дорожного покрытия, находятся в разрыхлённом состоянии, и их плотность, а следовательно, и прочность недостаточны для обеспечения нормального проезда. Вследствие этого уложенные материалы требуют искусственного уплотнения, которое осуществляется различными машинами.

Процесс уплотнения дорожно-строительных материалов, являющихся, как правило, многофазными, включающими в себя, кроме твердой фазы из минеральных частиц различной крупности, также жидкую и газообразную фазы, состоит в том, что под воздействием нагрузки, тем или иным способом приложенной к уплотняемому материалу, происходит сближение минеральных частиц и более компактное и плотное расположение в уплотняемом объёме материала путём вытеснения газообразной фазы и в некоторых случаях также и жидкой фазы.

К основным факторам, влияющим на технологию уплотнения, относятся:

1) размер, форма, прочность и другие свойства минеральной части, т.е. свойства твердой фазы материала;

2) количественное соотношение твёрдой, жидкой и газообразной фаз;

3) физико-механические свойства материала как многофазного в целом;

4) максимальное напряжение, прикладываемое на поверхности уплотняемого материала и определяющее напряженное состояние всего объёма уплотняемого материала;

5) время нахождения материла в напряженном состоянии и скорость изменения напряженного состояния;

6) частота и число приложений циклической нагрузки.

Первые три фактора зависят от свойств уплотняемого материала, а последние определяются конструктивными параметрами уплотняющей машины.

Рабочие органы машин для уплотнения дорожных покрытий производят уплотнение материалов с использованием следующих технологий: укаткой, трамбованием и вибрированием.

В последнее время в ЮУрГУ появились проекты уплотняющих машин, использующих одновременно не один, а два или даже все три основных метода уплотнения в одном рабочем органе.

Уплотнение дорожно-строительных материалов осуществляется в основном катками с резиновыми или металлическими вальцами, диаметр которых может доходить до 1600 мм, а иногда – до 2000 мм.

Масса дорожных катков отечественного производства доходит до 25 т.,что в современных условиях скоростного строительства дорог явно недостаточно: масса катков должна доходить до 40…200 т. Чем больше масса катков, тем больше должны быть диаметры вальцов, а это приводит к чрезмерному увеличению высотного габарита машины.

В данной работе рассматривается принципиальная возможность существенного увеличения диаметра вальцов без увеличения высотного габарита машины [1].

Конструктивно увеличение диаметра вальцов можно реализовать путем качения конуса (конического вальца). Конические устройства можно разделить на два типа в зависимости от величины угла при вершине конуса.

На рис. 1 схематически показана конструкция конусного устройства, состоящего из конуса с углом при вершине $\alpha \leq \pi/2$.

Ось вращения конуса, наклонена к горизонтальной плоскости на угол $\alpha/2$.

На рис.2 схематически показана конструкция конусного устройства с углом при вершине $\pi-\alpha>\pi/2$ (т.е. $\alpha>\pi/2$). Такое устройство может состоять из одного конуса, вырождающегося в конусообразную (выпуклую) плиту. В этом случае ось вращения конуса, наклонена к вертикальной оси на угол $\alpha/2$. Конус и кривошип водила связаны между собой подшипниковым узлом (на рисунке не показан).

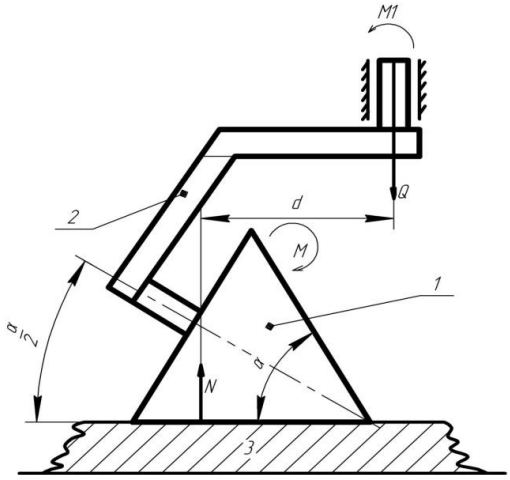


Рис. 1. Схема качения конуса по горизонтальной поверхности:
1 – конус ($\alpha \leq \pi/2$), 2 – водило, 3 – уплотняемый материал

Обратим внимание на очень важную особенность качения конического колеса в этом случае. Если образующая конуса R, то радиус основания конуса будет $R\cos\alpha/2$. Поэтому при каждом обороте край конического колеса будет отставать от своего местоположения при предыдущем обороте на величину $2\pi R(1-\cos\alpha/2)$.

Таким образом, при вращении водила колесо стремится поворачиваться в сторону, противоположную вращению водила. Два одинаковые конические колеса, смонтированные на общей раме и вращающиеся в разные стороны, обеспечивают поступательное движение механической системе со скоростью $V=2\pi R(1-\cos\alpha/2)n$, м/мин, где n – число оборотов коленчатого вала (водила) в мин.

Оба описанных выше варианта конструкции конусных устройств имеют один и тот же недостаток – линия действия силы *N* реакции материала на конус (рис. 1 и 2) не совпадает с линией действия внешней силы *Q*, прилагаемой к конусному устройству. Эти две равные силы (*N* и *Q*) образуют пару сил с опрокидывающим моментом *M=Nd*, плоскость действия которой вращается. Для уравновешивания этой пары сил следует одновременно применять сдвоенные конусные устройства.

Мгновенный радиус кривизны при качении конуса по плоскости определяется выражением:R = - *xctg(α/2)*.

Знак минус в значении *R* говорит о том, что кривая сечения есть линия вогнутая.

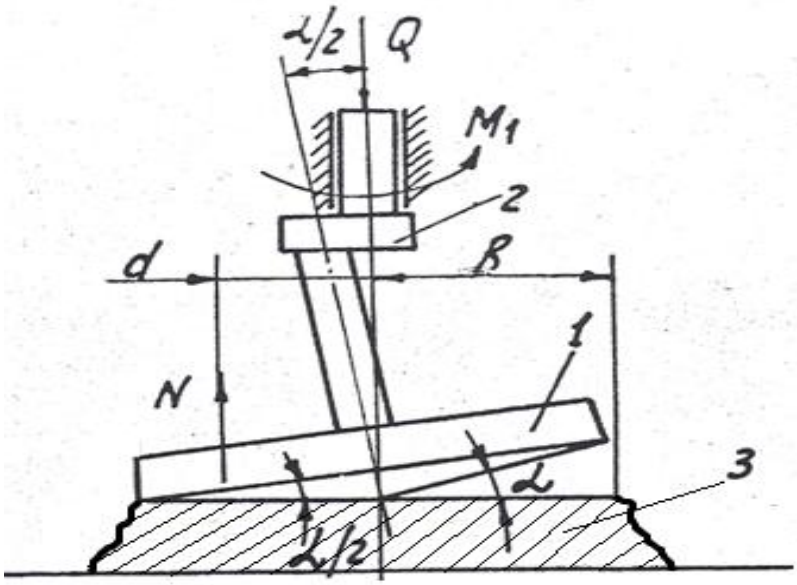


Рис. 2. Схема качения конусного вальца:
1 – конус ($\alpha<\pi/2$), 2 – водило, 3 –поверхность качения

Зная мгновенный радиус кривизны, мы в задаче качения конуса можем воспользоваться решением задачи о качении цилиндра, условно считая, что он катится параллельно оси *x* и радиус цилиндра есть величина, переменная по *x*, равная *xctg(α/2)*. Например, для выпуклой плиты с углом при вершине конуса π-α=170^0 радиус «цилиндра» (мгновенный радиус кривизны) при *x*=0,1м составляет 5,7 м, при *x*=0,4м вырастает до 23 м.

Вывод: используя вальцы в виде конусов с углом при вершине более $\pi/2$ и приближающемуся к π (реально 150^0…170^0), можно проектировать дорожные катки с диаметром «вальцов» в несколько раз превышающими диаметры вальцов традиционного исполнения, причем без увеличения высотного габарита машины.

Библиографический список

1. Устройство для прессования строительных изделий. Авторское свидетельство на изобретение, СССР № 1645158. Кромский Е.И., Заровнятных В.А., Зализовский Е.В., Генкин А.Р. Опубл. БИ № 16, 1991.

К содержанию

УДК 621.431.73-043

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.В. Разношинская

Представлены результаты исследований, направленных на повышение эффективности нейтрализации вредных веществ отработавших газов. Приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие целесообразность применения демпфера колебаний температуры в системе выпуска отработавших газов, оборудованной каталитическим нейтрализатором и системой утилизации отработавших газов. Снижая амплитуду колебаний температуры отработавших газов, можно повысить надежность и эффективность работы каталитических нейтрализаторов.

Ключевые слова: отработавшие газы, каталитический нейтрализатор, утилизационный двигатель, дымность и токсичность отработавших газов, температура, демпфирование колебаний температуры.

Загрязнения окружающей среды отходами многообразной деятельности человека угрожают экологической катастрофой. Во всем мире идет постоянное ужесточение экологических требований к автомобилям, являющимся основным источником загрязнения окружающей среды в городах. Во многих странах введены налоговые льготы и штрафы в зависимости от величины выбросов вредных веществ в отработавших газах двигателей.

В Российской Федерации с 1-го января 2013 года все производимые и ввозимые на территорию России автомобили должны соответствовать классу Евро-4, однако возможно использовать шасси и базовые транспортные средства с сертификатами Евро-3, выпущенные до 31 декабря 2012 года.

В докладе «О состоянии окружающей природной среды на территории города Челябинска в 2012 году», подготовленном на основании информации, полученной от Управления экологии и природопользования города Челябинска, отмечается, что доля загрязнения воздуха автотранспортом составляет

60–70 % от общего уровня газового загрязнения. Дальнейшее развитие и повышение эффективности использования наземной мобильной техники неразрывно связаны с решением проблемы загрязнения окружающей среды.

Исследования состава отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ОГ ПДВС) показывают, что в них содержится несколько десятков веществ, загрязняющих окружающую среду, основные из которых: оксид углерода, оксиды азота, углеводороды, бензопирен, альдегиды, сажа.

Уменьшение выброса вредных веществ с ОГ ПДВС может быть достигнуто с помощью целого комплекса разнообразных мероприятий: технических, внедряемых в процессе создания двигателей и связанных с изменением конструкции и регулировок двигателей; организационно-технических, осуществляемых в стадии эксплуатации автомобильной техники. Все эти мероприятия могут быть отнесены к одному из четырех направлений:

Первое направление объединяет решения, затрагивающие рабочий цикл двигателя и воздействующие непосредственно на процессы образования вредных веществ в его цилиндрах. Сюда относятся: совершенствование конструкции камеры сгорания, выпускной и впускной систем, системы питания двигателя; впрыск воды; рециркуляция ОГ и ряд других мероприятий.

Сущность второго направления заключается в обезвреживании вышедших из цилиндра продуктов сгорания при помощи специальных устройств – нейтрализаторов, встроенных в выпускную систему двигателя и применяемых как дополнительное оборудование. Такие системы позволяют без значительных изменений в конструкции двигателя существенно снизить выбросы вредных веществ.

Третье направление среди мероприятий по снижению токсичности предполагает замену традиционных топлив нефтяного происхождения другими, альтернативными топливами, выделяющими при сгорании меньшее количество вредных веществ (газообразными топливами, топливными смесями и др.), либо использование присадок, обеспечивающих снижение выброса токсичных компонентов.

Последнее, четвертое направление включает мероприятия по обеспечению оптимальных регулировок и режимов эксплуатации двигателя [1].

Метод каталитической нейтрализации для снижения токсичности отработавших газов ДВС является достаточно эффективным и перспективным. Однако, существенным недостатком каталитических нейтрализаторов (КН) является его низкая способность нейтрализовать вредные вещества при температуре ниже 200 °С. В тоже время большую опасность для КН представляет температура ОГ выше 600 °С, при которой существенно снижается срок его службы.

При температуре ОГ на входе в КН равной 207 ^{o}C содержание оксида углерода в ОГ равно 0,88 %, а углеводорода 184ppm. При повышении температуры ОГ на 60 ^{o}C, содержание оксида углерода снижается до 0,32 %, а углеводорода до 68ppm. Если же в КН попадают ОГ с температурой более 650 ^{0}C (что характерно для работы ПДВС на больших нагрузках), то возникает вероятность прогара корпуса нейтрализатора, снижается срок его службы [2]

Одним из способов, позволяющих одновременно решать проблемы утилизации и нейтрализации ОГ, являются установки с использованием каталитического нейтрализатора, совмещенного с утилизационным поршневым двигателем с внутренним объемным парообразованием. Большую часть времени двигатели работают на переменных скоростных и нагрузочных режимах. Абсолютное значение энергии, уходящей с ОГ и их температура существенно зависят от режима работы ДВС.

В ходе ранее проведенных исследований установлено, что эффективность действия утилизационных систем также в большой степени зависит от температуры отработавших газов, поступающих к утилизационным двигателям, которая существенно меняется при функционировании поршневых ДВС [3, 4, 5, 6].

В связи с этим актуальным становится решение задачи по демпфированию колебаний температуры отработавших газов.

Повысить эффективную мощности дизеля и снизить содержание в выбросах оксида углерода и углеводорода можно путем использования демпфера колебаний температуры отработавших газов в системе выпуска дизеля, оборудованного утилизационным поршневым двигателем с внутренним объемным парообразованием.

Демпфировать колебания температуры отработавших газов возможно с помощью устройств, содержащих теплоаккумулирующие материалы (ТАМ), которые могут быть названы демпферами колебаний температуры отработавших газов (ДКТ ОГ).

Для оценки влияния демпфирования колебаний температуры ОГ поршневого ДВС на содержание в них вредных веществ, были использованы полиномиальными зависимостями, полученными М.Л. Хасановой.

При использовании этих формул получили результаты, показывающие, как изменялись степени снижения показателей, характеризующих дымность и токсичность ОГ силовой установки при ее эксплуатации в городских условиях в случаях работы без ДКТ и с ним.

На рисунке 1 показано как изменялись степени снижения показателей, характеризующих дымность и токсичность ОГ силовой установки при ее эксплуатации в городских условиях в случаях работы без ДКТ ОГ и с ним.

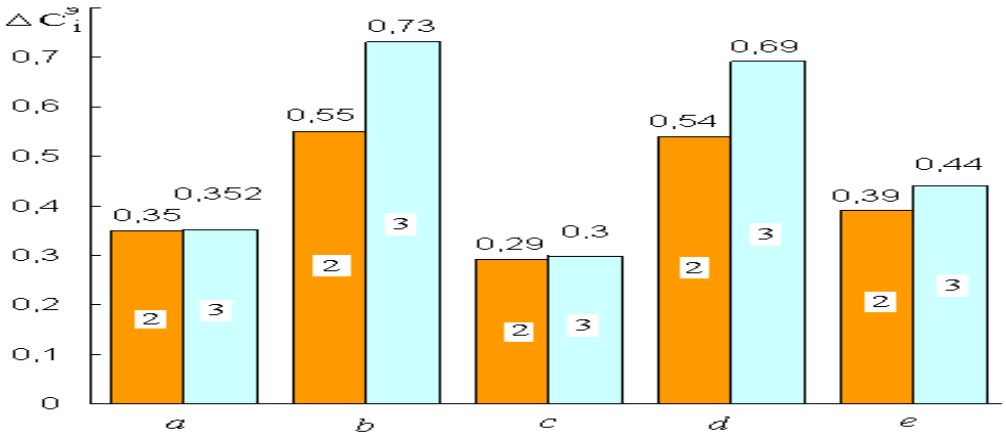


Рис. 1. Значения степеней снижения показателей, характеризующих дымность и токсичность силовой установки при ее эксплуатации в городских условиях:
a – дымность; b – концентрация CO; c – концентрация NO_x; d – концентрация CH;
e – комплексный показатель вредности отработавших газов, приведенный к CO;
2 – при работе без демпфера колебаний температуры отработавших газов;
3 – при работе с демпфером колебаний температуры отработавших газов

Как видно из рисунка, наибольший эффект достигается в отношении оксида углерода и углеводородов – даже без использования ДКТ ОГ при прохождении через утилизационный двигатель внутреннего сгорания: их содержание в ОГ снижается более, чем на 50 %. На 35 % уменьшается дымность ОГ и около 30 % составляет снижение содержания в них оксидов азота. Почти на 40 % уменьшилась суммарная вредность выбросов.

Установка в выпускную систему ДКТ существенно повлияла на снижение концентрации двух компонентов – оксида углерода и углеводородов. Связано это с тем, что наличие ДКТ стабилизировало колебания температуры ОГ в районе 500 °C, что привело к заметно большей активности процессов дооокисления в цилиндре УД.

На дымность и содержание NOx в основном оказывало влияние наличия воды и водяных паров в УД. Поскольку их количество от установки ДКТ в утилизационную систему не изменилось, остался практически прежним и уровень названных компонентов. Суммарная вредность выбросов при наличии ДКТ снизилась на 12,8 % по отношению к работе без него.

Абсолютные величины показателей дымности и токсичности ОГ отработавших газов силовой установки при ее эксплуатации в городских условиях в случаях работы без демпфера колебаний и с ним показаны на рис. 2.

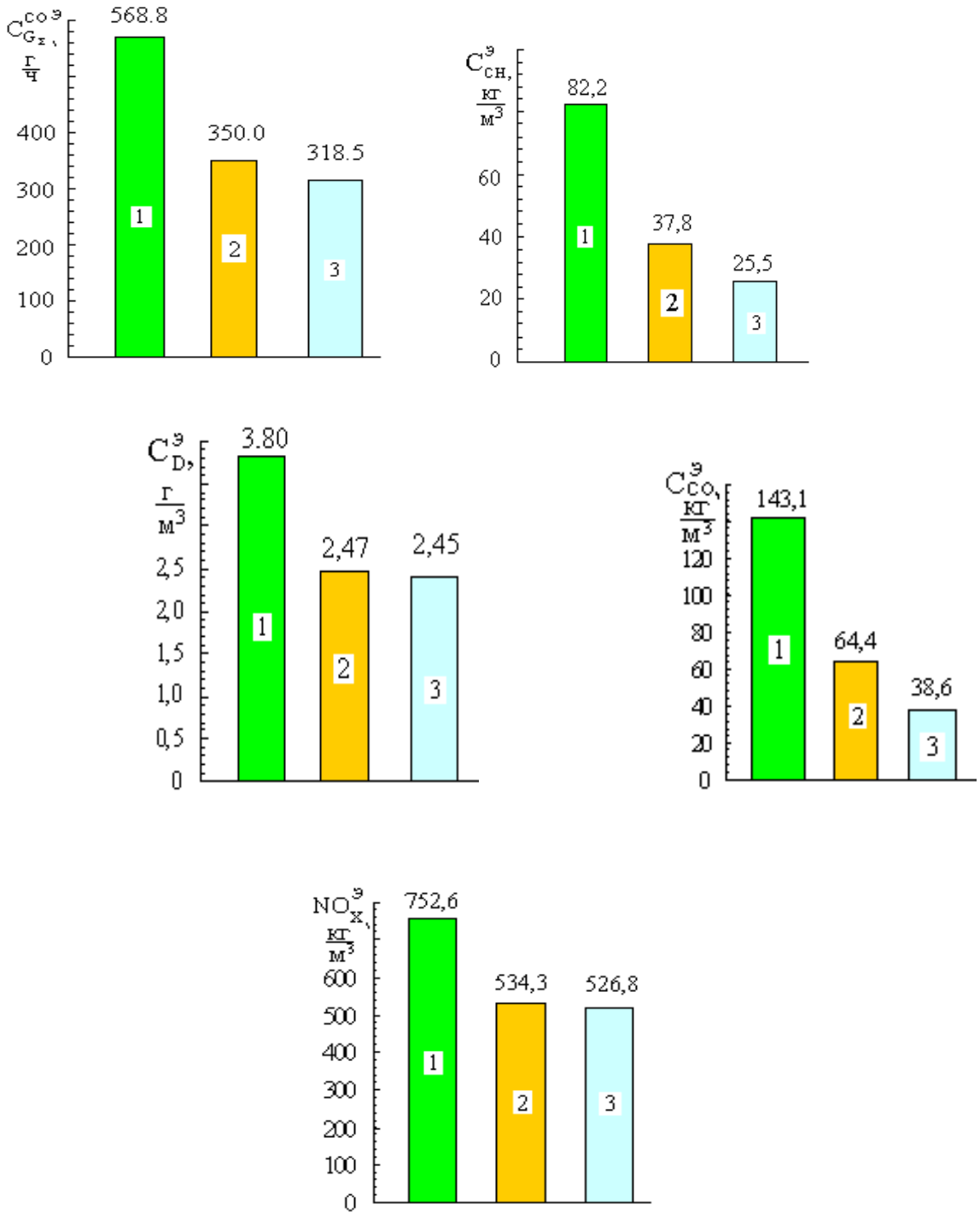


Рис. 2. Величины дымности и токсичности ОГ силовой установки при ее эксплуатации в городских условиях при работе без утилизационной системы (1); при утилизации теплоты ОГ дизеля без ДКТ (2) и при утилизации теплоты отработавших газов дизеля с ДКТ (3)

Экспериментально установлено, что при использовании в качестве утилизатора поршневого парового двигателя с внутренним объемным парообразованием при работе дизеля КамАЗ-740 (автомобиль КамАЗ-5320) в условиях городской эксплуатации в случае использования демпфера колебаний температуры отработавших газов эффективная мощность возросла на 2,3 % (2,8 кВт), а снижение часового расхода топлива составило 4 % (0,7 кг/ч). Существенно снизилось содержание в отработавших газах CO (на 18 %) и CH (на 15 %) [7].

Представленный материал неоспоримо свидетельствуют о целесообразности применения демпфера колебаний температуры в системе выпуска отработавших газов, оборудованной каталитическим нейтрализатором и системой утилизации ОГ.

Библиографический список

1. Хасанова, М.Л. Повышение экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания за счет утилизации теплоты отработавших газов: дис. … канд. техн. наук / М.Л. Хасанова. – Челябинск, 2002. – 174 с.

2. Новоселов, А.Л. Снижение токсичности автотракторных дизелей: Учеб. пособие по целевой подготовке специалистов ДВС / А.Л. Новоселов, С.В. Новоселов, А.А. Мельберт, А.В. Унгефук. – Барнаул: Алт. ГТУ, 1996. – 122 с.

3. Зайцев, А.П. Исследование характеристик работы утилизационного термоэлектрического генератора при работе дизеля на различных режимах / А.П. Зайцев и др. // Повышение уровня технической эксплуатации судовых дизелей. – Новосибирск, 1987. – С. 67–73.

4. Козьминых, В.А. О необходимости применения тепловых аккумуляторов в системах утилизации теплоты отработавших газов мобильной техники / В.А. Козьминых, А.В. Разношинская, В.А. Шибанова // Развитие оборонно-промышленного комплекса на современном этапе: Материалы науч.-техн. конференции (Омск, 4–6 июня 2003 г). – Омск: Омск. Гос. Университет, 2003. – С. 76–77.

5. Кукис, В.С. Системно-термодинамические основы применения двигателей Стирлинга для повышения эффективности силовых и теплоиспользующих установок мобильной техники: дис. … д-ра техн. наук / В.С. Кукис. – Челябинск, 1989. – 461 с.

6. Левенберг, В.Д. Аккумулирование тепла / В.Д. Левенберг. – М.: Наука, 1991. – 83 с.

7. Разношинская, А.В. Повышение эффективности утилизации теплоты и нейтрализации отработавших газов поршневых ДВС путем демпфирования колебаний их температуры: дис. … канд. техн. наук / А.В. Разношинская. – Челябинск, 2005. – 159 с.

К содержанию

УДК 629.113.06

ПОВЫШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛНОПРИВОДНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

П.В. Яковлев

Полноприводные автомобили являются незаменимыми при выполнении транспортных задач в условиях слаборазвитой дорожной сети и при выполнении специфических задач. Разработка новых конструкций раздаточных коробок и основ их функционирования позволит разрешить противоречие между эффективностью высокого быстродействия для проходимости автомобиля и возникающими при этом высокими динамическими нагрузками.

Ключевые слова: автомобиль, раздаточная коробка, переключение передач.

Общеизвестно, что уменьшение времени на переключение передач в движущемся автомобиле положительно сказывается на его проходимости. Но на полноприводных машинах в условиях бездорожья для увеличения крутящего момента на ведущих колесах водитель, полностью реализовав передаточный диапазон КП, вынужден останавливать автомобиль для включения понижающей передачи в РК. Такая остановка предписана заводом-изготовителем ввиду высокой вероятности поломки деталей участвующих в переключении. Таким образом, ясна перспективность и целесообразность использования в трансмиссиях автомобилей механических ступенчатых трансформаторов крутящего момента, которые дополнительно должны обладать такими ценными свойствами, как высокая скорость переключения передач и возможность переключения во время движения автомобиля, что в настоящий момент крайне затруднено в серийных раздаточных коробках автомобилей-тягачей.

Для решения обозначенной проблемы предлагается конструкция раздаточной коробки с механизмом переключения передач [2] с новым функциональным свойством, а именно возможностью производить переключение передач без предварительной синхронизации скоростей вращения включаемых шестерен за короткое время и во время движения автомобиля.

Предлагаемая конструкция РК с механизмом переключения передач (рис 1) содержит корпус 1, входной вал 2, жестко установлены на входном валу шестерни повышенной 3 и пониженной 4 передачи, постоянно зацепленные с шестернями входного вала промежуточные шестерни 5 и 6, оси 7 и 8 промежуточных шестерен, водило 9 с выступом с возможностью поворота вокруг оси входного вала и фиксации угла поворота осей промежуточных шес-

терен, коронную шестерню 10 межосевого дифференциала 11 с возможностью зацепления с одной из промежуточных шестерен, двухпозиционную зубчатую муфту 12 блокировки межосевого дифференциала, валы 13 и 14 приводов переднего и заднего ведущих мостов.

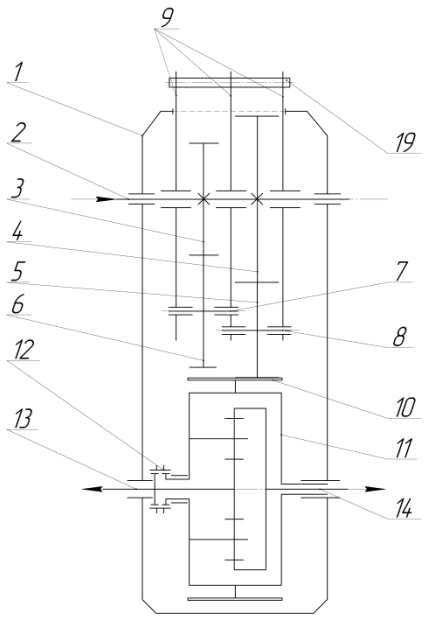


Рис. 1. Кинематическая схема новой РК

Для переключения и фиксации передач в раздаточной коробке предлагается рычажный механизм (рис. 2), который состоит из рычага 15, оси рычага 16, опор оси рычага 17, толкателя 18, канавки 19 толкателя, фиксатора передач 20 с пазами пониженной «А» и повышенной «Б» передачи, шарнира поперечного поворота 21 в длинном плече рычага.

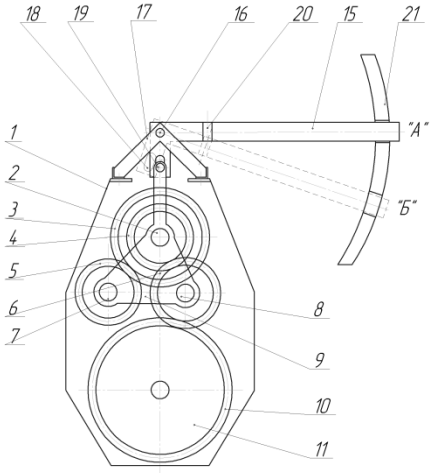


Рис. 2. Схема переключения и фиксации передач в новой РК

Работает раздаточная коробка с механизмом переключения передач следующим образом. При фиксированном положении рычага 15 в пазу «А» фиксатора 20 и блокированном водиле 9 крутящий момент от входного вала 2 и жестко установленную на нем шестерню пониженной передачи 4 передается через промежуточную шестерню 6, ось которой 8 удерживается водилом, на коронную шестерню 10 дифференциала 11 и дальше на валы 13 и 14 приводов переднего и заднего ведущих мостов. Переключение передачи в раздаточной коробке осуществляется за счет поворота длинной части рычага 15 вокруг шарнира поперечного поворота 21, вывода рычага 15 из паза «А» фиксатора 20, перемещения рычага в направлении паза «Б» и фиксации в нем. При этом рычаг 15 вращаясь вокруг установленной в опорах 17 оси 16 через закрепленный в выступе водила 9 толкатель 18 при его движении по канавке 19 поворачивает водило 9 с осями 7 и 8 промежуточных шестерен 5 и 6 вокруг входного вала 2 и, тем самым, размыкает зубчатую пару 6 и 10 и, при дальнейшем повороте водила, включает зубчатую пару 5 и 10. Момент расположения включаемой зубчатой пары на расчетном межосевом расстоянии кинематически согласован с моментом фиксации рычага 15 переключения передач в фиксаторе 20. Блокировка межосевого дифференциала осуществляется осевым перемещением двухпозиционной зубчатой муфтой 12.

Время переключения передач в новой РК является функцией крутящего момента двигателя $M_{дв}$, внешнего управляющего момента $M_в$ на водиле, момента сопротивления движению M_c [3]:

$$t_п = Ф(M_{дв}, M_в, M_c). \quad (1)$$

Переключение передач происходит под действием внешних и внутренних сил и моментов и следующих их комбинаций:

1. Взаимодействие внутренних силовых факторов, возникающих между сопряженными шестернями, нагруженными крутящим моментом двигателя $M_{дв}$ и крутящим моментом от сил сопротивления движению M_c. Различные соотношения указанных моментов способствуют переключению передач в РК в направлении повышенной либо пониженной передачи. Эти факторы подробно рассмотрены в работе [4].

2. Внешние силы, приложенные непосредственно к блоку паразитных шестерен, с помощью которых происходит принудительный ввод или вывод из зацепления шестерен и происходит переключение в нужном направлении.

3. Смешанный тип переключения с использованием как внутренних, так и внешних сил.

На рис. 3 показана схема скоростей при включенной повышенной передаче в РК: 1 – шестерня, принадлежащая первичному валу, 2 – паразитная шестерня, 3 – шестерня выходного вала, соответственно с радиусами r_1, r_2, r_3 и числом зубьев z_1, z_2, z_3. Рассмотрим переключение на пониженную передачу.

В механизме с двумя степенями свободы положение двух любых звеньев определяют положение третьего звена. Поэтому, положение паразитной шестерни, принадлежащей водилу, а следовательно и положение самого водила при его расстопорении, определяется положением первичного и выходного валов. Для переключения на пониженную передачу необходимо, чтобы скорость V_{12} уменьшалась быстрее скорости V_{23} и при этом скорость оси паразитной шестерни V_{Σ}, принадлежащей водилу будет направлена по часовой стрелке относительно оси поворота водила. Крутящий момент $M_{дв}$ в тормозном режиме и момент инерции $I_{дв}$ двигателя приведены к промежуточному валу, момент от сил сопротивления M_c и момент инерции автомобиля I_a приведены к выходному валу РК. Момент двигателя $M_{дв}$ и момент сопротивления M_c считаем постоянными.

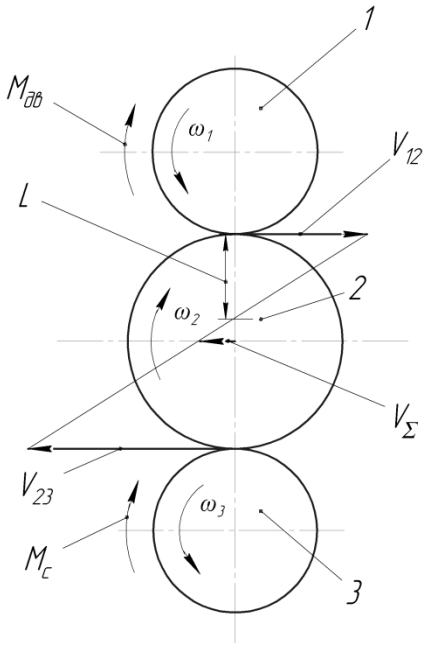


Рис. 3. Схема скоростей при включенной повышенной передаче в РК

При переключении в предлагаемой схеме РК за счет внешних сил внутренние силовые факторы не всегда будут способствовать успешному переключению. Для осуществления переключения крутящий момент на блоке промежуточных шестерен (водиле) $M_{пш}$, согласно уравнению кинематики планетарного механизма [5], должно выполняться неравенство:

$$M_{пш} > M_{вх}(1+b) \quad , \tag{2}$$

где $M_{вх}$ – крутящий момент на входном валу РК; b – передаточное отношение шестерен входного и выходного валов: в нашем случае (рис. 3) b = Z3/Z10 или b = Z4/Z10 в зависимости от передачи. Более подробно кинематические и си-

ловые зависимости описаны в работе [3]. Расчетные значения $M_{пш}$ для автомобиля типа Урал с двигателем КАМАЗ-740 при работе двигателя на режиме реализации максимального крутящего момента (638 Нм) значения от 600 Нм (V передача в КП и повышенная в РК) могут принимать до 7700 Нм (I передача в КП и пониженная в РК). На остановленном автомобиле, либо при разомкнутом сцеплении усилие для переключения передачи обусловлено только инерционностью массам деталей и силами трения. Таким образом, становится ясно что, нецелесообразно производить переключение передач в РК только внешними силами при противодействии значительных внутренних сил, которые обусловлены большими значениями передаваемых моментов. Учитывая условия движения автомобиля (момент от сил сопротивления движению M_c), необходимо так выбирать величину крутящего момента двигателя $M_{дв}$, чтобы сложение сил способствовало переключению передачи в нужном направлении.

Для переключения на пониженную передачу при $M_c>0$ необходим перевод двигателя в тормозной режим $M_{дв}<0$, и выполнение условия $M_{дв} / J_{дв} > M_c / J_a$, т.е. угловое ускорение двигателя должно быть больше углового ускорения маховой массы автомобиля при приведении их к одному валу. Наиболее эффективное торможение двигателем осуществляется путем перевода его на режим принудительного холостого хода, когда педаль подачи топлива полностью отпущена. При этом тормозная мощность, развиваемая двигателем, складывается из мощности механических потерь, мощности насосных потерь, и мощности, затрачиваемой на привод вспомогательных агрегатов двигателя. Зависимость тормозного момента двигателя Камаз 740 $M_{дв}$ от угловой скорости коленчатого вала $\dot{\varphi}_{дв}$ в интервале от 42 до 210 рад/с., аппроксимированная линейной зависимостью, аналитически выглядит следующим образом:

$$M_{дв} = 20 + 0{,}0094(\dot{\varphi}_{дв} - 42). \qquad (3)$$

При угловой скорости коленчатого вала $\dot{\varphi}_{дв}$ ниже 42 рад/с тормозной момент двигателя падает до нуля и дальнейшее торможение возможно только при отключении зажигания, что неприемлемо.

В следствии характеристики тормозного момента двигателя (3), начавшийся процесс переключения передач может быть не завершен: водило, повернувшись на некоторый угол в сторону включения пониженной передачи может начать двигаться в сторону первоначально включенной повышенной передачи. При этом не выполняется $M_{дв} / J_{дв} > M_c / J_a$.

На рис. 5 представлены теоретические зависимости, полученные при помощи математической модели, времени переключения на пониженную передачу t_n от силы сопротивления движению автомобиля P_c при различных $\dot{\varphi}_{дв}$: 1 – 42 рад/с; 2 − 65 рад/с; 3 − 107рад/с; 4 − 160 рад/с; 5 − 210 рад/с. Угловым скоростям ко-

ленчатого вала двигателя при включенной первой передачи в КПП соответствовали скорости движения автомобиля, соответственно 1,23; 1,87; 2,93 и 3,34 м/с. Тормозной момент двигателя моделировался при помощи выражения (3).

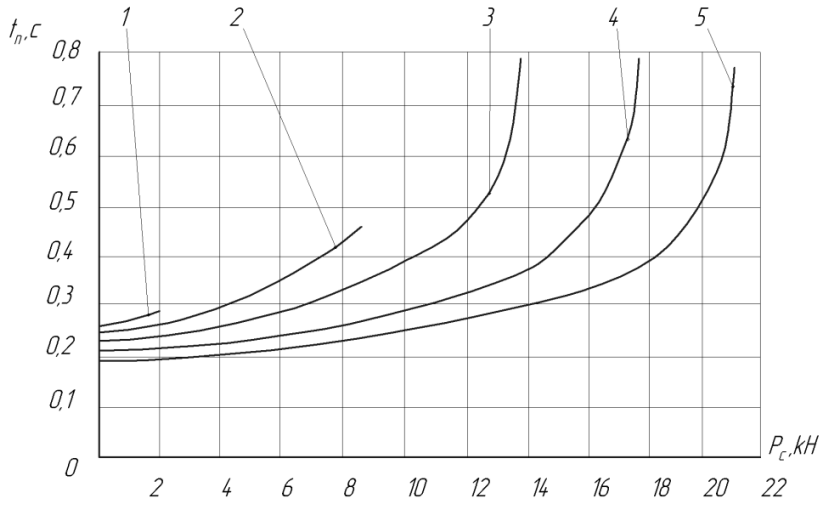


Рис. 4. Зависимость $t_п$ от P_c при переключении на пониженную передачу

Переключение на повышенную передачу. На рис. 5 представлены зависимости времени переключения от комбинации $M_{дв}$ и M_c при переключении на повышенную передачу в РК. При переключении передачи на повышенную при $M_{дв}>0$ и $M_c>0$, что соответствует наиболее распространенному случаю движения, не требуется выполнения каких-либо условий. В таких условиях M_c способствует переключению и сокращению времени процесса переключения передач.

Также распространенным условием при переключении является $M_{дв}>0$ и $M_c<0$, т.е. при движении под уклон, когда внешние силы разгоняют автомобиль. При этом необходимым условием переключения является выполнение $M_{дв} / J_{дв} > M_c / J_a$, т.е. двигатель разгоняется быстрее автомобиля.

При комбинации $M_{дв}<0$ и $M_c<0$ переключение на повышенную передачу невозможно, т.к. водило стремится повернуться в противоположную сторону от нужной передачи.

В правой нижней области рис. 5 не выполняется условие $M_{дв} / J_{дв} < M_c / J_a$, при котором двигатель должен тормозиться медленнее автомобиля, т.е. переключение становится невозможным. Переключение возможно только при комбинациях $M_{дв}$ и M_c, расположенных выше граничной линии, соответствующей равновесному состоянию паразитной шестерни. Назовем ее линией равновесия паразитной шестерни. При приближении к линии равновесия время переключения за счет только внутренних силовых факторов стремится к бесконечности. Для осуществления переключения на линии равновесия целесообразно использовать переключение передач в РК за счет внешней силы, величина и направленность которой будет определять динамику переключения.

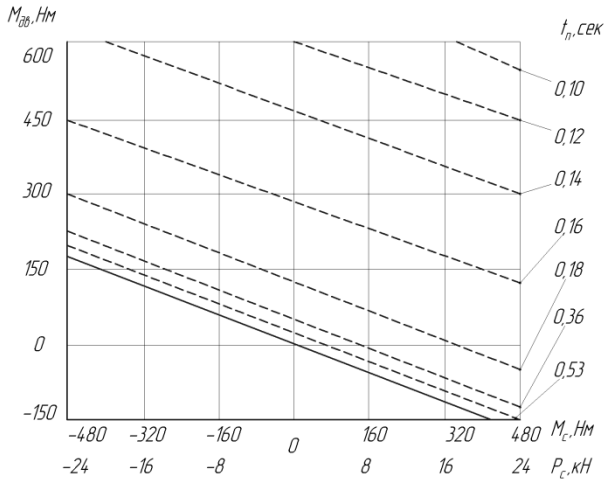


Рис. 5. Время переключения при переключении
на повышенную передачу в РК в зависимости от $M_{дв}$ и M_c (P_c)

Вывод. В исследовании представлена работа новой раздаточной коробки с изменяемым межосевым расстоянием зубчатых зацеплений на режимах переключения передач без выключения сцепления. Установлены кинематические и силовые зависимости в исследуемом способе переключения передач при расстопоренном водиле и силовом переключение на скоростных и нагрузочных режимах, характерных для грузового полноприводного автомобиля.

Библиографический список

1. Трансмиссии тракторов / К.Я. Львовский, Ф.А. Черпак, И.Н. Серебряков, Н.А. Щельцин. – М.: Машиностроение, 1976. – 280 с.

2. Патент РФ № 2011117482 Яковлев П.В., Драгунов Г.Д. «Раздаточная коробка транспортного средства с механизмом переключения передач».

3. Яковлев, П.В. Математической моделирование трансмиссии автомобиля «Урал» с новой раздаточной коробкой / П.В. Яковлев, Г.Д. Драгунов // Транспорт Урала. – 2012. – № 1 (32). – С. 148–151.

4. Яковлев, П.В. Совершенствование параметров и динамических свойств трансмиссий полноприводных автомобилей-тягачей / П.В. Яковлев, Г.Д. Драгунов // Транспорт Урала. – 2011. – № 2 (29). – С. 101–106.

5. Проектирование полноприводных колесных машин: в 2 т. Учеб. для вузов / под общ. ред. А.А. Полунгяна. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 640 с.

К содержанию

УДК 532.135 + 621.822.5

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ СМАЗКИ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

Е.А. Задорожная, В.Г. Караваев

В статье рассмотрены методика и алгоритм расчета задачи смазки сложнонагруженных опор скольжения в неизотермической постановке, а также методика расчета гидромеханических характеристик трибосопряжения с учетом неньютоновских свойств жидкости, процессов теплообмена между смазочным слоем и окружающими его подвижными поверхностями. Приведены результаты расчета шатунного подшипника теплового двигателя.

Ключевые слова: опора скольжения; уравнение энергии; уравнение Рейнольдса; неньютоновские свойства жидкости.

Введение. Проблема повышения надежности и долговечности узлов трения машин и механизмов всегда являлась и остается одной из основных задач современного машиностроения. Развитие технологии и производства, возрастание требований к увеличению мощности тепловых машин, одновременно с ростом требований к долговечности и топливной экономичности, приводит к повышению нагруженности отдельных трибосопряжений (ТС) и всего механизма в целом. В этом плане очень распространенной и актуальной остается проблема разработки методологии, обеспечивающей правильный выбор направлений исследования, методов решения поставленных задач, а также создания методов физического, математического и комбинированного моделирования процессов трения и изнашивания узлов трения.

Современное машиностроение базируется на наукоемких технологиях. В настоящее время уровень развития вычислительных методов и компьютерных технологий позволяет инженерам и исследователям при моделировании и расчете ТС различных машин учитывать целый ряд конструктивных, технологических, режимных и других параметров, влияющих на характеристики узлов трения. Основные из них представлены на рисунке 1. Особое внимание обычно уделяется геометрическим параметрам ТС и виду его нагружения.

Однако, современные смазочные материалы (СМ), используемые в сложнонагруженных узлах трения, загущены различными присадками, что ведет к значительному изменению условий работы подшипников скольжения. В некоторых случаях это приводит к уменьшению толщины смазочной пленки до уровня микрочастиц, находящихся в смазке, или до величины микронеровностей на поверхностях трения.

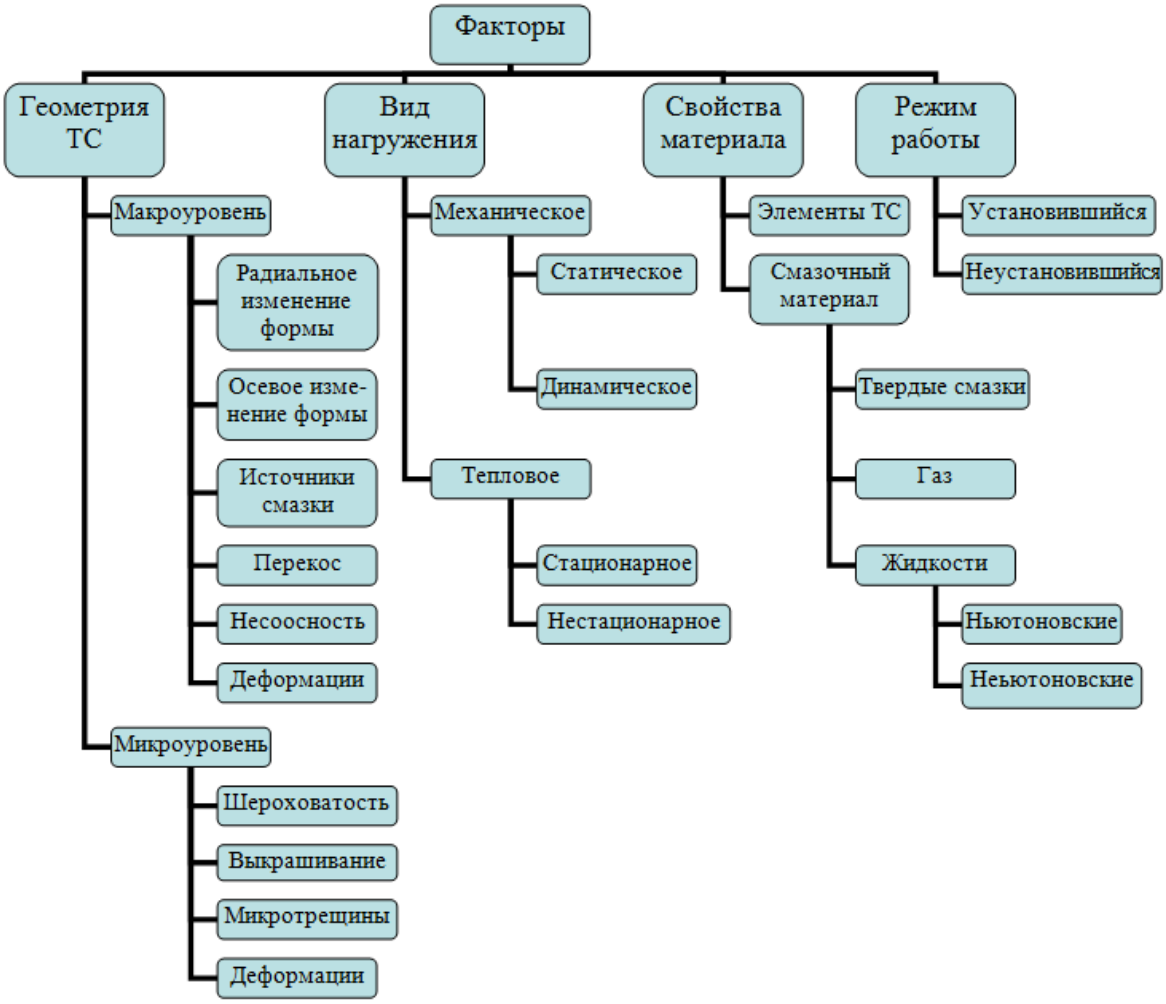


Рис. 1. Факторы, влияющие на гидромеханические характеристики сложнонагруженных трибосопряжений

С другой стороны наличие присадок может способствовать увеличению толщины смазочного слоя и одновременно ведет к повышению затрат мощности на трение в подшипниковом узле. В частности, большое влияние на свойства СМ, в первую очередь на вязкость, оказывают полимерные добавки, твердые частицы порошкообразных присадок или продукты износа, а также микро-пузырьки, присутствующие в масле. Поэтому при исследовании работоспособности основных ТС необходимо учитывать изменение реологических свойств смазочных жидкостей и их влияние на гидромеханические характеристики (ГМХ) сложнонагруженных ТС жидкостного трения.

Наряду с этим, большое значение при исследовании работоспособности трибосопряжений имеют тепловые процессы, происходящие в сложнонагруженном подшипнике жидкостного трения. Обычно их рассматривают на основе решения обобщенного уравнения энергии (теплопереноса) для тонкого

слоя вязкой несжимаемой жидкости между двумя произвольно движущимися поверхностями. Оно учитывает как конвективный перенос теплоты, осуществляемый смазкой, так и перенос теплоты посредством теплопроводности.

Таким образом, целью настоящего исследования является решение задач динамики ТС с учетом распределения температур в смазочном слое, неньютоновских свойств СМ и геометрии поверхностей трения, ограничивающих тонкий смазочный слой.

Методика решения. Для решения поставленной задачи рассматривалась круглоцилиндрическая радиальная опора жидкостного трения, в которой подшипник (втулка, 1) и шип (цапфа, 2) вращаются соответственно вокруг осей O_iZ_i, $i=1,2$, проходящих через их центры O_i с абсолютными угловыми скоростями ω_i. Смазочный слой неньютоновской смазки ограничен поверхностями подшипника и шипа (рис. 2). Здесь $x=r\varphi$, $r\approx r_1\approx r_2$, $r_1=r_1(\varphi,t)$, $r_2=r_2(\varphi,t)$ – радиусы втулки (внутренней поверхности) и цапфы, угловая координата φ (отсчитывается от оси O_1X_1, жестко скрепленной со втулкой); оси Ox, Oz системы координат $Oxyz$, в которой рассматриваются процессы в смазочном слое, лежат в плоскости, на которую развёртывается поверхность отсчёта (поверхность втулки), ось Oy направлена по нормали к ней. На шип в плоскости Oxy в центральном сечении $z=0$ действует переменная по времени t внешняя сила $F(t)$.

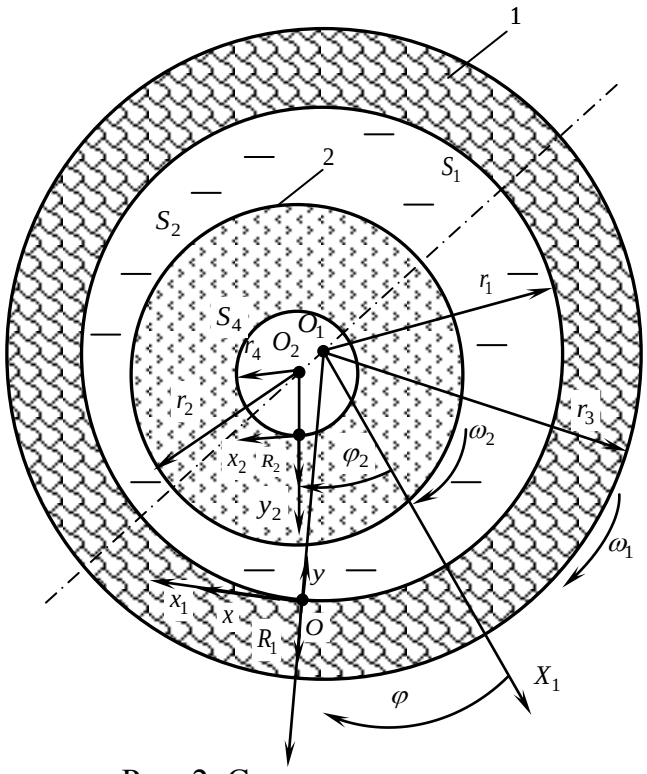


Рис. 2. Системы координат для решения тепловой задачи

Для определения поля гидродинамических давлений в тонком смазочном слое использовано обобщенное уравнение Рейнольдса [1, 2], которое для неньютоновской жидкости записываем в виде:

$$\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\bar{h}^{n+2}\left(\bar{\phi}_2-\frac{\bar{\phi}_1^2}{\bar{\phi}_0}\right)\bar{\rho}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\varphi}\right]+\frac{\partial}{\partial\bar{z}}\left[\bar{h}^{n+2}\left(\bar{\phi}_2-\frac{\bar{\phi}_1^2}{\bar{\phi}_0}\right)\bar{\rho}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{z}}\right]=\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\bar{\omega}_{21}\bar{\rho}\bar{h}\left(1-\frac{\bar{\phi}_1}{\bar{\phi}_0}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial\bar{t}}\left(\bar{\rho}\bar{h}\right). \quad (1)$$

Здесь φ, z – угловая и осевая координаты; $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$ – безразмерная плотность; ρ_0 – плотность ньютоновской жидкости, $\bar{p} = (p - p_a)\psi^2 / \mu_0 \omega_0$, $\psi = h_0 / r_2$, $\bar{z} = z / r_2$, $-a \le \bar{z} \le a$, $\bar{t} = \omega_0 t$ – безразмерные: гидродинамические давления, относительный радиальный зазор, координата по ширине подшипника, время; h_0 – радиальный установочный зазор; $a = B/D$ – относительная ширина подшипника; μ_0 – характерная вязкость смазочного материала; p_a – атмосферное давление; $B, D = 2r_2$, r_2 – соответственно, ширина, диаметр, радиус шипа; $\bar{\omega}_{21} = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_0$ – безразмерная угловая скорость вращения шипа; безразмерная толщина смазочного слоя $\bar{h}$ и её производная $\partial \bar{h} / \partial \bar{t}$, которые определяются формулами:

$$\bar{h} = 1 - \chi \cos(\varphi - \delta), \quad \partial \bar{h} / \partial \bar{t} = -\dot{\chi} \cos(\varphi - \delta) - \chi \dot{\delta} \cos(\varphi - \delta),$$

где χ – относительный эксцентриситет; δ – угол относительного положения линии центров.

$$\bar{\phi}_k = \int_0^{\bar{h}} \bar{y}^k / \bar{\mu}^* \, d\bar{y}, \; k = 0;1;2.$$

Здесь $\bar{\mu}^*$ – безразмерная неньютоновская вязкость СМ, являющаяся функцией скорости сдвига, температуры и давления; $\bar{y}$ – безразмерная координата поперёк смазочного слоя.

Уравнение (1) интегрировали многосеточным методом при граничных условиях Свифта-Штибера с учётом наличия на поверхностях трения источников смазывания (отверстий, канавок) [3]:

$$\bar{p}(\varphi, \bar{z} = \pm a) = 0; \; \bar{p}(\varphi, \bar{z}) = \bar{p}(\varphi + 2\pi, \bar{z}); \; \bar{p}(\varphi, \bar{z}) \ge 0, \text{ на } (\varphi, \bar{z}) \in \Omega_s \;\; \bar{p}(\varphi, \bar{z}) = \bar{p}_s, \; S = 1,2 \ldots S^*.$$

Здесь Ω_s – область источника смазки, в которой давление постоянно и равно давлению подачи $\bar{p}_s$, S^* – количество источников смазывания. Зависимость вязкости СМ от скорости сдвига и давления представляли в виде [4]:

$$\bar{\mu}^* = \begin{cases} \bar{\mu}_1 \cdot \exp(\beta \cdot \bar{p}), & I_2 < 10^4, c^{-1}; \\ \bar{\mu} \cdot I_2^{(n-1)/2} \cdot \exp(\beta \cdot \bar{p}), & 10^4 < I_2 < 10^6, c^{-1}; \\ \bar{\mu}_2 \cdot \exp(\beta \cdot \bar{p}), & I_2 > 10^6, c^{-1}. \end{cases} \qquad (2)$$

Здесь n – параметр, характеризующий степень неньютоновского поведения; β – пьезокоэффициент вязкости смазки, являющий функцией температуры.

Согласно модели (2) на участке 1 ($I_2 < 10^4, c^{-1}$) масло ведёт себя как ньютоновская жидкость с вязкостью $\mu_1(T_э, p)$. Для участка 2 ($10^4 < I_2 < 10^6, c^{-1}$) характерно снижение вязкости по степенному закону. На участке 3 ($I_2 > 10^6, c^{-1}$) масло считается ньютоновской жидкостью с вязкостью $\mu_2(T_э, p)$.

В безразмерном виде равенства для скоростей элементарного объема смазки и их производных представим в форме:

$$\bar{V}_x = \frac{\bar{\phi}_{0y}}{\bar{\phi}_0}\bar{\omega}_{21} + \left(\bar{\phi}_{1y} - \frac{\bar{\phi}_1}{\bar{\phi}_0}\bar{\phi}_{0y}\right)\bar{h}^{n+1}\cdot\frac{\partial\bar{p}}{\partial\varphi},\ \bar{V}_z = \left(\bar{\phi}_{1y} - \frac{\bar{\phi}_1}{\bar{\phi}_0}\bar{\phi}_{0y}\right)\bar{h}^{n+1}\cdot\frac{1}{a}\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{z}},$$

$$\bar{V}_y = \bar{h}\,\psi\left[\frac{1}{\bar{h}}\frac{\partial\bar{h}}{\partial\varphi}\left(\bar{V}_x\bar{y} - \bar{q}_{xy}\right) - \frac{\partial\bar{q}_{xy}}{\partial\varphi} - \frac{1}{a}\frac{\partial\bar{q}_{zy}}{\partial\varphi}\right];\ \bar{\phi}_{ky} = \int_{\bar{h}_1}^{\bar{y}}\frac{\bar{y}^k d\bar{y}}{\bar{\mu}^*},\quad k = 0{,}1{,}2 \tag{3}$$

$$\frac{\partial\bar{V}_x}{\partial\bar{y}} = \frac{1}{\bar{\mu}^*}\cdot\left[\frac{\bar{\omega}_{21}}{\bar{\phi}_0} + \bar{h}^{n+1}\left(\bar{y} - \frac{\bar{\phi}_1}{\bar{\phi}_0}\right)\frac{\partial\bar{p}}{\partial\varphi}\right];\quad \frac{\partial\bar{V}_z}{\partial\bar{y}} = \frac{1}{\bar{\mu}^*}\cdot\bar{h}^{n+1}\left(\bar{y} - \frac{\bar{\phi}_1}{\bar{\phi}_0}\right)\frac{\partial\bar{p}}{\partial\bar{z}}.$$

Объёмные расходы смазки через сечения единичной протяженности в направлении координат x и z записывали в виде:

$$\bar{q}_{xy} = \int_0^{\bar{y}}\bar{V}_x d\bar{y};\ \bar{q}_{zy} = \int_0^{\bar{y}}\bar{V}_z d\bar{y}.$$

Обобщенное уравнение энергии (теплопереноса) для смазочного слоя вязкой несжимаемой жидкости с учетом малого влияния теплопроводности в направлении координат x, z записывается в виде [5]:

$$\rho c_0\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_0\left(V_x\frac{\partial T}{\partial x} + V_y\frac{\partial T}{\partial y} + V_z\frac{\partial T}{\partial z}\right) - \lambda_0\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = Д, \tag{4}$$

где ρ, c_0, λ_0 – плотность, удельные теплоемкость и теплопроводность смазки (принимаются постоянными); V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скорости элементарного объема смазки; $Д = \mu^*\left[\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial y}\right)^2\right]$ – диссипативная функция.

Введем следующие обозначения $\bar{T} = T/T_0$ – безразмерная температура в произвольной точке смазочного слоя, T_0 – характерная температура; $\bar{y} = y/h$; $\bar{h} = h/h_0^*$; $\psi = h_0^*/r$, $\bar{V}_x = V_x/\omega_0 r$, $\bar{V}_y = V_y/\omega_0 r$, $\bar{V}_z = V_z/\omega_0 r$, $\bar{\mu} = \mu/\mu_0$, где h_0^* – характерная толщина смазочного слоя при центральном положении цапфы; $Pe = \rho_0\bar{\rho}c_0\omega_0\Delta_0^2/\lambda_0$ – число Пекле; $k_T = \rho_0\bar{\rho}c_0T_0\psi^2/(\omega_0\mu_0)$. В этом случае уравнение энергии для смазочного слоя радиального подшипника с неньютоновской смазкой в безразмерной форме запишем в виде:

$$\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{t}} = -\bar{V}_x\frac{\partial\bar{T}}{\partial\varphi} - \bar{D}\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{y}} - \bar{V}_z\frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{z}} + \frac{1}{Pe}\cdot\frac{1}{\bar{h}^2}\cdot\frac{\partial^2\bar{T}}{\partial\bar{y}^2} + \frac{1}{k_T}\cdot\frac{1}{\bar{h}^{n+1}}\bar{Д}. \tag{5}$$

Здесь

$$\bar{D} = -\frac{1}{\bar{h}}\left[\bar{y}\frac{\partial\bar{h}}{\partial\bar{t}} + \frac{\partial(\bar{h}\bar{q}_{xy})}{\partial\varphi} + \bar{h}\frac{\partial\bar{q}_{zy}}{\partial\bar{z}}\right]. \tag{6}$$

Дифференциальное уравнение (5) линейно относительно производных. Коэффициенты перед конвективными членами представляют собой функции от переменных $\varphi, \bar{y}, \bar{z}, \bar{t}$. Оно является параболическим по времени и поэтому для него ставится задача с начальными и граничными условиями.

Распределение температур $\overline{T}_1(\varphi_1, R_2, \bar{t})$ во втулке, где R_2 радиальная координата (рис. 1), определяем решением уравнения для неустановившегося теплового потока, которое в цилиндрических координатах и безразмерных переменных записываем в виде:

$$\frac{\partial \overline{T}_1}{\partial \bar{t}} = \overline{\alpha}_1 \left(\frac{\partial^2 \overline{T}_1}{\partial \overline{R}_1^2} + \frac{1}{\overline{R}_1} \frac{\partial \overline{T}_1}{\partial \overline{R}_1} + \frac{1}{\overline{R}_1^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_1}{\partial \varphi_1^2} \right). \quad (7)$$

Здесь $\overline{R}_1 = R_1 / r$; $\overline{T}_1 = T_1 / T_0$; $\overline{\alpha}_1 = \lambda_1 / \left(c_1 \rho_1 r^2 \omega_0 \right)$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи от втулки в окружающую среду, $r_1 \approx r_2 \approx r$; ρ_1, c_1, λ_1 – плотность, удельная теплоемкость, удельная теплопроводность материала втулки.

Введем расчетную систему координат $Ox_1y_1z_1$ и безразмерные переменные $\bar{y}_1 = (R_1 - r_1)/(r_3 - r_1) = (\overline{R}_1 - 1)/(\bar{r}_3 - 1)$, $\bar{r}_3 = r_3 / r$, где r_1, r_3 – расчетные радиусы внутренней и наружной поверхностей втулки.

В этом случае записываем уравнение (7) в виде:

$$\frac{\partial \overline{T}_1}{d\bar{t}} = \overline{\alpha}_1 \left(\frac{1}{(\bar{r}_3 - 1)^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_1}{\partial \bar{y}_1^2} + \frac{1}{\left[1 + (\bar{r}_3 - 1)\bar{y}_1\right](\bar{r}_3 - 1)} \frac{\partial \overline{T}_1}{\partial \bar{y}_1} + \frac{1}{\left[1 + (\bar{r}_3 - 1)\bar{y}_1\right]^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_1}{\partial \varphi^2} \right). \quad (8)$$

Аналогичным образом распределение температур $\overline{T}_2(\varphi_2, R_2, \bar{t})$ в шипе определяем решением уравнения для неустановившегося теплового потока, которое в цилиндрических координатах и безразмерных переменных записываем в виде:

$$\frac{\partial \overline{T}_2}{\partial \bar{t}} = \overline{\alpha}_2 \left(\frac{\partial^2 \overline{T}_2}{\partial \overline{R}_2^2} + \frac{1}{\overline{R}_2} \frac{\partial \overline{T}_2}{\partial \overline{R}_2} + \frac{1}{\overline{R}_2^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_2}{\partial \varphi_2^2} \right). \quad (9)$$

Здесь $\overline{R}_2 = R_2 / r$; $\overline{T}_2 = T_2 / T_0$; $\overline{\alpha}_2 = \lambda_2 / \left(c_2 \rho_2 r^2 \omega_0 \right)$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи от шипа в окружающую среду, ρ_2, c_2, λ_2 – плотность, удельная теплоемкость, удельная теплопроводность материала шипа.

В расчетной системе координат $Ox_2y_2z_2$ введем безразмерные переменные $\bar{y}_2 = (R_2 - r_4)/(r_2 - r_4) = (\overline{R}_2 - \bar{r}_4)/(1 - \bar{r}_4)$, $\bar{r}_4 = r_4 / r$, где r_4 – радиус внутренней поверхностей втулки.

Следовательно, уравнение (9) можно переписать следующим образом:

$$\frac{\partial \overline{T}_2}{d\bar{t}} = \overline{\alpha}_2 \left(\frac{1}{(1 - \bar{r}_4)^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_2}{\partial \bar{y}_2^2} + \frac{1}{\left[\bar{r}_4 + (1 - \bar{r}_4)\bar{y}_2\right](1 - \bar{r}_4)} \frac{\partial \overline{T}_2}{\partial \bar{y}_2} + \frac{1}{\left[\bar{r}_4 + (1 - \bar{r}_4)\bar{y}_2\right]^2} \frac{\partial^2 \overline{T}_2}{\partial \varphi^2} \right). \quad (10)$$

Граничные условия, при которых интегрировали уравнения (5), (8) и (10)

тепловой подзадачи, сформулированы следующим образом.

Для температуры СМ и втулки справедливы условия периодичности в окружном направлении:

$$\overline{T}(\varphi,\bar{y},\bar{t})=\overline{T}(\varphi+2\pi,\bar{y},\bar{t});\ \ \overline{T}_1(\varphi,\overline{R}_1,\bar{t})=\overline{T}_1(\varphi+2\pi,\overline{R}_1,\bar{t}).$$

На наружной поверхности втулки считалась справедливой гипотеза свободной конвекции:

$$\frac{\partial\overline{T}_1}{\partial\overline{R}}\bigg|_{\overline{R}=\overline{r}_3}=\frac{\alpha_1 r}{\lambda_1}\left(\overline{T}_1\big|_{\overline{R}=\overline{r}_3}-\overline{T}_c\right).$$

На поверхности, общей для СМ и втулки, приняты условия непрерывности потока тепла (условия сопряжения):

$$\frac{\partial\overline{T}_1}{\partial\overline{y}_1}\bigg|_{\bar{y}_1=0}=-(\bar{r}_3-1)\frac{\lambda_0}{\lambda_1\bar{h}\psi}\frac{\partial\overline{T}_1}{\partial\bar{y}}\bigg|_{\bar{y}=0}.$$

На поверхностях СМ, общих с поверхностями втулки и шипа, ставятся условия равенства температур:

$$\overline{T}(\varphi,\bar{y}=0,\bar{t})=\overline{T}_1(\varphi,\bar{y}_1=0,\bar{t}-\bar{t}_ц);\ \overline{T}(\varphi,\bar{y}=1,\bar{t})=\overline{T}_2(\bar{t}-\bar{t}_ц).$$

Система уравнений (5), (8) и (10) распределения температур в СМ, втулке и шипе записывали уравнением в операторном виде, для построения разностных аналогов которого применим неявный метод переменных направлений Писмена-Рекфорда [6]. Опыт многих исследователей показал, что неявные схемы этого метода допускают большие по величине размеры шагов по времени, ускоряют расчет в целом. Дуглас [7] успешно реализовал трехшаговую схему при интегрировании такого вида уравнения и показал, что такая схема при втором порядке точности $O(\Delta_t^2,\Delta_x^2,\Delta_y^2,\Delta_z^2)$ безусловно устойчива.

Результаты расчета. Первые результаты были получены на примере расчета динамики шатунного подшипника двигателя внутреннего сгорания типа ЧН 13/15, производства ОАО «ЧТЗ-Уралтрак». В качестве исходных данных были использованы также индикаторные диаграммы для режима максимальной мощности (ω=2100 об./мин) и вязкостно-температурная характеристика основного моторного масла М-10ДМ ($\mu_{40}=0{,}0762$ Па·с; $\mu_{100}=0{,}0103$ Па·с). Граничные условия по температуре задавали из условия, что температура СМ в центральном отверстии шипа известна, равна температуре подачи и не меняется в процессе нагружения $\overline{T}_4=T_{вх}/T_0\approx 0{,}9$. Значение температуры на внешнем радиусе втулки приравнивали температуре в картере двигателя $\overline{T}_3=T_{кар}/T_0\approx 0{,}8$.

В процессе расчета в любой момент времени получали трехмерное распределение температуры в СМ. На рис. 3 приведено распределение температуры по координате φ для трех произвольно выбранных значений угла пово-

рота коленчатого вала. Распределение температуры по координате $\bar{y}$ изображено на рисунке 4, где для каждого элемента системы «шип – смазочный слой – втулка» было задано по 20 элементов сетки.

Решение базировалось на конечно-разностной аппроксимации. Перекос шипа не учитывался. При решении уравнения для гидродинамических давлений учитывалась зависимость вязкости смазки от второго инварианта скоростей сдвига и полученного распределения температур. Максимальная температура в слое смазки достигается в области наибольших гидродинамических давлений.

Представленная работа выполнена при поддержке РФФИ (проект НК-13-08-00875\13).

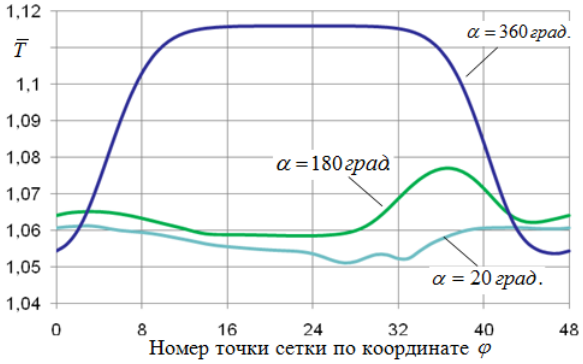


Рис. 3. Распределение температуры по координате φ

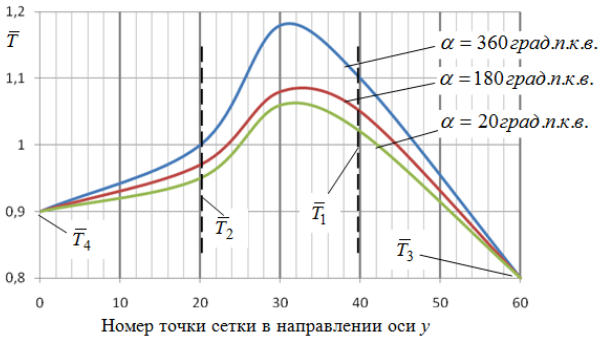


Рис. 4. Распределение температуры по координате $\bar{y}$

Библиографический список

1. Прокопьев, В.Н. Термогидродинамическая задача смазки сложнонагруженных опор скольжения неньютоновскими жидкостями / В.Н. Прокопьев, В.Г. Караваев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2003. – № 1(17). – С. 55–66.

2. Рождественский, Ю.В. Решение задач оптимизации трибосопряжений поршневых и роторных машин с использованием алгоритма сохранения массы / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, А.А. Дойкин, М.А. Макарихин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. – № 8. – С. 38–43.

3. Прокопьев, В.Н. Многосеточные алгоритмы интегрирования уравнения Рейнольдса в задачах динамики сложнонагруженных подшипников скольжения / В.Н. Прокопьев, А.К. Бояршинова, Е.А. Задорожная // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2005. – № 5. – С. 16–21.

4. Леванов, И.Г. Методика расчета гидромеханических характеристик сложнонагруженных подшипников скольжения поршневых и роторных машин, смазываемых неньютоновскими маслами / И.Г. Леванов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 31 (258). – С. 34–43.

5. Маленко, П.И. Температурные поля и эксплуатационные свойства пар трения скольжения со смазочным материалом / П.И. Маленко, В.К. Зеленко, Д.М. Левин; под ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: Машиностроение, 2011. – 239 с.

6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 618 с.

7. Douglas, J. On the numerical solution of heat conduction problems in two and three space variables / J. Douglas, H. H. Rachford // Trans. Amer. Math. Soc. 82 (1956), pp. 421–439.

К содержанию

УДК 621.436.004:621.89 + 621.89

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРЫ ТРЕНИЯ «АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ – ЛЕГИРОВАННЫЙ ЧУГУН»

К.В. Гаврилов, А.А. Дойкин

Рассмотрены различные режимы нагружения трибосопряжения «алюминиевый сплав – легированный чугун», являющегося аналогом трибосистемы «поршень–цилиндр» дизеля. Экспериментальная оценка параметров трения и изнашивания проводилась на трибометре, позволяющем моделировать возвратно-поступательное движение образцов, изготовленных из направляющей поршня и гильзы цилиндра дизеля. На основании экспериментально полученной зависимости линейной интегральной интенсивности изнашивания от параметров нагружения выполнена оценка ресурса трибосистемы «поршень–цилиндр» дизеля.

Ключевые слова: трибосистема «поршен–-цилиндр»; интенсивность изнашивания; ресурс.

Решение проблемы повышения энергоэффективности и надежности ДВС неразрывно связано с совершенствованием конструкции их трибосопряжений.

Безотказность и долговечность двигателей в значительной мере определяются надежностью их основных трибосопряжений (ТС) с жидкостным режимом трения: поршень–цилиндр, коренные и шатунные подшипники коленчатого вала, подшипники ротора турбокомпрессора. Механический к.п.д. у большинства серийно выпускаемых отечественных ДВС автотракторного типа (без наддува) редко превышает значение 0,75 на номинальном режиме

работы, т.е. до 25 % располагаемой мощности этих двигателей теряется безвозвратно на преодоление трения. Общеизвестно, что в доле этих потерь от 40 до 60 % приходятся на механические потери в трибосопряжении «поршень–цилиндр».

Одним из направлений снижения потерь в ТС «поршень–цилиндр» является профилирование юбки поршня. Для этих сопряжений долгое время использовались математические модели на основе теории удара и колебаний системы «поршень–цилиндр» не рассматривающие наличие смазки в зазоре [1, 2]. На основании такого подхода, а также результатов экспериментальных исследований, были предложены некоторые принципы профилирования юбки поршня [3].

Современное состояние вопроса характеризуется уточнением методик расчета динамики системы «поршень – смазочный слой – цилиндр» включением в расчетную модель важнейших конструктивных и эксплуатационных факторов и разработкой на этой базе новых типов профилей поршней с минимальными трибологическими потерями [4–6].

Целью работы является расчетно-экспериментальная оценка триботехнических параметров сопряжения «алюминиевый сплав – легированный чугун», являющегося аналогом трибосистемы «поршень–цилиндр» дизеля и прогнозирование на этой основе его ресурса.

Рис. 1. Результат контактного взаимодействия юбки поршня и гильзы цилиндра дизеля ЧН13/15

К основным гидромеханическим характеристикам (ГМХ) трибосопряжения «поршень–цилиндр» принято относить: мгновенные значения минимальной толщины смазочного слоя $h_{\min}(\tau)$ и максимального гидродинамического давления $p_{\max}(\tau)$, а также их средние $h^*_{\min}$, $p^*_{\max}$ за цикл $\tau_{\text{ц}}$ величины; мгновенные и средние потери мощности на трение $N(\tau)$, N^*; средний расход смазки в направлении камеры сгорания Q^* и среднюю за цикл эффективную (расчетную) температуру смазочного слоя T^*_E.

Контактное взаимодействие элементов трибосопряжения происходит на площадках фактического контактирования, что экспериментально подтверждается образованием «натиров» на юбке поршня дизельного двигателя после определенной наработки (рис. 1). Поэтому расчетные характеристики трибосистемы дополняются относительными значениями суммарных за цикл нагружения величин протяженности областей $\alpha_{h_{\text{доп}}}$, %, где значения

$h_{\min}$ меньше допустимых значений толщины смазочного слоя $h_{\text{доп}}$ (продолжительность контактного взаимодействия).

Реакции смазочного слоя определялись на основе результатов численного интегрирования уравнения Рейнольдса для давлений [5].

При расчете траектории движения поршня на смазочном слое в пространстве зазора цилиндра двигателя внутреннего сгорания систему координат закрепляли на неподвижном цилиндре, начало подвижной системы координат находилось в центре масс движущегося поршня. С учетом допущений работы [5] при анализе перемещений поршня в цилиндре принималось, что перемещение поршня происходит в плоскости, перпендикулярной оси поршневого пальца и поршень совершает плоскопараллельное движение.

При расчете траектории движения поршня в цилиндре использовался метод, базирующийся на формулах дифференцирования назад (метод ФДН), подробности которого изложены в работе [7].

Расчет ГМХ сопряжения выполнен на примере дизеля типа ЧН 13/15. В качестве исходных данных использовалась индикаторная диаграмма режима максимальной мощности ($\omega_0 = 220c^{-1}$), а также вязкостно-температурная характеристика моторного масла класса SAE 5W-50.

Результаты расчетов, соответствующие режиму номинальной мощности, представлены в табл. 1, из которой видно, что минимальная за цикл толщина смазочного слоя $\inf h_{\min}$ меньше допустимой величины $h_{\text{доп}}$, и протяженность зоны контактирования составляет 12,5 % рабочего цикла, что соответствует 90° поворота коленчатого вала.

Таблица 1

ГМХ трибосопряжения «поршень–цилиндр» дизеля ЧН 13/15

N^*, Вт	Q^*, л/с	$h^*_{\min}$, мкм	$p^*_{\max}$, МПа	$\inf h_{\min}$, мкм	$\sup p_{\max}$, МПа	$\alpha_{h_{\text{доп}}}$,%
252,0	0,067	55,7	2,7	8,6	16,0	12,5

Таким образом, на основании результатов расчета рассматриваемого сопряжения представляется актуальной оценка интенсивности его изнашивания и определения ресурса. Для достижения этой цели были проведены экспериментальные исследования процесса изнашивания материалов исследуемого сопряжения.

Экспериментальное изучение коэффициента трения и интенсивности изнашивания исследуемых материалов проводилось на трибометре UMT-3MT, представляющем собой лабораторный прибор для изучения фрикционных свойств различных материалов. Прибор позволяет реализовать схему кон-

тактного взаимодействия пальчик–пластина. Пальчик, изготовленный из поршня, является неподвижным образцом, а пластина, изготовленная из гильзы цилиндра, совершает возвратно-поступательное движение относительно прижатого к ней пальчика. Показателями процесса фрикционного взаимодействия в измерительной системе прибора являются непрерывная запись нормальной силы, сближения изнашиваемых тел, силы трения, пути трения и коэффициента трения.

Образец-пальчик был изготовлен из юбки поршня (алюминиевый сплав АК-4), а контробразец-пластина изготовлена из гильзы цилиндра (легированный чугун). В качестве смазки использовалось рекомендуемое для дизельных двигателей моторное масло марки SAE 5W-50.

Основными внешними характеристиками, влияющими на скорость изнашивания сопряжения, являются контактное давление p_{cont} и линейная скорость перемещения *V*. Значения p_{cont} и *V* на трибометре соотносились с предварительно рассчитанными значениями боковой силы *F* и скоростью движения поршня в сопряжении в зависимости от угла поворота коленчатого вала дизеля.

Для приближения условий испытания исследуемых материалов к эксплуатационным, эксперименты проводились при постоянной температуре 110 °С. В процессе проведения эксперимента непрерывно записывались фиксируемые значения коэффициента трения, силы трения, акустической эмиссии, температуры, а также электрическое сопротивление в сопряжении, косвенно свидетельствующее о толщине масляной пленки между поверхностями.

Линейная интегральная интенсивность изнашивания образца материала поршня рассчитывалась по формуле:

$$I_h = \Delta m/(\rho_{\mathrm{Al}} A_a L), \quad (1)$$

где Δm – изменение массы пальчика в результате износа; ρ_{Al} – плотность алюминиевого сплава; A_a – номинальная площадь контакта; L – путь трения.

На рис. 2 точками указаны экспериментальные значения интенсивности изнашивания, полученные в соответствии с выражением (1), на основании которых построена аппроксимирующая локальная зависимость интенсивности изнашивания I_h от контактного давления p_{cont} для сопряжения «поршень–цилиндр»:

$$I_h = 2{,}7 \cdot 10^{-9} \, p_{cont}^{1,5}. \quad (2)$$

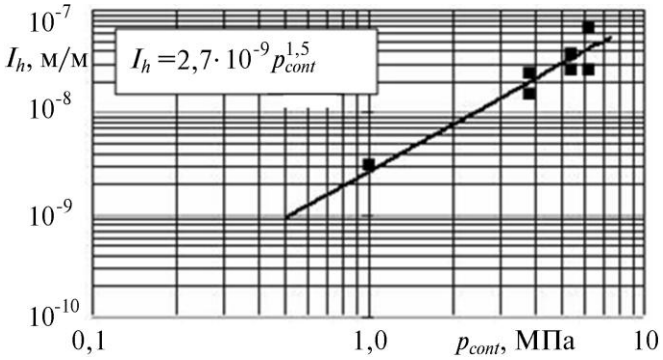


Рис. 2. Зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления

Полученная зависимость использовалась в дальнейшем для оценки интенсивности изнашивания и ресурса сопряжения дизеля ЧН 13/15.

В трибосистеме «поршень–цилиндр» имеет место гидродинамическое и при высоких уровнях нагружения граничное трение, причем последний вид контактного взаимодействия поверхностей трения является определяющим при оценке ресурса сопряжения в целом.

Продолжительность периода граничного трения оценивалась временем существования критической толщины масляного слоя, определяемым по результатам расчетного анализа условий гидродинамического режима трения в течение рабочего цикла дизеля.

С учетом рекомендаций работы [8] рассматриваемый вид контактирования для исследуемых объектов классифицировался как пластический.

Время изнашивания контактного слоя определенной толщины оценивалось на основании экспериментально полученной зависимости интенсивности изнашивания:

$$t_{izn} = h_{izn} / (I_h V), \quad (3)$$

где h_{izn} – предельный износ сопряжения, определяемый на основании расчета ГМХ.

Результаты расчета основных параметров контактирования юбки поршня и гильзы цилиндра при различных режимах нагружения дизеля представлены в табл. 2.

При оценке среднего моторесурса сопряжения учитывалось распределение нагрузки дизеля в реальных условиях работы инженерной машины. Согласно исследованиям [9] дизель бульдозера работает примерно 10 % на холостом ходу, по 28 % составляют режимы малых и средних нагрузок, соответственно, и 34 % составляет режим номинальной мощности.

Время изнашивания сопряжения в условиях гидродинамического трения, возникновение граничного режима трения определялось на основании ре-

зультатов расчета минимальной толщины смазочного слоя и продолжительности контактного взаимодействия поверхностей сопряжения, характеризуемой параметром $\alpha_{h_{\text{доп}}}$, на различных режимах.

Таблица 2

Параметры нагруженности и изнашивания направляющей части поршня

Параметр	Нагрузка дизеля, %			
	0	10	50	100
Доля времени работы с нагрузкой, %	10	28	28	34
Частота вращения коленчатого вала, $с^{-1}$	220	220	220	220
Боковая сила в сопряжении, кН	10,6	10,8	12,3	15,0
Номинальное давление, МПа	0,6	0,6	0,7	0,9
Доля контактного взаимодействия, %	0,5	1,3	4,1	12,5
Интенсивность изнашивания, м/м	$1{,}3\cdot10^{-9}$	$1{,}3\cdot10^{-9}$	$1{,}6\cdot10^{-9}$	$2{,}2\cdot10^{-9}$
Предельный износ сопряжения, мкм	6,4			
Время работы до предельного износа, ч	417,3	462,0	376,5	277,2
Моторесурс сопряжения, м·ч	83460	35538	9182	2218
Средний моторесурс сопряжения, м·ч	21622			

С увеличением нагрузки дизеля при постоянной частоте вращения коленчатого вала наблюдается увеличение боковой силы в сопряжении в 1,4 раза и возрастает доля времени контактного взаимодействия элементов сопряжения. Как следствие наблюдается повышение интенсивности изнашивания элементов сопряжения в 1,7 раза и снижение моторесурса сопряжения. Учет распределения нагрузки дизеля в условиях работы тракторного агрегата позволяет прогнозировать средний моторесурс сопряжения, который по данным расчетной оценки составил 21622 моточасов.

Таким образом, на основе расчетно-экспериментальных исследований:

– выполнена оценка продолжительности контактного взаимодействия поверхностей трения сопряжения форсированного дизеля ЧН 13/15;

– получена зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления в исследуемой паре трения;

– выполнена оценка ресурса трибосистемы «поршень–цилиндр» дизеля с учетом режима его работы в составе инженерной машины.

Библиографический список

1. Григорьев, Е.А. Теоретическое исследование колебательной системы поршень-цилиндр / Е.А. Григорьев, М.Д. Аллабергенов // Двигателестроение. – 1985. – № 10. – С. 13–17.

2. Никишин, В.Н. Основы теории соударения и исследование колебаний пары поршень-гильза автомобильного двигателя: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Никишин. – М., 1978.

3. Гинцбург, Б.Я. Профилирование юбок поршней / Б.Я. Гинцбург. – М.: Машиностроение, 1973.

4. Рождественский, Ю.В. Влияние вязкостно-температурных свойств моторных масел на гидромеханические характеристики трибосопряжения поршень-цилиндр / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, И.В. Мухортов, А.А. Дойкин // Двигателестроение. - 2010. - № 2. - С. 23–26.

5. Рождественский, Ю.В. Решение задачи оптимизации трибосопряжений поршневых и роторных машин с использованием алгоритма сохранения массы / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, А.А. Дойкин // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2011. - № 8. – С. 38–43.

6. Путинцев, С.В. Программа PISTON-DHT для расчета параметров динамики, гидродинамики и трибологии поршня ДВС / С.В. Путинцев, С.А. Аникин, О.В. Иванов // Сборник трудов по материалам Муждународной конференции Двигатель-2007 / Под редакцией Н.А. Иващенко, В.Н. Костюкова, А.П. Науменко, Л.В. Грекова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – С. 235–241.

7. Прокопьев, В.Н. Повышение эффективности алгоритмов расчета выходных параметров сложнонагруженных опор скольжения двигателей транспортных машин / В.Н. Прокопьев, Ю.В. Рождественский, Н.В. Широбоков // Вестник Уральского межрегионального отделения Российской академии транспорта. – 1999. – № 2. – С. 28–32.

8. Крагельский, И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2 кн. Кн. 1 / И.В. Крагельский, В.В. Алисин. – М.: Машиностроение, 1978.

9. Кавьяров, И.С. Резервы повышения производительности промышленных тракторных агрегатов / И.С. Кавьяров, В.В. Князькин, Б.Л. Магарилло // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1973. – № 7. – С. 6–8.

К содержанию

УДК 621.436.038

ОЦЕНКА УРОВНЯ НАГРУЖЕНИЯ НАПРАВЛЯЮЩЕГО ПРЕЦИЗИОННОГО СОПРЯЖЕНИЯ РАСПЫЛИТЕЛЯ ТОПЛИВНОЙ ФОРСУНКИ ДИЗЕЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Е. Лазарев, Г.В. Ломакин, Е.А. Лазарев

Применительно к различным моделям поточной динамики (CFD) выполнен анализ движения потока топлива в гидравлическом тракте цилиндрического направляющего прецизионного сопряжения распылителя топливной форсунки дизеля. Моделированием получено распределение давлений и скоростей потока топлива в сопряжении, определены значения радиальной силы и рассмотрены вопросы повышения ресурса направляющего прецизионного сопряжения при высоких (до 120 МПа) давлениях впрыска топлива.

Ключевые слова: распылитель топливной форсунки дизеля, направляющее прецизионное сопряжение, давление впрыска топлива, гидродинамические параметры сопряжения.

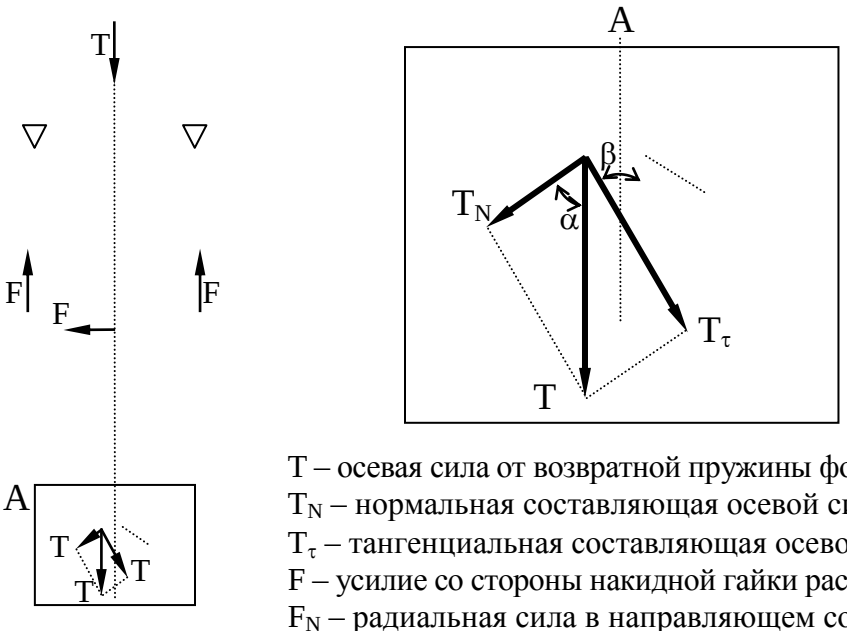
Введение

Одним из основных требований, предъявляемых к современным энергетическим установкам и, в частности, к транспортным дизелям, является повышение их энергетической эффективности. Указанное требование предусматривает неуклонное повышение технического уровня серийно выпускаемых двигателей, которое, помимо увеличения удельной мощности, включает в себя улучшение экономических и экологических показателей, а также повышение надежности и ресурса двигателей.

К числу наиболее перспективных способов реализации, предъявляемых к современным дизелям требований относят повышение давления подачи топлива, причем абсолютные значения используемых давлений настолько высоки (до 250…300 МПа), что данное обстоятельство заставляет пересматривать используемые технические решения с точки зрения их способности выдерживать постоянно возрастающие нагрузки. Столь существенное повышение давления в системе топливоподачи дизеля приводит к резкому увеличению уровня нагруженности прецизионных сопряжений элементов топливной аппаратуры и, в частности, цилиндрического направляющего прецизионного сопряжения распылителя форсунки (рис. 1).

Перемещение иглы в корпусе распылителя в процессе работы дизеля осуществляется в осевом направлении, и спровоцировано изменением давления топлива в системе топливоподачи и усилием со стороны возвратной пружины. Радиальное перемещение иглы в корпусе распылителя, в результате кото-

рого игла контактирует со стенкой корпуса, вызвано распределением давления топлива в тонком (до 2 мкм) цилиндрическом зазоре сопряжения, величина которого регламентируется взаимным расположением иглы и корпуса [1].



T – осевая сила от возвратной пружины форсунки, Н
T_N – нормальная составляющая осевой силы, Н
T_τ – тангенциальная составляющая осевой силы, Н
F – усилие со стороны накидной гайки распылителя, Н
F_N – радиальная сила в направляющем сопряжении, Н

Рис. 1. Схема распределения сил в области направляющего и уплотняющего прецизионных сопряжений распылителя

Анализ существующих методов оценки нагруженности сопряжения

Согласно ранее проведенным исследованиям [2, 3, 4], аналитическая оценка действующих нагрузок, в частности величины радиальной силы, возникающей в направляющем сопряжении и способствующей изнашиванию иглы и корпуса распылителя, возможна с использованием зависимости, предложенной Т.М. Баштой [2]. Однако, наличие достаточно большого количества трудноопределимых параметров сопряжения, делает ее чрезвычайно затруднительной, а опытная проверка полученных результатов не представляется возможной. Кроме того, данная зависимость позволяет оценить величину условной средневзвешенной радиальной нагрузки в сопряжении, но, к сожалению, не предоставляет информации о характере распределения давлений топлива и, следовательно, возникающих нагрузок по его протяженности.

В связи с указанными недостатками аналитического подхода к оценке радиальной силы в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении использование численных методов моделирования гидродинамических параметров при помощи современного CFD (Computational Fluid Dynamic) программного обеспечения представляет практический интерес и позволяет выполнить сравнительную оценку результатов, полученных использованием аналитического решения и методов математического моделирования.

Математические CFD-модели потока в сопряжении

Игла и корпус распылителя, как элементы, формирующие цилиндрическое прецизионное сопряжение, имеют самостоятельные оси симметрии, совпадение которых является частным случаем их взаимного расположения, и на практике, не представляется возможным, ввиду особенностей теплового, гидродинамического и механического (в т.ч. и монтажного) нагружений распылителя. В связи с этим, для моделирования гидравлического тракта исследуемого сопряжения созданы математические модели со следующими вариантами взаимного расположения иглы и корпуса:

- ось направляющего сопряжения иглы совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя (идеализированная модель, рис. 2, а);
- ось направляющего сопряжения иглы не совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя и имеет параллельное смещение, а угол между осью иглы и осью корпуса распылителя равен нулю (условно-идеализированная модель, рис. 2, б);
- ось направляющего сопряжения иглы не совпадает с осью отверстия в области направляющего сопряжения в корпусе распылителя, причем игла имеет наклон или «перекос», и угол между осью иглы и осью корпуса распылителя не равен нулю (условно-реалистичная модель, рис. 2, в).

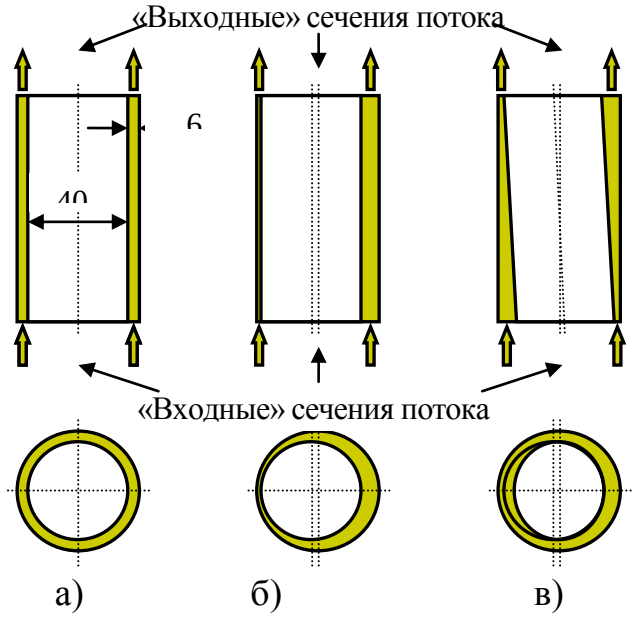


Рис. 2. Схемы идеализированной (а), условно-идеализированной (б) и условно-реалистичной (в) моделей гидравлического тракта направляющего прецизионного сопряжения распылителя

В качестве граничных условий гидродинамического нагружения для моделей направляющего прецизионного сопряжения использованы значения давлений в полости под дифференциальной площадкой иглы распылителя («входное» сечение модели) и значения расходов при движении топлива в направлении дренажной магистрали («выходное» сечение модели), обеспечивающих требуемое значение максимальных давлений топливоподачи.

Гидродинамические параметры и, в частности, связь распределения давления и скорости потока дизельного топлива с геометрическими характеристиками гидравлического тракта направляющего прецизионного сопряжения распылителя, исследовались при условии идеально-гладких поверхностей иглы и корпуса в направляющем сопряжении. Указанное допущение обосновано параметрами шероховатости иглы и корпуса распылителя в области исследуемого сопряжения (R_a = 0,065) с максимальной высотой микронеровностей, составляющей, примерно, 0,25 мкм при предельной толщине слоя топлива на входе в зазор до 10 мкм.

Результаты расчетных исследований

Для всех рассмотренных случаев, расчет выполнен при давлении во «входном» сечении модели (в полости под дифференциальной площадкой иглы) – 40 МПа и расхода топлива в «выходном» сечении направляющего сопряжения распылителя – $3{,}6\times10^{-4}$ кг/с (рис. 3).

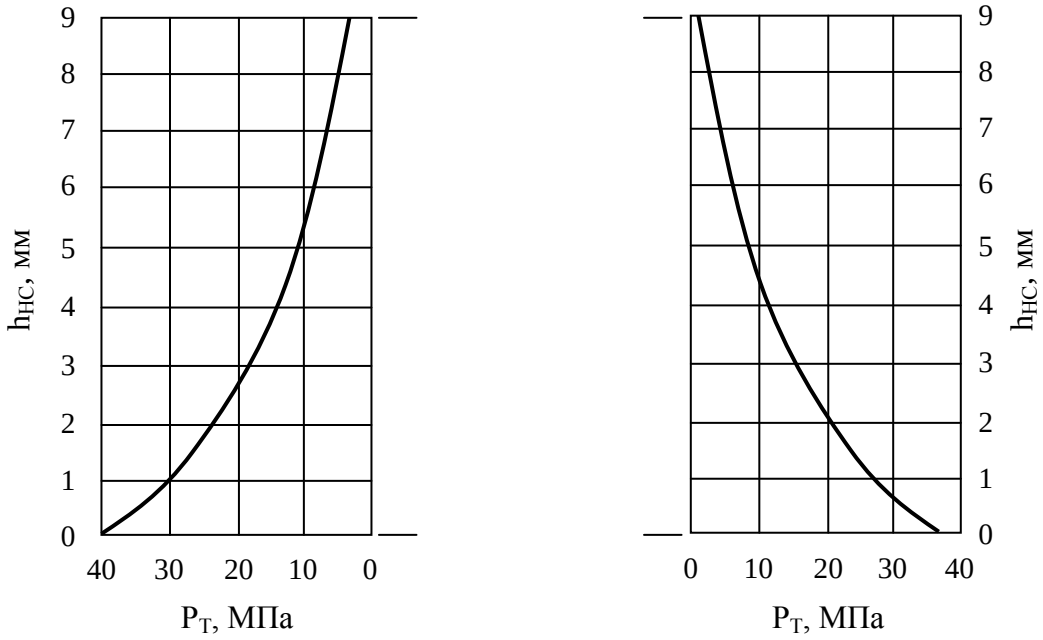


Рис. 3. Изменение давления топлива по протяженности гидравлического тракта направляющего сопряжения ($P_{ВХ}$ = 40 МПа, G = $3{,}6\times10^{-4}$ кг/с)

Полученные результаты, характеризующихся изменением максимального давления топлива на входе в зазор сопряжения, при имеющихся геометрических параметрах последнего, отношение выявленных максимальной и минимальной скоростей потока, близко к двукратному.

Таким образом, для каждой исследуемой модели, получены кривые изменения результирующего давления, действующего на боковую поверхность иглы распылителя, в направляющем сопряжении (рис. 4).

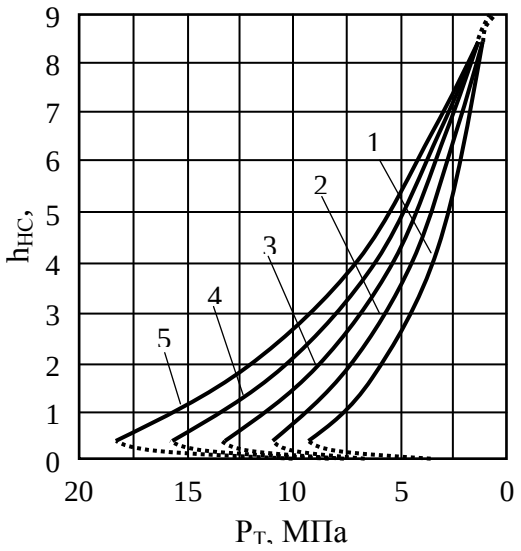


Рис. 4. Результирующее давление на боковую поверхность иглы распылителя по протяженности направляющего прецизионного сопряжения при различных давлениях топлива (1 – $P_{ВХ}$ = 40 МПа, 2 – $P_{ВХ}$ = 60 МПа, 3 – $P_{ВХ}$ = 80 МПа, 4 – $P_{ВХ}$ = 100 МПа, 5 – $P_{ВХ}$ = 120 МПа)

Для определения действующей в сопряжении радиальной силы, полученные разности давлений проинтегрированы по протяженности гидравлического тракта цилиндрического прецизионного направляющего сопряжения (рис. 5, а). Величина радиальной силы в сопряжении получена, как произведение интегрального давления, действующего на боковую поверхность иглы распылителя в цилиндрическом направляющем сопряжении, и площади диаметрального сечения направляющей части иглы (рис. 5, б).

В качестве базового условия при оценке интегрального давления ($P_{ИНТ}$), действующего на боковую поверхность иглы распылителя, принято условие равенства площади под кривой изменения давления в направляющей части сопряжения и площади прямоугольника, сформированного величиной интегрального давления и протяженностью ($h_{НС}$) прецизионной части иглы распылителя. Начальный участок, протяженностью около 0,5 мм, на входе в сопряжение и конечный участок, примерно такой же протяженности, на выходе из сопряжения не учитывался, поскольку, согласно результатам расчета, в указанных областях наблюдалась нестабильность потока.

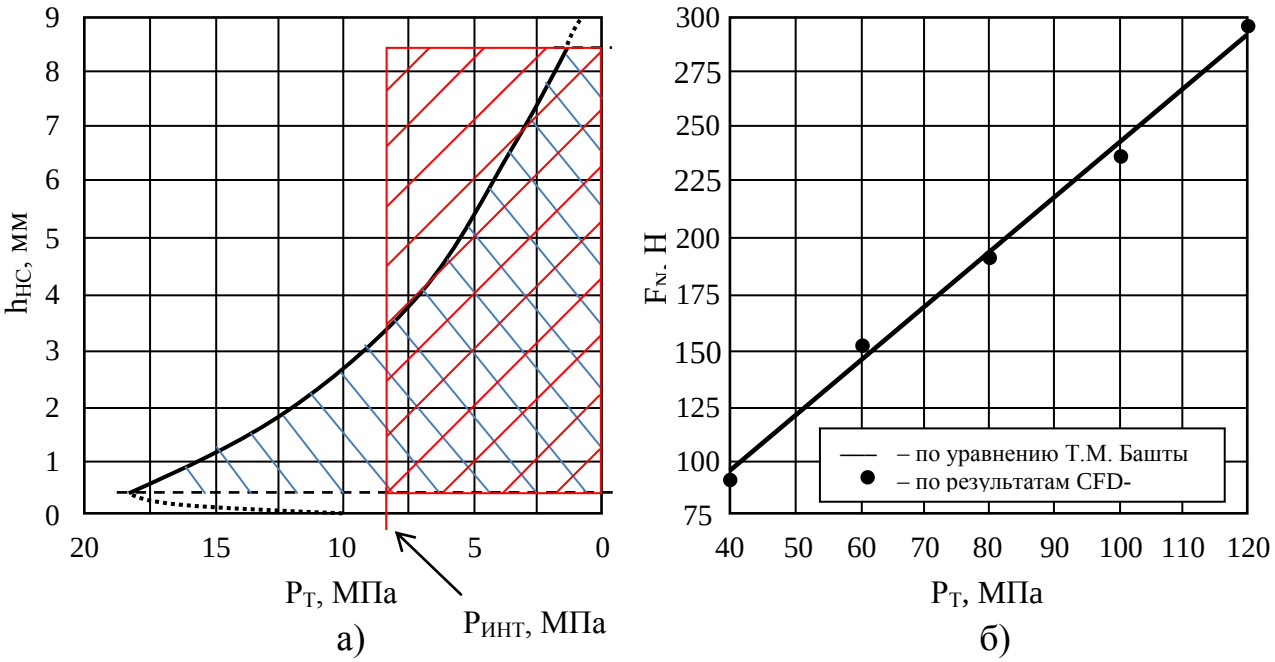


Рис. 5. Оценка интегрального давления топлива, действующего на боковую поверхность иглы в зазоре направляющего прецизионного сопряжения (а) и зависимость величины радиальной силы в функции максимального давления подачи топлива, согласно результатам расчета по уравнению Т.М. Башты и CFD-моделирования (б)

Заключение и выводы

Результаты, полученные в ходе оценки гидродинамических параметров потока топлива в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении распылителя, имеют удовлетворительную сходимость (рис. 5, б), и подтверждают удовлетворительную сходимость значений радиальной силы в сопряжении, определенной по уравнению Т.М. Башты и при помощи CFD-моделирования. Данное обстоятельство свидетельствует о правомерности предложенного подхода к оценке радиальной силы в сопряжении и позволяет осуществить проверку полученных результатов, поскольку экспериментальная оценка распределения давлений в исследуемой области затруднительна.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

- аналитическая зависимость, предложенная Т.М. Баштой, позволяет с удовлетворительной точностью оценить интегральную (по протяженности сопряжения) радиальную нагрузку в цилиндрическом направляющем прецизионном сопряжении распылителя топливной форсунки дизеля. Результаты использования указанной зависимости имеют удовлетворительную сходимость с результатами CFD-моделирования исследуемой области, позволяющими оценить не только среднее значение радиальной нагрузки, но и ее распределение по протяженности сопряжения;

- результаты оценки гидродинамических параметров потока топлива в направляющем сопряжении распылителя, использованием моделей поточной динамики и, в частности, условно-реалистичной модели, позволили выявить неравномерность распределения скорости и давления в потоке не только по протяженности сопряжения, но и в пределах радиальных сечений. Данное обстоятельство обусловлено отклонением оси направляющего сопряжения иглы от оси в области направляющего сопряжения корпуса распылителя, приводящим, первоначально, к изменению геометрических параметров гидравлического тракта и, как следствие, изменению скорости и давления в потоке, и появлению радиальной силы в направляющем сопряжении;
- изменение давления в потоке топлива в пределах радиальных сечений гидравлического тракта неизбежно приводит к появлению радиальной силы в сопряжении, в результате которой игла контактирует с корпусом распылителя, интенсифицируя процессы трения и изнашивания. В соответствии с результатами исследований, чем выше разность давлений на входе в кольцевой зазор сопряжения и на выходе из него, тем выше, возникающая радиальная нагрузка в сопряжении. Последнее обстоятельство позволяет сделать вывод о целесообразности разделения функций направляющего сопряжения – уплотнения и центрирования иглы. Цилиндрическое направляющее сопряжение должно выполнять функцию центрирования иглы в отверстии корпуса распылителя, а функцию уплотнения следует передать дополнительному сопряжению. Данное мероприятие позволит ликвидировать высокую разность давлений на входе в кольцевой зазор сопряжения и выходе из него. Указанный подход, предусматривающий появление оригинальных технических решений в конструкции распылителя и топливоподающей форсунки в целом, вполне может стать тематикой самостоятельного исследования, и актуален для условий постоянно возрастающих давлений подачи топлива в дизелях, и перехода к форсункам с электронным управлением, в системах «Common Rail».

Научная поддержка

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 11.7202.2013) и при поддержке Германской службы академических обменов – DAAD (проект A/12/73347 Ref. 325).

Библиографический список

1. Файнлейб, Б.Н. Топливная аппаратура автотракторных дизелей: справочник / Б.Н. Файнлейб. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, 1990. – 362 с.

2. Лазарев, В.Е. Влияние температуры на радиальную силу в направляющем прецизионном сопряжении распылителя / В.Е. Лазарев // Ползуновский вестник. – 2007. – № 4. – С. 230–233.

3. Lazarev V.E. Different technical designs for the guiding "needle –nozzle" interface of a diesel engine's injector and it's influence to injector's loading and service life / E.A. Lazarev. J. Wloka, G. Wachtmeister, R. Jisa, G. Vorlaufer // International scientific and technical conference – OeTG Symposium "Tribology in Industry and Research", 24th of November, 2011, Wr. Neustadt, Austria. – 2011. – pp. 175–184.

4. Отчет РНП 2.2.2.3 – 8172 по проекту: «Моделирование параметров трения и изнашивания прецизионных сопряжений "игла – корпус" для повышения ресурса различных типов распылителей транспортных дизелей» аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009–2010 годы) / В.Е. Лазарев. – Челябинск, 2009. – 70 с.

К содержанию

УДК 621.432

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРШНЯ ДВИГАТЕЛЯ 4Ч 8,2/7,56

Г.В. Ломакин

Предложена универсальная методика оценки граничных условий при определении теплового состояния поршня бензинового двигателя 4Ч 8,2/7,56 методом конечных элементов, позволяющая учесть все составляющие теплового баланса и особенности газодинамического нагружения в ходе рабочего цикла.

Ключевые слова: поршень, граничные условия, газодинамическое нагружение, квазистационарный теплообмен.

Оценка теплового состояния исследуемого поршня на установившемся режиме работы сводится к определению его температурного поля в выбранном критическом сечении. Нахождение температурного поля поршня предполагает решение дифференциального уравнения теплопроводности, что можно осуществить, имея в распоряжении условия однозначности, которые включают: распределение температуры в сечении поршня в начальный момент времени – начальное условие, теплофизические свойства материала и геометрическую форму исследуемого сечения поршня, взаимодействие поверхности поршня и окружающей среды – граничные условия теплообмена. Под окру-

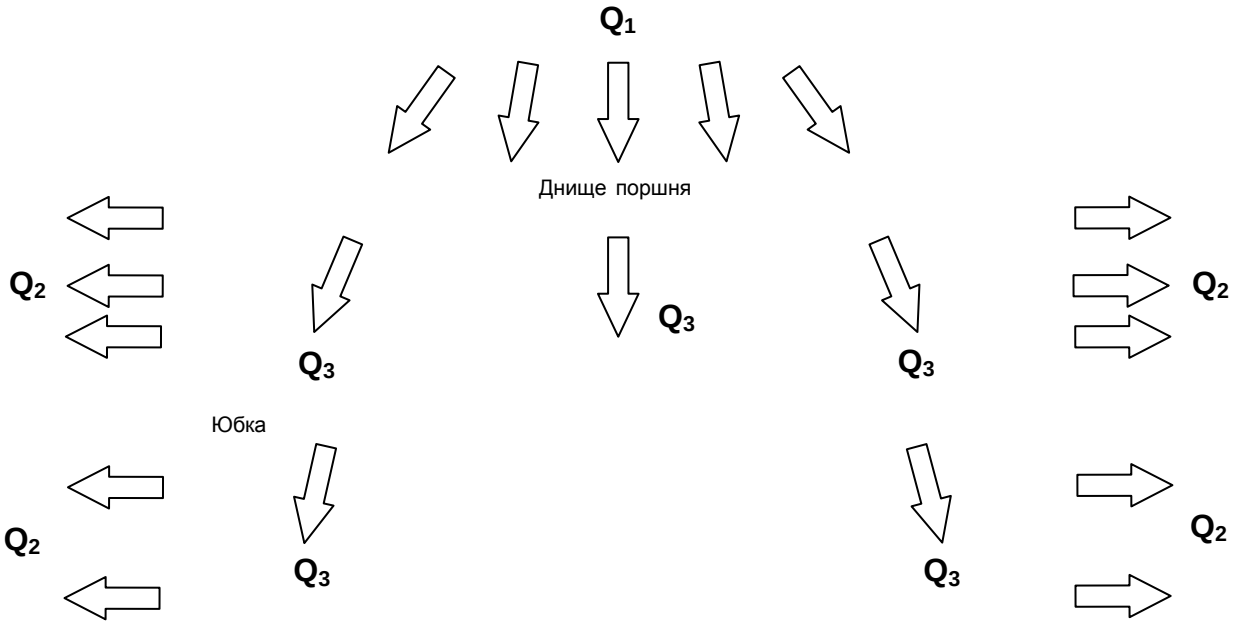
жающей средой понимаются рабочие газы, омывающие поверхность поршня в цилиндре двигателя, масло, движущееся в каналах и полостях поршня, и детали цилиндропоршневой группы, находящиеся в контакте с поршнем [1].

При оценке теплообмена со стороны рабочих газов использованы граничные условие третьего рода – температура окружающей среды (рабочих газов в цилиндре) и закон теплообмена между рабочими газами и поверхностью поршня (коэффициент сложной теплоотдачи). Последний учитывает процесс конвективной и радиационной теплоотдачи.

Рассматривая процесс теплообмена как квазистационарный, теплоотдачу можно характеризовать средним по времени коэффициентом теплоотдачи от рабочих газов к поверхности поршня и некоторой результирующей по теплоотдаче температурой рабочих газов.

Наибольшие трудности представляет определение количества теплоты, отданной поршню рабочими газами, поскольку каждый участок тепловоспринимающей поверхности поршня оценивается своим коэффициентом теплоотдачи и определяющей температурой рабочих газов.

Для оценки граничных условий теплового нагружения поршня рассмотрен тепловой баланс и особенности газодинамического нагружения основных деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) в ходе рабочего цикла (рис. 1).



Q1 – количество тепла, полученное поршнем от рабочих газов,
Q2 – количество тепла, отведенное от поршня через поршневые кольца, юбку и гильзу цилиндра в систему охлаждения двигателя,
Q3 – количество тепла, отведенного от поршня смазочным маслом,
Q4 – количество тепла, пошедшее на изменение температурного состояния поршня

Рис. 1. Основные составляющие теплового баланса поршня

Количество теплоты Q_1, полученное поршнем от рабочих газов в цилиндре дизеля, определится зависимостью

$$Q_1 = \alpha\, F\, \Delta T\, \tau, \qquad (1)$$

где F – площадь тепловоспринимающей поверхности поршня, м^2;

$\alpha_э$ – коэффициент теплоотдачи от рабочих газов к поршню, Вт/м^2·°С ;

ΔT – разность температур поршня и рабочих газов в цилиндре, °С;

τ – время подвода теплоты, с.

При определении количества теплоты, полученной поршнем, необходимо учесть неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности камеры сгорания.

Одним из основных затруднений при решении практических задач теплопроводности является достоверное определение текущего коэффициента теплоотдачи α от рабочих газов. При анализе теплообмена в быстроходных двигателях с уменьшенным отводом теплоты для определения коэффициента теплоотдачи широко применяется зависимость Г. Вошни, позволяющая учитывать различия в интенсивности движения рабочего тела в отдельные периоды рабочего цикла, размеры цилиндра и дополнительную турбулизацию, вызываемую процессом сгорания, а также учитывать конвективную и радиационную составляющие [1, 2, 3]:

$$\alpha = C_q \cdot P^{0,8} \cdot T^{-0,53} \cdot D^{-0,2} \cdot W^{0,8}, \qquad (2)$$

Зависимость Г. Вошни используется для определения коэффициента теплоотдачи α при наличии результатов теплового расчета или индикаторных диаграмм давления в цилиндре, обработка которых предоставляет необходимые давления и температуры рабочего тела для требуемого угла поворота коленчатого вала, что позволяет учесть различия в интенсивности движения рабочего тела в различные периоды рабочего цикла, размеры цилиндра, и дополнительную турбулизацию, вызываемую процессом сгорания.

Для расчета температурных полей действительные условия нестационарного теплового нагружения заменяют некоторыми эквивалентными стационарными, характеризуемыми параметрами, полученными из условия равенства количества теплоты, воспринимаемой участком поверхности поршня в действительном и условно эквивалентном процессах. Эквивалентные параметры теплообмена вычисляются по следующим зависимостям [4]:

$$\alpha_э = \alpha_{ср} = \tau_0^{-1} \cdot \int_0^{\tau_0} \alpha \mathrm{d}\tau, \qquad (3)$$

$$T_э = \frac{(\alpha \cdot T)_{ср}}{\alpha_{ср}}, \qquad (4)$$

откуда следует, что эквивалентный коэффициент теплоотдачи равен его среднему значению за цикл, а эквивалентная температура значительно выше интегральной температуры за цикл.

Для определения температурного состояния поршня и распределения температур по поверхности и в объеме составляющих его элементов, необходимо учесть неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности камеры сгорания, обусловленную ее формой и характером движения рабочих газов в процессе сгорания. Характер распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности камеры сгорания и внешнего днища поршня задается в зависимости от текущего радиуса и описывается известным уравнением Славинского [4]:

$$\frac{\alpha_x}{\alpha_{max}} = A + \frac{(B-A)\cdot x}{R} + \left[1 - A - \frac{(B-A)\cdot x}{R}\right] \cdot 4 \cdot \left[\left(\frac{x}{R}\right)^n - \left(\frac{x}{R}\right)^{2n}\right]^k, \qquad (5)$$

Полученные результаты эквивалентных значений коэффициента теплоотдачи, учитывающие неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности днища поршня и температуры газа в цилиндре нефорсированного двигателя *4Ч 8,2/7,56* на режиме номинальной мощности, определялись с использованием программного комплекса «NewGRAN», разработанного на кафедре «ДВС» ЮУрГУ, представлены на рис. 2.

Количество теплоты Q_2, переданное от поршня через поршневые кольца и гильзу цилиндров в охлаждающую жидкость, определится зависимостью

$$Q_2 = k_2 \, F_2 \left(T_П - T_Ж\right) \tau, \qquad (6)$$

где k_2 – коэффициент теплопередачи от поршня через поршневые кольца и гильзу цилиндра в систему охлаждения дизеля, Вт/(м^2·°С);

F_2 – площадь поверхности контакта, м^2;

$T_П$ – температура поршня, °С;

$T_Ж$ – температура охлаждающей жидкости, °С.

Процесс передачи теплоты от поршня через поршневые кольца в гильзу цилиндров и, далее, в охлаждающую жидкость осуществляется через две контактирующие поверхности, обусловленные наличием промежуточных деталей: компрессионных и маслосъемного колец [4].

Количество теплоты Q_3, отведенное смазочным маслом, определится зависимостью:

$$Q_3 = \alpha_3 \, F_3 \left(T_П - T_М\right) \tau, \qquad (7)$$

где α_3 – коэффициент теплопередачи от поршня в охлаждающее смазочное масло, Вт/(м^2·°С);

F_3 – площадь поверхности поршня, омываемая маслом, м^2;

$T_М$ – температура смазочного масла, °С.

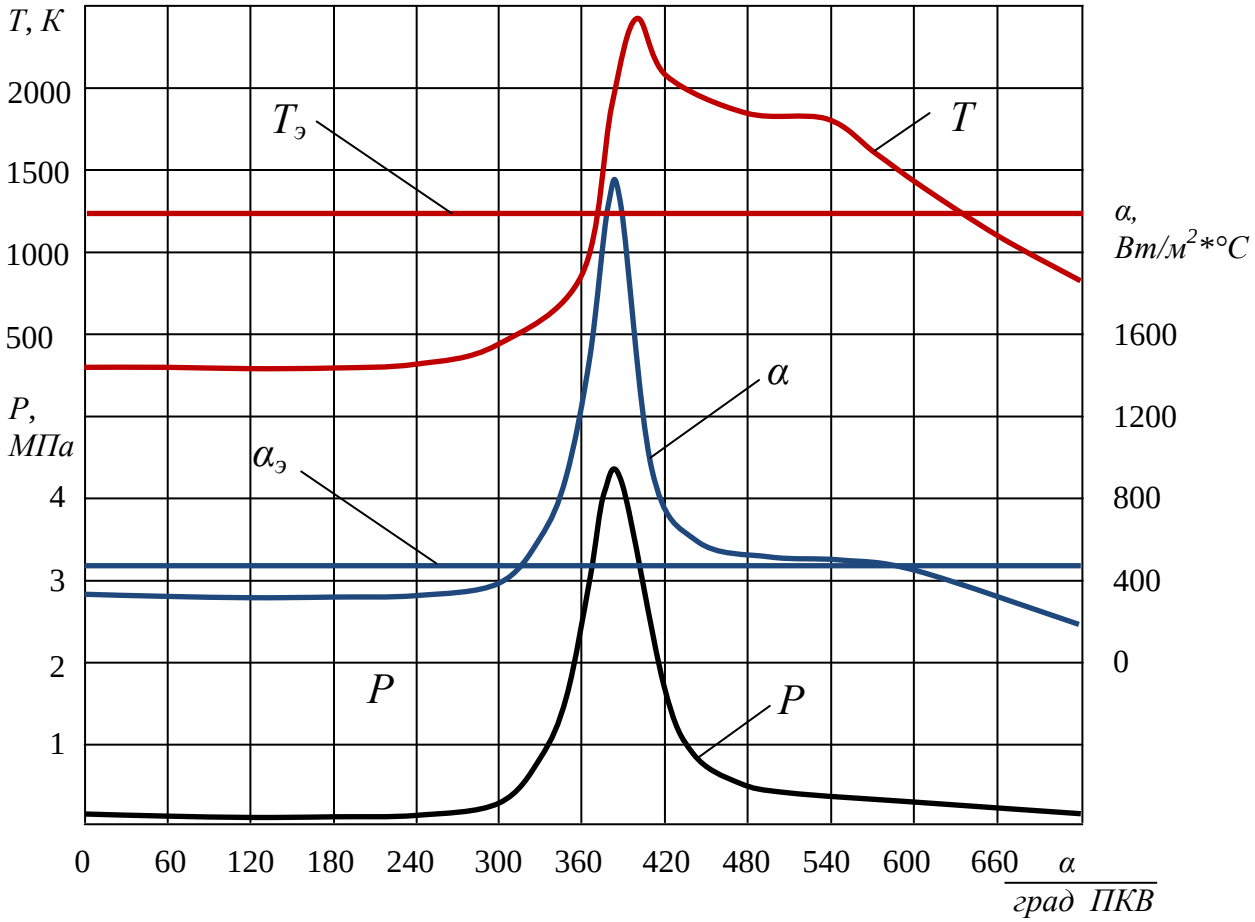


Рис. 2. Индикаторная диаграмма давления, температуры и коэффициенты теплоотдачи от газов в стенки внутрицилиндрового пространства двигателя *4Ч 8,2/7,56* на режиме номинальной мощности (Ре = 0,895 МПа, n = 5200 мин $^{-1}$)

Количество тепла Q4 можно установить как алгебраическую сумму:

$$Q4 = Q1 + Q2 + Q3, \quad (8)$$

С другой стороны, согласно закона Фурье, можно записать:

$$Q4 = \lambda \; F \, \tau \, (dt / dn), \quad (9)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала поршня, Вт / м·°С,

F – площадь сечения поршня, м^2,

τ – время, с,

(dt /dn) – градиент температуры в сечении поршня, °С /м.

Тогда температурное поле в сечении поршня можно определить, приравняв выражения (8) и (9):

$$(dt / dn) = (Q1 + Q2 + Q3) / (\lambda \, F \, \tau). \quad (10)$$

Известно, что наибольшее значение имеет составляющая теплового баланса, учитывающая теплоту, полученную поршнем от рабочих газов в цилиндре. При этом коэффициент теплоотдачи от днища поршня в масло зависит от способов охлаждения[4]. Так, в неохлаждаемых поршнях теплоотдача в масляный туман от внутренних поверхностей поршня характеризуется значением коэффициента теплоотдачи $\alpha_м = 60…500$ *Вт/(м2 ^{0}С)*. Относительно высокая эффективность принудительного охлаждения поршня достигается использованием преимуществ локального охлаждения.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи $\alpha_{ср}$ при орошении поверхности внутреннего днища поршня смазочным маслом в качестве первого приближения определено с учетом рекомендаций [4]. Для плоской поверхности орошения внутреннего днища поршня максимальное значение α:

$$\alpha_{max} = 524{,}42\sqrt{\lambda \rho c_p}\, n, \qquad (11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности смазочного масла, Вт/(м·°С);

n – частота вращения коленчатого вала, мин$^{-1}$.

При установке в цилиндре двигателя поршень контактирует с гильзой цилиндра прежде всего через поршневые кольца и смазочный слой, а также имеет место контакта направляющей части поршня через слой смазки непосредственно с гильзой цилиндра. Теплообмен между этими двумя контактирующими телами характеризуется граничными условиями четвертого рода, которые могут быть записаны в следующей форме для случая равенства температуры контактирующих тел [1]:

$$\lambda_1 (\partial t / \partial n) = \lambda_2 (\partial t / \partial n)_n ; \qquad (12)$$

$$t_{1n} (\tau) = t_{2n} (\tau) , \qquad (13)$$

где n – координаты пространства.

На гранях элементов, совпадающих с сопрягаемыми поверхностями, теплообмен рассматривается как контактный и, следовательно, описываемый параметрами: коэффициентом контактного теплообмена α_K, численно равен проводимости контакта, и температурой T поверхностей контактирующих элементов. Коэффициент контактного теплообмена в этом случае, как и проводимость контакта, являются величинами обратными термическому сопротивлению контакта R_K, которое зависит от идентичности формы, чистоты исполнения поверхности и усилия, обеспечивающего сохранение контакта сопрягаемых поверхностей.

Коэффициент контактного теплообмена между горизонтальными поверхностями контакта поршневых канавок и поршневых колец может быть определен с использованием рекомендаций Г.Б. Розенблита [5] по выражению:

$$\alpha_K = [2\lambda_C] / (h_1 + h_2) + 2{,}1[(p\lambda_M) / (3\sigma_в)]\ 10^4, \quad (14)$$

где λ_C, λ_M – теплопроводность среды и приведенная теплопроводность материала, (Вт/м °С);

h1, h2 – высота неровностей профилей контактирующих поверхностей, м;

p – контактное давление, Па;

σ_B – предел прочности менее пластичного материала, Па.

Применительно к контактирующим поверхностям поршневых колец с выточками в поршне следует отметить в соответствии с условиями их работы достаточно малое общее термическое сопротивление $R_{ПК}$, которое представляет собой часть последовательно-параллельных сопротивлений трущихся граней. При этом для приближенных оценок можно использовать зависимость:

$$R_{пк} = \{[R_{пк2}\, R_{пк3} /(R_{пк2} + R_{пк3})] + R_{пк1} + (b_K / \lambda_K)\}\gamma, \quad (15)$$

где b_K, λ_K – соответственно, ширина и коэффициент теплопроводности материала колец;

γ – относительное термическое сопротивление поршневых колец, равное у быстроходных двигателей для первого кольца 1,2…1,7, для второго кольца – 1,2…1,4;

$R_{пк1}$, $R_{пк2}$, $R_{пк3}$ – сопротивления трущихся граней поршневого кольца.

В этой связи для контактирующих поверхностей за условное значение коэффициента теплоотдачи целесообразно принять коэффициент контактного теплообмена, а в качестве температуры окружающей среды принять температуру поверхности сопрягаемых элементов, т.е. описать процесс теплообмена эквивалентными граничными условиями третьего рода, причем при моделировании теплового состояния поршня необходимо учесть действительные теплофизические свойства используемых материалов, смазочного масла и газовой среды.

Заключение

Представленная универсальная методика оценки граничных условий при решения задачи определения теплового состояния поршня исследуемого двигателя методом конечных элементов предусматривает следующую последовательность действий:

- определение характера изменения давления и температуры газов в цилиндре дизеля посредством синтеза рабочего цикла или индикаторных диаграмм давления в цилиндре;
- определение параметров теплообмена со стороны рабочих газов в цилиндре двигателя, смазочного материала и сопряженных элементов цилиндро-поршневой группы;

- определение эквивалентных значений коэффициента теплоотдачи учитывающие неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности днища поршня и температуры газа в цилиндре исследуемого двигателя с использованием программного комплекса «NewGRAN»;
- описание геометрических характеристик элемента, создание конечно-элементной модели и определение условий теплообмена на границах расчетной области;
- указание теплофизических свойств материалов и выполнение расчетных процедур по решению уравнения теплопроводности для нахождения распределения температур в анализируемом элементе.

Библиографический список

1. Лазарев, Е.А. «Методические указания к практическим занятиям по дисциплине тепловая и механическая напряженность поршневых двигателей»: учебное пособие / Е.А. Лазарев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 40 с.

2. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 383 с.

3. Woschni, G. Eine Methode zur Vorausberechnung der Anderung des Brennverlaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geanderten Betriebs–bedingungen / G. Woschni, F. Anisitis // MTZ. – 1973. – № 4. – S. 160–165.

4. Костин, А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.

5. Розенблит, Г.Б. Теплопередача в дизелях / Г.Б. Розенблит. – М.: Машиностроение, 1977. – 216 с.

К содержанию

УДК 621.432-232 + 621.827

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МЕХАНИЗМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ БЕСКРИВОШИПНОЙ ПОРШНЕВОЙ ТЕПЛОВОЙ МАШИНЫ

Б.А. Шароглазов, А.В. Гофман

Приводятся результаты расчётных исследований уровня контактных напряжений в элементах механизма преобразования движения бескривошипного двигателя. Делается вывод о возможности снижения их максимальных значений использованием упругих элементов (в частности, пружин).

Ключевые слова: бескривошипная машина; механизм преобразования движения; поршень; контактное напряжение; рабочее тело.

На современном этапе развития автомобиле- и тракторостроения основным (традиционным) источником механической энергии является двигатель с кривошипно-шатунным механизмом. Такого типа двигатели получили массовое распространение благодаря ряду неоспоримых достоинств: высокий КПД и надёжность, отработанность конструктивных схем и решений, высокий уровень технологии производства. И всё же им присущ ряд недостатков. В частности, сложность и достаточно высокая стоимость (примерно 30…40 % от стоимости двигателя в целом) изготовления механизма преобразования возвратно-поступательного движения поршня машины во вращательное коленчатого вала.

Названные недостатки (а также ряд других) побуждают исследователей к отысканию новых схем тепловых машин и механизмов. Результаты таких работ хорошо отражены в современной литературе, см. например [1, 2, 3]. К такого типа решениям может быть отнесено предложение сотрудников кафедры ДВС Южно-Уральского государственного университета по схеме бескривошипной поршневой машины (БПМ) [3], важным качеством которой является непосредственное преобразование возвратно-поступательного движения поршня во вращательное. Но и такое решение оказалось не свободным от недостатков.

К важным из них относятся чрезмерно высокие контактные напряжения в механизме преобразования движения поршня, возникающие при положении его (поршня) вблизи верхней мёртвой точки (ВМТ) в процессе сгорания. Это обстоятельство поясним, используя рис. 1.

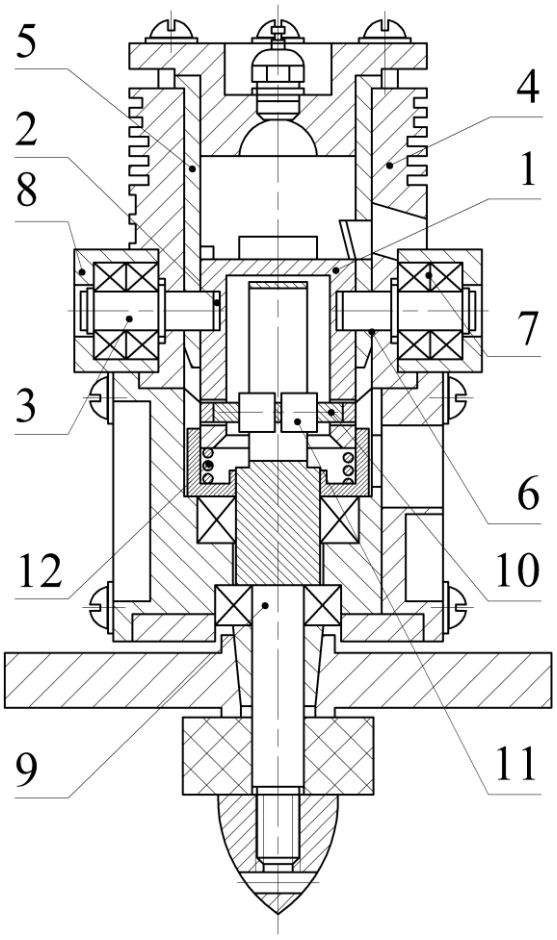


Рис. 1. Конструктивная схема бескривошипного двигателя с непосредственным преобразованием возвратно-поступательного движения поршня во вращательное выходного вала: 1 – поршень; 2 – замкнутый криволинейный двухпериодный паз (беговая дорожка) на боковой поверхности поршня; 3 – ролики механизма преобразования движения; 4 – цилиндр; 5 – гильза цилиндра; 6 – отверстия в стенках для роликов; 7 – подшипники; 8 – гнёзда подшипников; 9 – выходной (грузовой) вал; 10 – поршневой палец; 11 – ролики поршневого пальца; 12 – пружина

БПМ работает как двигатель с кривошипно-камерной системой газообмена. В процессе сгорания и расширения высокое давление рабочего тела (РТ) принуждает поршень 1 к поступательному движению, которое воспринимается передаточным механизмом, включающим паз (беговую дорожку) 2, выполненный на боковой поверхности поршня. Паз 2 находится в сочленении с роликами (телами вращения) 3, расположенными в выполненных в стенках цилиндра 4 и гильзы 5 отверстиях 6, на которых установлены подшипники 7, закрепленные в гнёздах 8. Взаимодействие роликов с беговой дорожкой побуждает поршень совершать, одновременно с возвратно-поступательным, вращательное движение. Вращательное движение поршня передается на вы-

ходной вал 9 при помощи поршневого пальца 10 с установленными на него цилиндрическими роликами 11. Выходной вал 9 остается неподвижным в продольном направлении, а поршень имеет возможность движения вдоль его (выходного вала) оси.

Нисходящее (по схеме) движение поршня завершается в нижней мёртвой точке (НМТ). С этого момента, за счёт инерции вращающихся масс (маховик, поршень, грузовой вал и др.) поршень меняет направление движения (движется к ВМТ). Исключим пока из рассмотрения роль и функции обозначенной на рисунке пружины 12 (её пока нет). Завершаются процессы смены РТ, начинается сжатие, затем – сгорание. Давление РТ в этот период достигает максимума, возрастает действующая на поршень сила давления газов. Растёт и нагрузка на детали механизма преобразования движения (беговая дорожка, ролики) растут контактные напряжения.

Их (контактные напряжения) можно снизить. Например, за счёт использования пружины, подпирающей торец направляющей части поршня (позиция 12 на рис. 1). Пружина вращается вместе с поршнем.

Причём при движении поршня к НМТ пружина подвергается сжатию и, воздействуя на нижний торец направляющей части поршня, способствует частичной разгрузке стенок беговой дорожки от чрезмерных контактных напряжений в период сгорания. При движении поршня к ВМТ действие пружины способствует разгрузке стенок беговой дорожки от напряжений, обусловленных силами инерции поршня, вектор которых направлен к НМТ. Таким образом, перемещение поршня от НМТ до ВМТ обеспечивается силами упругости пружины и установленным на выходном валу маховиком (и силами инерции других вращающихся масс).

Рисунком 2 иллюстрируется характер изменения сил, действующих на подпружиненный поршень двухтактной БПМ в течении цикла: $P_c=P_г+P_j$; $P_\Sigma=P_c+P_{пр}$ (здесь $P_г$ – сила, обусловленная давление газов; P_j – сила инерции возвратно-поступательно движущихся масс; $P_{пр}$ – сила, обусловленная упругостью пружины). Изменение сил представлено в функции текущего угла поворота поршня α (град. ПП; за начальное значение α принято α=90 град. ПП, соответствующее НМТ).

Анализ характера изменения сил позволяет отметить, что использование упругого элемента (пружины) в механизме преобразования движения позволяет заметно изменить характер протекания и численное значение суммарной силы P_Σ, действующей на поршень. А это обстоятельство, в свою очередь, обеспечивает изменение (в частности, снижение) модуля силы, действующей перпендикулярно боковой поверхности беговой дорожки механизма преобразования движения, см. рис. 3.

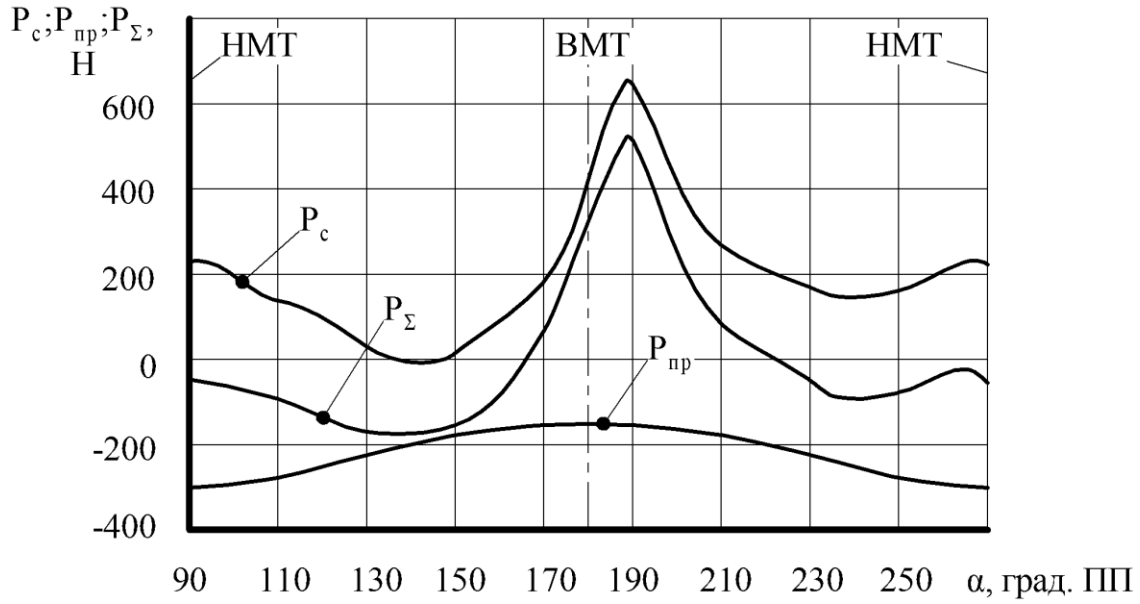


Рис. 2. Характер изменения сил, действующих на подпружиненный поршень БПМ в течение цикла. Основные исходные данные: степень сжатия ε= 7; n=3000 мин$^{-1}$; коэффициент избытка воздуха α=0,95; угол опережения воспламенения θ=20 град. ПП до ВМТ; топливо – метанол + касторовое масло

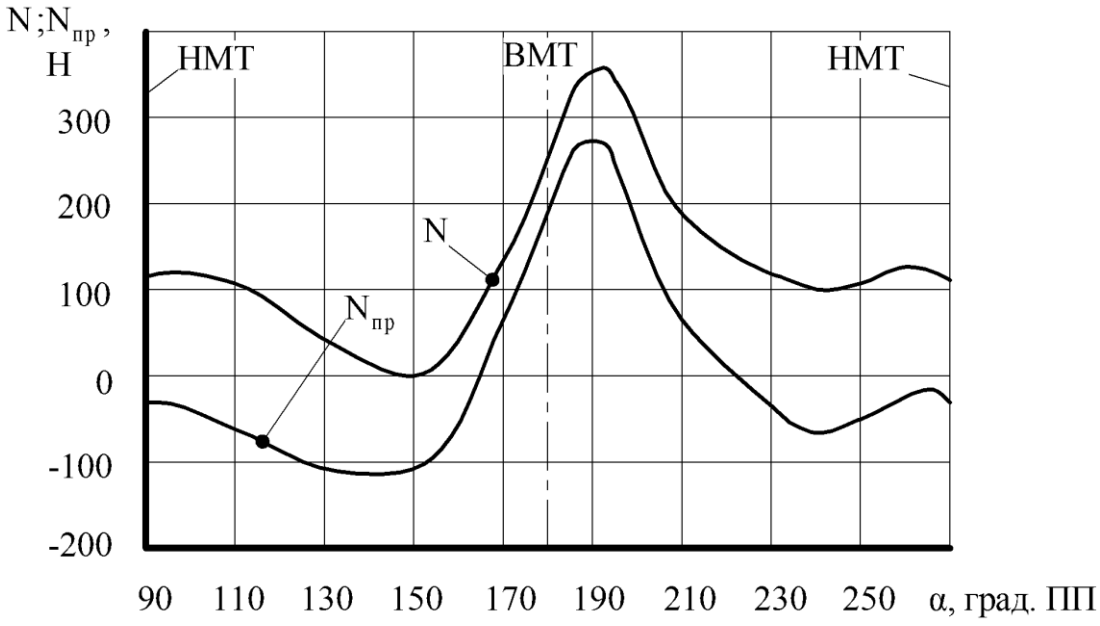


Рис. 3. Изменение сил, действующих перпендикулярно боковой поверхности беговой дорожки механизма преобразования движения (N – для случая, когда пружина отсутствует; $N_{пр}$ – при подпружиненном поршне). Основные исходные данные см. рис. 2

Анализ характера протекания сил N и $N_{пр}$, даёт основания заключить что на беговую дорожку поршня и ролики механизма преобразования движения действуют максимальные и кратковременные контактные напряжения в моменты, соответствующие положениям поршня, характеризуемых значениями фаз по α равными 180 (ВМТ) и 195 (максимальное давление газов в процессе сгорания) град. ПП.

В литературе известны различные подходы для оценки численных значений названных напряжений. Нами использовалось выражение, предложенное Г. Герцем, см. [4]:

$$\sigma_{н} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot F}{\pi \cdot (E_1 + E_2) \cdot [(1 - \mu_1^2) + (1 - \mu_2^2)] \cdot L \cdot R}},$$

где $1/R=1/R_1+1/R_2$ (R_1, R_2 – радиусы контактирующих поверхностей, соответственно ролика и беговой дорожки) – приведенная кривизна поверхности в плоскости наиболее плотного касания, 1/м; F – сила прижатия одного рассчитываемого тела к другому, Н; L – длина линии контакта, м; E_1, E_2 – модули упругости, материала контактирующих деталей, МПа; μ_1, μ_2 – коэффициенты Пуассона соответствующих материалов.

В табл. 1 приведены значения параметров, использованных авторами для расчета максимальных кратковременных контактных напряжений для поршней из различных материалов.

Таблица 1

Значения параметров для расчета максимальных кратковременных контактных напряжений для поршней из различных материалов

Марка применяемого материала	Приведенная кривизна поверхности, 1/м		Модуль упругости, МПа	Максимальная кратковременная сила прижатия, Н		Коэффициент Пуассона
	α=180 град. ПП	α=195 град. ПП		α=180 град. ПП	α=195 град. ПП	
Д16Т	0,0021	0,0025	$0{,}75 \times 10^5$	428,5	633,3	0,31
Д16Т*	0,0021	0,0025	$0{,}75 \times 10^5$	89,7	112,4	0,31
ВТ9	0,0021	0,0025	$1{,}15 \times 10^5$	399,1	603,1	0,35
Сталь 40 Х	0,0021	0,0025	$2{,}1 \times 10^5$	354,7	557,5	0,30

*Примечание: БПМ с использованием упругого элемента (пружины) в механизме преобразования движения.

В табл. 2 приведены результаты расчетных оценок значений максимальных кратковременных контактных напряжений для поршней из различных материалов.

Таблица 2

Значения максимальных кратковременных контактных напряжений для поршней из различных материалов

Марка применяемого материала	Расчетные максимальные кратковременные контактные напряжения, МПа		Допустимые максимальные кратковременные контактные напряжения, МПа
	α=180 град. ПП	α=195 град. ПП	
Д16Т	1210,7	1352,0	600,0
Д16Т*	554,2	568,4	600,0
ВТ9	1352,6	1528,9	1800,0
Сталь 40 Х	1515,8	1741,7	2300,0

*Примечание: БПМ с использованием упругого элемента (пружины) в механизме преобразования движения.

В табл. 3 приведены значения параметров, используемых для расчета средних контактных напряжений для поршней из различных материалов.

Таблица 3

Значения параметров для расчета средних контактных напряжений для поршней из различных материалов

Марка применяемого материала	Приведенная кривизна поверхности, 1/м		Модуль упругости, МПа	Средняя сила прижатия, Н		Коэффициент Пуассона
	α=180 град. ПП	α=195 град. ПП		α=180 град. ПП	α=195 град. ПП	
Д16Т	0,0021	0,0025	$0,75 \times 10^5$	190,3	282,6	0,31
Д16Т*	0,0021	0,0025	$0,75 \times 10^5$	39,9	49,9	0,31
ВТ9	0,0021	0,0025	$1,15 \times 10^5$	174,1	264,9	0,35
Сталь 40Х	0,0021	0,0025	$2,1 \times 10^5$	157,6	247,6	0,30

*Примечание: БПМ с использованием упругого элемента (пружины) в механизме преобразования движения.

В табл. 4 приведены результаты расчетных исследований средних контактных напряжений для поршней из различных материалов.

Таблица 4

Значения средних контактных напряжений для поршней из различных материалов

Марка применяемого материала	Расчетные средние контактные напряжения, МПа		Допустимые средние контактные напряжения, МПа
	α=180 град. ПП	α=195 град. ПП	
Д16Т	807,1	901,3	400,0
Д16Т*	369,5	378,9	400,0
ВТ9	901,7	1019,3	1200,0
Сталь 40Х	1010,5	1161,1	1400,0

*Примечание: БПМ с использованием упругого элемента (пружины) в механизме преобразования движения.

Анализ результатов расчетных исследований даёт основания заключить, что при использовании в БПМ поршней, выполненных из сталей 40Х; ВТ9, нет необходимости применения специальных мер (в частности, использования подпружинивания поршней) для снижения уровня максимальных кратковременных и средних контактных напряжений в элементах механизма преобразования движения (например, в сопряжениях «ролик-беговая дорожка»). В этом случае численные значения максимальных и средних контактных напряжений не превышают допустимого уровня.

При использовании менее прочных сплавов (в частности, Д16Т) возникает необходимость разработки мероприятий, способствующих снижению численных значений таких напряжений. В рассматриваемом случае показана эффективность использования подпружинивания поршней. Полезность такого технического решения, отображенного рис. 1, подтверждена патентом РФ [5] на изобретение.

Библиографический список

1. Баландин, С.С. Бесшатунные двигатели внутреннего сгорания / С.С. Баландин. – М.: Машиностроение, 1972. – 212 с.

2. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Устройство и работа поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для ВТУЗов. – М.: Машиностроение, 1990. – 452 с.

3. Пат. RU 2054978 C 1, 6 F 01 B 9/6, F02 B 75/32. Бесшатунный двигатель внутреннего сгорания / Б.А. Шароглазов, А.В. Пономарёв, Г.И. Иванов (РФ). – № 5063986; Заявлено 06.10.1992; Приоритет 06.10.92; Опубл. 10.04.96. // Бюл. № 10.

4. Решетов, Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов / Д.Н. Решетов. – 4-е изд. – М: Машиностроение, 1989. – 496 с.

5. Пат. RU 2156871 C 1, 7 F 02 B 75/26, F01 B 9/06, Бескривошипный двигатель внутреннего сгорания / Б.А. Шароглазов, В.Г. Ваганов (РФ). – № 99110007; Заявлено 18.05.1999; Приоритет 18.05.99; Опубл. 27.09.2000. // Бюл. № 27.

К содержанию

УДК 621.436.004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИЦИЛИНДРОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ ПУСКА ДИЗЕЛЯ СЖАТЫМ ВОЗДУХОМ

В.В. Шишков, Д.Р. Бакиев

Применительно к условиям пуска сжатым воздухом разработана расчетная модель внутрицилиндровых процессов дизеля, отражающая количественные изменения параметров состояния рабочего тела в течение рабочего цикла. Модель позволяет установить влияние условий пуска сжатым воздухом на индикаторные показатели рабочего цикла и осуществить целенаправленный выбор параметров системы воздушного пуска.

Ключевые слова: пуск дизеля; сжатый воздух; рабочий цикл; индикаторные показатели.

Повышение эффективности пуска дизеля сжатым воздухом подразумевает сокращение времени пуска, достигаемое при ограниченных расходах пускового воздуха. Важное качество системы воздушного пуска (СВП) состоит в том, что мощность СВП практически не зависит от температуры окружающей среды. Это свойство СВП позволяет достигать высоких частот прокручивания коленчатого вала при низких температурах (электростартерная система пуска (ЭСП) характеризуется существенным падением мощности при понижении температуры электролита в аккумуляторных батареях). Однако, для СВП характерно понижение температуры воздуха при его расширении в элементах СВП. Понижение температуры продолжается и в цилиндре, уменьшается средняя по объему температура внутрицилиндрового заряда, охлаждаются стенки камеры сгорания, ухудшаются условия для самовоспламенения впрыскиваемого в цилиндр топлива.

В разработанной расчетной модели комплексно учитывается влияние на параметры рабочего тела свойств впускного заряда, массовых потерь рабочего тела из цилиндра через неплотности цилиндро-поршневой группы (ЦПГ), явлений теплообмена, неравномерности вращения коленчатого вала, подачи сжатого воздуха. Расчетная модель базируется на уравнениях объемного баланса, применяемых для моделирования рабочего цикла ДВС [1]. Уравнения объемного баланса получены при допущении изобарного характера частных изменений объема вследствие входа в цилиндры и выхода из него газа, а также вследствие теплообмена в интервале элементарного шага расчета по времени $d\tau$. Адиабатическое изменение объема газа предполагается происходящим со всем объемом газа, содержащимся в цилиндре после всех предыдущих процессов.

Изменение давления в цилиндре в течение рабочего цикла описывается уравнением:

$$dp = \frac{kp}{V}\left(\partial_{ss}V + \partial_{bb}V + \partial_{sb}V + \partial_{bs}V + \partial_{Q}V + \partial_{\text{ут}}V + \partial_{\text{вп}}V - dV\right). \qquad (1)$$

В записанном выражении k – показатель адиабаты; p – текущее давление в цилиндре; $\partial_{ss}V$, $\partial_{bb}V$, $\partial_{sb}V$, $\partial_{bs}V$ – частные изменения объема вследствие газообменных процессов; $\partial_{Q}V$, $\partial_{\text{ут}}V$, $\partial_{\text{вп}}V$ – частные изменения объема вследствие теплообменных процессов в цилиндре, массовых потерь рабочего тела из цилиндра через неплотности ЦПГ, подачи сжатого воздуха из СВП; dV – изменение объема цилиндра за шаг расчета вследствие перемещения поршня; V – текущий объем цилиндра.

В расчетной модели принято, что газ, выходящий из цилиндра, имеет температуру равную средней температуре газа в цилиндре. В этом случае уравнение для определения средней температуры газа в цилиндре имеет вид

$$dT = \frac{T}{V}\left[\frac{(k-1)Vdp}{kp} + \left(1 - \frac{T}{T_{ss}}\right)\partial_{ss}V + \left(1 - \frac{T}{T_{sb}}\right)\partial_{sb}V + \left(1 - \frac{T}{T'_{\text{вп}}}\right)\partial_{\text{вп}}V + \partial_{Q}V\right], \quad (2)$$

где T_{ss}, T_{sb}, $T'_{\text{вп}}$ – температуры газов, вошедших в цилиндр через впускной, выпускной и пусковой клапаны.

Частное изменение объема вследствие теплообмена с внутрицилиндровой поверхностью:

$$\partial_{Q}V = \frac{RdQ}{pC_p}, \qquad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная; C_p – теплоемкость внутрицилиндровых газов при постоянном давлении.

Элементарное количество теплоты, подведенной к рабочему телу:

$$dQ = \alpha F_w \left(T_w - T\right) d\tau \,, \tag{4}$$

где F_w – площадь поверхности теплообмен; T_w – средняя температура поверхности теплообмена.

Для расчета коэффициента теплоотдачи α использовано уравнение Вошни [2].

Температура воздуха, вошедшего в цилиндр из системы воздухопуска после расширения до давления в цилиндре, при адиабатическом истечении:

$$T_{\text{вп}}^{'} = T_{\text{вп}} \left(\frac{p}{p_{\text{вп}}} \right)^{\frac{k_{\text{вп}}-1}{k_{\text{вп}}}} , \tag{5}$$

здесь $T_{\text{вп}}$, $p_{\text{вп}}$, $k_{\text{вп}}$ – температура, давление и показатель адиабаты воздуха в пусковом клапане.

В результате «дроссель-эффекта» происходит понижение температуры воздуха в элементах системы воздухопуска. Известна методика расчета температуры воздуха при его расширении в элементах системы воздухопуска [3]. Рекомендации, приведенные в указанной статье, учитывались при задании численных значений температуры воздуха в пусковом клапане.

При определении потерь рабочего тела из цилиндра через неплотности ЦПГ необходимо учитывать не только изменение давления в цилиндре, скорость вращения коленчатого вала, диаметр цилиндра, число компрессионных колец, как это реализовано в эмпирических зависимостях для определения потерь заряда через кольца [4], но и изменение давления в заколечных объемах. Изменение давления в заколечных объемах происходит с фазовым смещением относительно давления в цилиндре. Величина фазового смещения определяется частотой вращения коленчатого вала. При понижении частоты вращения коленчатого вала фазовое смещение давлений уменьшается. Для пусковых частот прокручивания принято допущение о постоянстве давления и температуры в заколечном объеме на элементарном шаге расчета. Приняты также допущения об отсутствии теплообмена в заколечных объемах и о равенстве температур газа во всех заколечных объемах. Эффективные проходные сечения зазоров всех компрессионных колец полагаем равными и не зависящими от положения поршня. Для названных условий несомненным является то, что на элементарном шаге расчета расходы газа через каждый кольцевой зазор будут равны, а, следовательно, равны и скорости истечения. Совместным решением уравнений скорости истечения для каждого кольцевого зазора получены соотношения давлений в заколечных объемах, в частности,

давление в первом заколечном объеме определяется давлением в цилиндре p и давлением картерных газов $p_{кг}$ по зависимостям: для двух компрессионных колец $p_1 = \sqrt{p_{кг} p}$; для трех компрессионных колец $p_1 = \sqrt[3]{p_{кг} p^2}$.

Такой вариант определения утечек заряда предполагает некоторую погрешность расчета, обусловленную фазовым смещением давлений, однако следует отметить, что по мере снижения пусковой частоты вращения, когда утечки увеличиваются, фазовое смещение давлений уменьшается, а при увеличении частоты вращения, когда увеличивается фазовое смещение давлений, абсолютная величина утечек уменьшается, поэтому погрешность расчета мало зависит от изменения пусковой частоты вращения. Для снижения погрешностей расчета алгоритм программы предусматривает задание в исходных данных величины фазового смещения давлений, которая является функцией частоты прокручивания коленчатого вала. Приведенные выше подходы к решению поставленной задачи позволяют оценивать влияние числа компрессионных колец на параметры рабочего тела при пуске дизеля сжатым воздухом.

Применительно к дизелю размерности 13/15 выполнены сравнительные расчеты внутрицилиндровых параметров рабочего цикла с подачей сжатого воздуха (на рис. 1 и 2 изменение параметров отражено пунктирными линиями) и без подачи сжатого воздуха (на рис. 1 и 2 изменение параметров отражено сплошными линиями). Расчетный режим характеризуется следующими параметрами: геометрическая степень сжатия 14; частота прокручивания коленчатого вала 150 мин$^{-1}$; температура окружающей среды 263 К; давление сжатого воздуха в пусковом клапане 2,5 МПа; геометрическое начало подачи сжатого воздуха 360 град. ПКВ; продолжительность подачи сжатого воздуха по углу поворота коленчатого вала 65 градусов; эффективное проходное сечение пускового клапана 40 мм^2; начальный натяг пружины пускового клапана 5 Н.

В рассматриваемых циклах максимум давления и температуры достигается за несколько градусов до верхней мертвой точки, это вызвано массовыми потерями рабочего тела через неплотности ЦПГ и отводом теплоты в стенки.

Действительный угол начала подачи сжатого воздуха в цилиндр не совпадает с геометрическим и составляет 370 градусов. При небольших перепадах давлений в пусковом клапане и цилиндре (с учетом натяга пружины клапана) клапан периодически закрывается. Можно наблюдать характерный участок постоянного давления после начала подачи сжатого воздуха (см. рис. 1). При дальнейшем перемещении поршня и увеличении текущего объема цилиндра давление в цилиндре начинает снижаться. В момент прекращения подачи сжатого воздуха (425 град. ПКВ) на кривой давления виден характерный излом. В цикле без подачи сжатого воздуха давление в конце расширения по-

нижается до уровня ниже атмосферного, а после открытия выпускного клапана (480 град. ПКВ) увеличивается до атмосферного. На соответствующей кривой (см. рис. 2) на участке после открытия выпускного клапана наблюдается увеличение температуры.

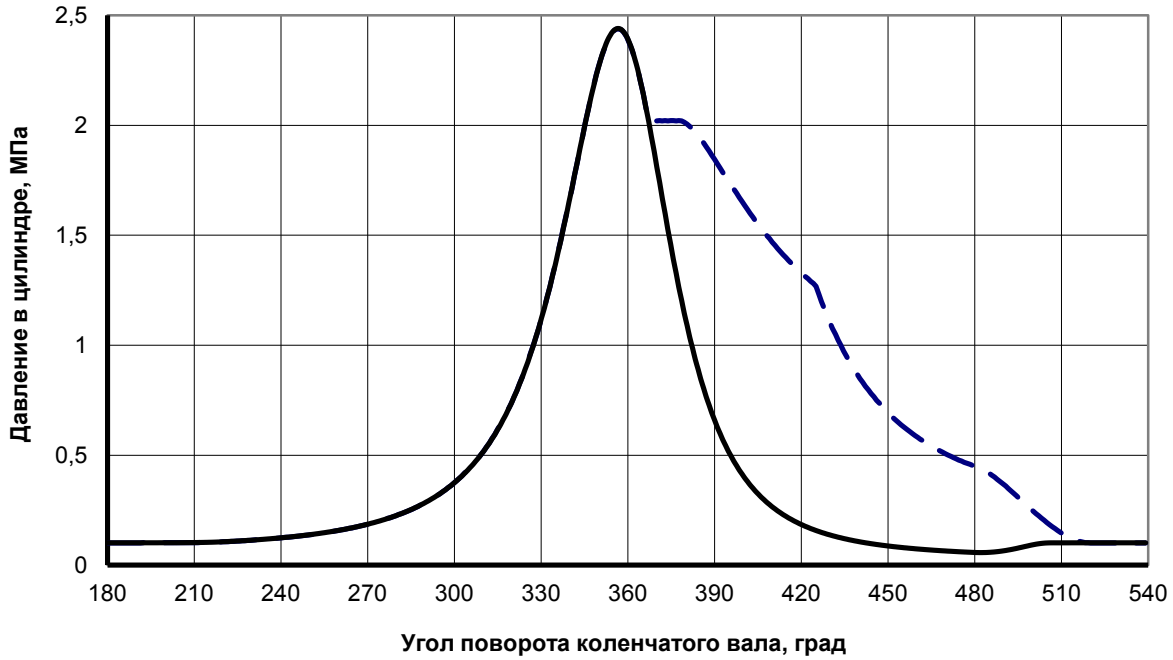


Рис. 1. Изменение давления в цилиндре в период рабочих ходов

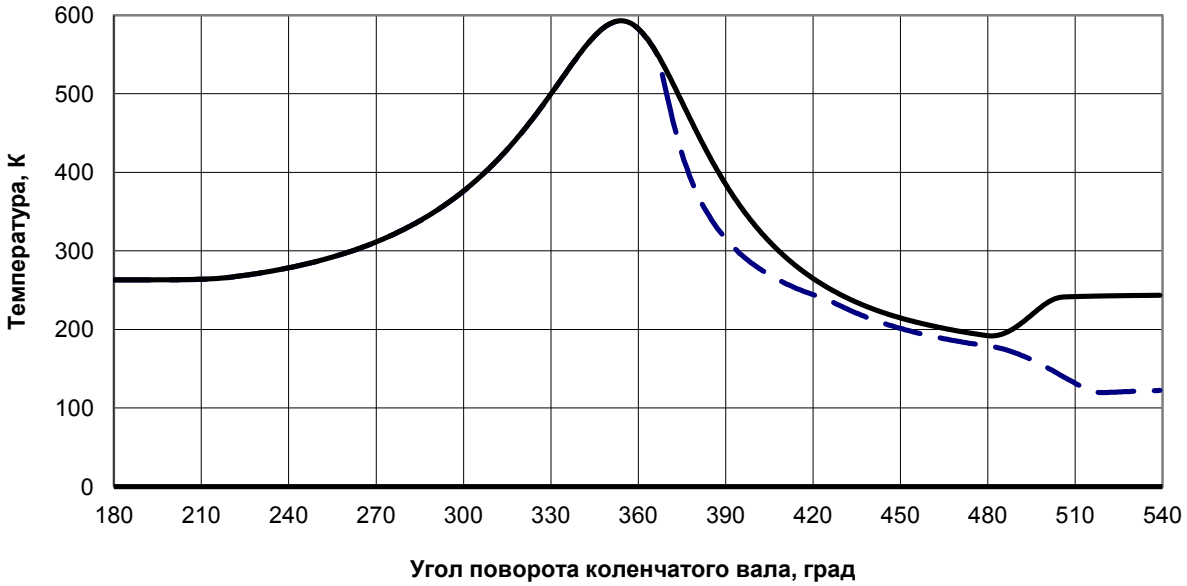


Рис. 2. Изменение средней температуры внутрицилиндрового заряда

В цикле с подачей сжатого воздуха давление в конце расширения существенно превышает атмосферное и после открытия выпускного клапана происходит интенсивное снижение давления. В момент начала подачи сжатого воздуха средняя температура в цилиндре начинает интенсивно снижаться. Можно наблюдать также интенсивное снижение температуры, совпадающее со снижением давления в цилиндре на интервале после открытия выпускного клапана.

Результаты моделирования внутрицилиндровых процессов при пуске дизеля сжатым воздухом служат основание для определения индикаторных показателей (индикаторной работы цикла, индикаторной мощности), а также мощности системы воздушного пуска. Особенности расчета названных параметров отражены в работе [5].

Расчетная модель внутрицилиндровых процессов дизеля в условиях пуска сжатым воздухом учитывает утечки заряда из цилиндра через неплотности ЦПГ, внутрицилиндровые теплообменные процессы и позволяет установить влияние параметров подачи сжатого воздуха на мощность системы воздушного пуска, и посредством этого осуществить целенаправленный выбор мероприятий повышающих эффективность запуска дизеля.

Библиографический список

1. Глаголев, Н.М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания / Н.М. Глаголев. – М.: Машгиз, 1950. – 478 с.

2. Woshni G.A. Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine // SAE Paper. 1967. № 670931. – 12 p.

3. Кадышевич, Е.Х. Исследование работы системы воздушного пуска быстроходного дизеля / Е.Х. Кадышевич, М.А. Миселев, А.К. Костин, Л.И. Михайлов // Двигателестроение. – 1980. – № 4. – С. 36–39.

4. Шароглазов, Б.А. Расчетная модель процесса пуска дизеля с электрофакельным подогревателем впускного воздуха / Б.А. Шароглазов, В.В. Шишков // Исследование силовых установок и шасси транспортных и тяговых машин: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧПИ, 1987. – С. 3–9.

5. Шишков, В.В. Повышение эффективности пуска дизеля сжатым воздухом / В.В. Шишков // Наука ЮУрГУ. Секции технических наук: материалы 65-ой научной конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ 2013. – С. 3–6.

К содержанию

УДК 656.055/.056

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ДОРОЖНЫХ ЗНАКОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ГОРОДСКИХ ДОРОГ

И.Д. Алферова

Проанализирован уровень автомобилизации в г. Челябинск и Нью-Йорк, средние скорости движения в этих городах в «часы пик». Приведен пример неэффективной организации дорожного движения с применением дорожного знака 5.15.1 «Движение по полосам». Предложено решение проблемы возникновения заторных ситуаций путем применения управляемых дорожных знаков, контролируемых в режиме реального времени интеллектуальной транспортной системой управления дорожным движением.

Ключевые слова: управляемые дорожные знаки; интеллектуальная транспортная система; организация движения; пропускная способность дорог.

Традиционно для развитых стран основные транспортные проблемы – это проблемы больших городов. Работающее население переселяется в пригород, что приводит к увеличению загруженности личным транспортом улично-дорожной сети (УДС) центральных районов города.

На сегодняшний день уровень автомобилизации крупных российских городов сравнялся с показателями 40–50-летней давности в США и 30-летней давности в странах Старого Света [3]. Но, несмотря на это, Россия испытывает те же проблемы в области дорожного движения (ДД), что и более развитые страны – сказываются более низкая пропускная способность дорожной сети, ее качество, неграмотное стратегическое планирование развития крупных городов. К тому же, внимание проблемам организации дорожного движения (ОДД) в Европе начали уделять значительно раньше, чем в нашей стране.

Строительство новых и модернизация уже существующих автомобильных дорог играет важную роль в экономическом, политическом и социально-культурном развитии города. В Челябинске в 2010–2013 годах продолжилось масштабное строительство транспортных развязок в соответствии с разработанной концепцией развития улично-дорожной сети до 2020 года, рассчитанной на уровень автомобилизации 450 автомобилей на 1000 человек. По состоянию на 08.08.2012г. в Челябинске зарегистрировано 1 млн 280 тысяч транспортных средств [4]. При этом, в настоящее время в городе проживает порядка 1 100 000 жителей. Это значит, что Челябинск достиг уровня автомобилизации 350 автомобилей на каждую тысячу жителей. В то же время, в одном из самых крупных городов США, в Нью-Йорке на одну тысячу жителей по состоянию на 2013 год приходилось 910 автомобилей [3].

Основная функция дорожного движения есть безопасность и скорость перемещения [1]. Скорость движения по нашему городу в часы пик иногда даже ниже 24 километров в час, в то время как скорость движения по городу в Нью-Йорке равняется примерно 24 милям в час. Несмотря на то, что уровень автомобилизации в городах нашей страны примерно в два раза, а в Челябинске – почти в три раза ниже, чем в развитых странах, мы наблюдаем заторы на улицах наших городов. И виной тому – неэффективная ОДД. Плохая, а порой просто неграмотная ОДД является основной причиной дорожно-транспортных происшествий (ДТП), что негативно сказывается на уровне безопасности ДД в нашей стране. Следовательно, неэффективная ОДД не позволяет дорожному движению выполнять свою основную функцию.

Известно, что в месте пересечения, примыкания или разветвления автомобильных дорог необходимо устраивать дорожные развязки, и своевременно, по мере роста интенсивности дорожного движения, переходить к более совершенному типу развязок в одном или нескольких уровнях. Несвоевременный же переход приводит к снижению пропускной способности и повышению аварийности на пересекающихся дорогах. Но, как показывает практика, и переход к более совершенному типу развязки отнюдь не гарантирует должного эффекта.

Учитывая основные цели ОДД, необходимо ввести следующее определение – пропускная способность дороги. Пропускной способностью дороги следует считать максимальное количество автомобилей, которое может пройти через поперечное сечение дороги в течение определенного отрезка времени при обеспечении заданной скорости и безопасности ДД.

Согласно исследованиям специалистов в области транспортных потоков, в частности профессора В.В. Сильянова, дороги эффективны при коэффициенте их загрузки движением (отношение интенсивности потоков к пропускной способности) не более чем на 60 %. При превышении этого предела резко падают скорости, растут потери времени, снижается уровень удобства движения и возрастает аварийность [2].

При высоких коэффициентах загрузки движением не всегда есть возможность архитектурной перестройки участка дороги или пересечения в силу исторически сложившейся застройки района. Тогда на помощь специалистам приходит грамотная организация дорожного движения. Заметим, основное слово здесь – именно грамотная ОДД.

Каждому жителю крупного города знакома ситуация, когда за затором следует практически пустой участок дороги, на котором наблюдается свободный характер движения транспортных средств (см. рис. 1). Поведение транспортного потока в данной ситуации сравнимо с характером движения жидкости при подходе к узкому месту, например, к горлышку бутылки.

Рис. 1. Эффект бутылочного горлышка

На второй фотографии (см. рис. 1) можно увидеть, как выглядит транспортный поток, попавший в такое узкое место. В красном секторе наблюдается снижение скоростей, увеличение количества автомобилей на занимаемый квадратный метр площади дороги, другими словами, движение стесненное, на дороге наблюдается предзаторное состояние. В зеленом секторе характер движения меняется, количество ТС резко сокращается, на порядок увеличиваются скорости, движение становится свободным.

Не всегда причиной эффекта «бутылочного горлышка» служат планировочные и конструктивные особенности существующих участков дорог. Очень часто на широкой, магистральной улице причиной затора становится неграмотная ОДД.

Примером такого узкого места может служить неправильная установка знаков 5.15.1 и 5.15.2 «Направление движения по полосам» примененная совместно со светофорным регулированием с дополнительной секцией для поворота налево на пересечении многополосных городских магистралей, одна из которых имеет минимум 4 полосы для движения в одном направлении (см. рис. 2).

На примере неграмотной является расстановка знаков 5.15.2 в направлении движения Юг-Север.

Для поворота налево (Юг-Запад) предусмотрена дополнительная секция и выделено две полосы: крайняя левая ТОЛЬКО НАЛЕВО и вторая слева ПРЯМО И НАЛЕВО. Дополнительная секция загорается одновременно с разрешающим зеленым в основном направлении (ПРЯМО И НАПРАВО), но перестает гореть гораздо раньше.

В результате, желающие повернуть налево и двигавшиеся по второй полосе, останавливаются у стоп-линии и ждут своей очереди, перекрывая движение тем, кто хочет с этой полосы продолжить движение прямо. Очень силен в такой ситуации человеческий фактор, когда водители, желающие повернуть налево, сознательно создают проблему, перекрывая вторую слева полосу. Они принципиально не хотят вставать в очередь на крайней левой полосе (пусть даже будут третьими от начала очереди) и перестраиваются на вторую слева полосу для ожидания включения разрешающего сигнала в дополнительной секции, чтобы проехать перекресток первыми, как только он загорится.

а)

б)

Рис. 2. Типичное пересечение с неграмотной организацией движения транспортных потоков
а) – общий вид, б) – дополнительная секция не горит, разрешающий сигнал включен только на основном светофоре

Напомним, для прямого потока в это время горит зеленый, то есть желающие повернуть налево в этом случае становятся помехой тем, кому движение разрешено, кто обладает на данный момент приоритетом. Автомобили, желающие двигаться в прямом направлении юг-север и находящиеся на второй слева полосе (ТС номер 1 и 2), а также на крайней правой полосе (ТС номер 3) вынуждены перестраиваться в единственную доступную для движения в прямом направлении полосу, тем самым увеличивая количество конфликтов (см. рис. 2). Увеличение конфликтов ведет к снижению скоростей движения и безопасности разъезда на данном участке дороги.

Основным нормативным актом, регулирующим деятельность Водителя на дорогах России являются ПДД РФ. Следующие пункты правил, относящиеся к разъезду по дополнительной секции светофора, гласят: п. 6.3: «Сигналы светофора, выполненные в виде стрелок красного, желтого и зеленого цветов, имеют то же значение, что и круглые сигналы соответствующего цвета, но их действие распространяется только на направление (направления), указываемое стрелками. При этом стрелка, разрешающая поворот налево, разрешает и

разворот, если это не запрещено соответствующим дорожным знаком. Такое же значение имеет зеленая стрелка в дополнительной секции. Выключенный сигнал дополнительной секции означает запрещение движения в направлении, регулируемом этой секцией»; п. 13.5 «При движении в направлении стрелки, включенной в дополнительной секции одновременно с желтым или красным сигналом светофора, водитель обязан уступить дорогу транспортным средствам, движущимся с других направлений» [5]. Помочь в решении рассматриваемой ситуации данные пункты не могут, т.к. в момент движения под разрешающий сигнал в дополнительной секции, для конфликтных направлений продолжает гореть запрещающий сигнал, более того, для основного направления горит зеленый, а не желтый или красный, как указано в пункте Правил. Данная ситуация в Правилах вообще не рассматривается. Отметим, что для квалифицированных специалистов по проектированию автомобильных дорог и организации дорожного движения общеизвестен факт: не следует выпускать из одной и той же полосы транспортные потоки, движение которых предусмотрено в разных фазах светофорного цикла, так как это крайне неэффективно и приводит к возникновению неразберихи и заторов. И действительно, как мы видим из рисунка 1 – в), две крайние левые полосы заняты транспортными средствами, ожидающими разрешающего сигнала в дополнительной секции, крайняя правая полоса заблокирована маршрутными ТС, остановившимися на остановочном пункте сразу за перекрестком и теми ТС, которые пропускают пешеходный поток при повороте направо. Если даже мы разграничим в пространстве транспортный и пешеходный потоки, это не освободит полностью крайнюю правую полосу. Наличие остановочного «кармана» также не решает проблему, т.к. на крупной магистрали, одной из основных в городе, поток маршрутного транспорта велик, и все маршрутные ТС, единовременно подъезжающие к остановочному пункту, не помещаются в специально обустроенный остановочный «карман». Значит, на четырехполосной магистрали в прямом направлении при разрешающем основном светофорном сигнале светофора фактически работает только одна, третья, полоса, предназначенная для движения ТОЛЬКО ПРЯМО. Пропускная способность резко сокращается и образуется затор, наблюдается вышеописанный эффект «бутылочного горлышка».

На ряду с грамотной ОДД есть еще одна важная мера снижения нагрузки на УДС больших городов – информационное обеспечение дорожного движения. В развитых странах уделяется большое внимание организации информирования участников дорожного движения о сложных транспортных ситуациях, возможных маршрутах объезда перегруженных участков и т.п. Для такого информирования применяются многопозиционные дорожные знаки, световые табло, специальные радио-, видео- и интернет-каналы.

Применение управляемых дорожных знаков является одной из важнейших перспектив совершенствования организации движения. Эти знаки становятся неотъемлемой частью автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУД). Управляемые дорожные знаки создают качественно новые возможности для организации движения, благодаря их гибкости действия и возможности, таким образом, оперативно отвечать на постоянные изменения условий дорожного движения. Управляемые знаки обеспечивают значительно большую эффективность воздействия на водителей, которые убеждаются в том, что предписания знака действительно соответствуют фактической обстановке на дороге.

Менять символ на таком знаке можно как вручную, так и автоматически. При наличии датчика и средств видеонаблюдения, установленных на данном пересечении и на некотором удалении от него происходит сбор данных о длине очереди, скопившейся перед пересечением на той или иной полосе для движения. В зоне, контролируемой АСУД, смена символа обеспечивается по команде ЭВМ в соответствии с принятым алгоритмом управления на основе данных, полученных со средств фиксации транспортного потока. Применение интеллектуальной транспортной системы (ИТС) позволит реагировать на сложившуюся транспортную ситуацию в режиме реального времени.

В рассмотренной нами ситуации эти управляемые знаки стали бы эффективным средством увеличения пропускной способности. Чтобы повысить пропускную способность, предлагается использовать управляемый дорожный знак для второй слева полосы , включив его в ИТС управления дорожным движением.

Символ, отображаемый на данном знаке по умолчанию – движение по второй слева полосе ТОЛЬКО ПРЯМО. При наличии интенсивного левоповоротного потока на крайней левой полосе начинает скапливаться очередь из желающих повернуть налево и не успевающих сделать это за время горения разрешающего сигнала в дополнительной секции.

В зависимости от данных о левоповоротном транспортном потоке, его интенсивности, о длине очереди, образовавшейся на крайней левой полосе, поступающих в командный компьютер, отображение символа на управляемом дорожном знаке может изменяться с ТОЛЬКО ПРЯМО на ПРЯМО И НАЛЕВО или ТОЛЬКО НАЛЕВО (см. рис. 3).

а) б) в)

Рис. 3. Применение управляемого дорожного знака

Таким образом, применение управляемого дорожного знака 5.15.2, отображение символа на котором меняется в режиме реального времени в зависимости от реально складывающейся дорожно-транспортной ситуации на конкретном пересечении в настоящий момент, позволит увеличить пропускную способность участка дороги и безопасность разъезда транспортных средств. Так как практически большинство крупных магистралей города имеет по четыре и более полосы для движения в каждом направлении, и во многих случаях на пересечениях наблюдается рассмотренная ранее неэффективная организация движения, следовательно, предлагающееся решение позволит снизить степень нагрузки на улично-дорожную сеть города в целом, тем самым увеличится скорость сообщения.

Библиографический список

1. Горев, А.Э. Основы теории транспортных систем учебное пособие / А.Э. Горев. – СПб.: СПбГАСУ, 2010. – 214 с.

2. Сильянов, В.В. Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения / В.В. Сильянов. – М.: Транспорт, 1977. – 303 с.

3. Сайт всемирного банка данных о количестве автомобилей на тысячу жителей. – URL: http://data.worldbank.org/indicator/IS.VEH.NVEH.P3

4. Сайт ГИБДД раздел статистических данных. – URL: http://www.gibdd.ru/stat/.

5. Действующая редакция постановления правительства «О правилах дорожного движения» от 23.10.1993 № 1090. – URL: http://www.consultant.ru/popular/pdd/.

К содержанию

УДК 656.13.08 + 656.05

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА МЕХАНИЗМА ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОГО ПРОИСШЕСТВИЯ

В.М. Гайфуллин

Для наглядности механизма дорожно-транспортного происшествия (ДТП) разработан алгоритм решения вопроса о технической возможности предотвращения наезда на пешехода в условиях темного времени суток. Установлена аварийно-опасная зона для движения пешехода.

Ключевые слова: дорожно-транспортное происшествие, алгоритм, анализ, факторы, механизм, дорожно-транспортная ситуация, процесс.

Алгоритм представляет набор правил позволяющих определить степень опасности дорожно-транспортной ситуации. В основе разрабатываемого алгоритма лежат два основных принципа математической модели:

1) водитель не имеет технической возможности предотвратить дорожно-транспортное происшествие, то есть Sa < So;

2) в момент пересечения автомобилем линии движения пешехода, пешеход может оказаться перед автомобилем и стать жертвой наезда.

Для решения вопроса о наличии технической возможности предотвратить наезд на пешехода в условиях недостаточной видимости необходим выбор данных о дорожных условиях выбранной ситуации.

Таким образом, началом построения алгоритма процесса наезда на пешехода в условиях недостаточной видимости является выбор данных о дорожных условиях из выбранной ситуации.

Таблично определяется ширина транспортного средства, его тормозные характеристики, выбирается скорость пешехода исходя из конкретной обстановки и погодных условий.

Выбранные факторы, влияющие на дорожно-транспортную ситуацию и позволяющие произвести расчет степени опасности, объединены в матрицу состояния (рис. 1).

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \text{Режим движения} & \text{Скоростной режим} \\ \text{Направление движения пешехода} & \text{Недостаточная видимость} \end{bmatrix}$$

Рис. 1. Матрица состояния

Расстояние видимости и коэффициент сцепления определяются исходя из выбранных дорожных условий.

Исходя из факта совершения дорожно-транспортного происшествия, рассчитывается остановочный путь [1]:

$$S_o = (t_1 + t_2 + 0{,}5t_3) \cdot \frac{V_a}{3{,}6} + \frac{{V_a}^2}{26 \cdot j_a};$$

S_o – расстояние от начала торможения автомобиля до его полной остановки, м;

t_1 – время реакции водителя, с;

t_2 – время срабатывания тормозного привода, с;

t_3 – время нарастания замедления транспортного средства, с;

V_a– скорость автомобиля до начала торможения, км/час;

j_a – установившееся замедление транспортного средства, м/с^2.

Определяется расстояние до места наезда в момент возникновения опасности:

$$Sa = Sв.п.$$

Устанавливается t_a – время между моментом возникновения опасности и моментом наезда, с.

На основании данных, исходя из факта совершения дорожно-транспортного происшествия, делается вывод о возможности или невозможности предотвратить дорожно-транспортное происшествие при своевременном реагировании водителя.

При исследовании режима движения сравниваются скорости в момент наезда и до начала торможения (момент возникновения опасности). В результате этого сравнения определяется значения элемента матрицы состояния, а также предварительно можно оценить возможную тяжесть последствий при наезде на пешехода при различных скоростях.

На основании этих сравнений делается вывод о том, успел ли водитель начать торможение до наезда или процесс наезда произошел на той же скорости.

В заключении сравнивается конечное положение пешехода с зоной, в которой процесс наезда считается совершенным и делается вывод о наличии и расположении аварийно-опасной зоны для движения пешехода. При наличии определяется ее конкретное положение (рис. 2).

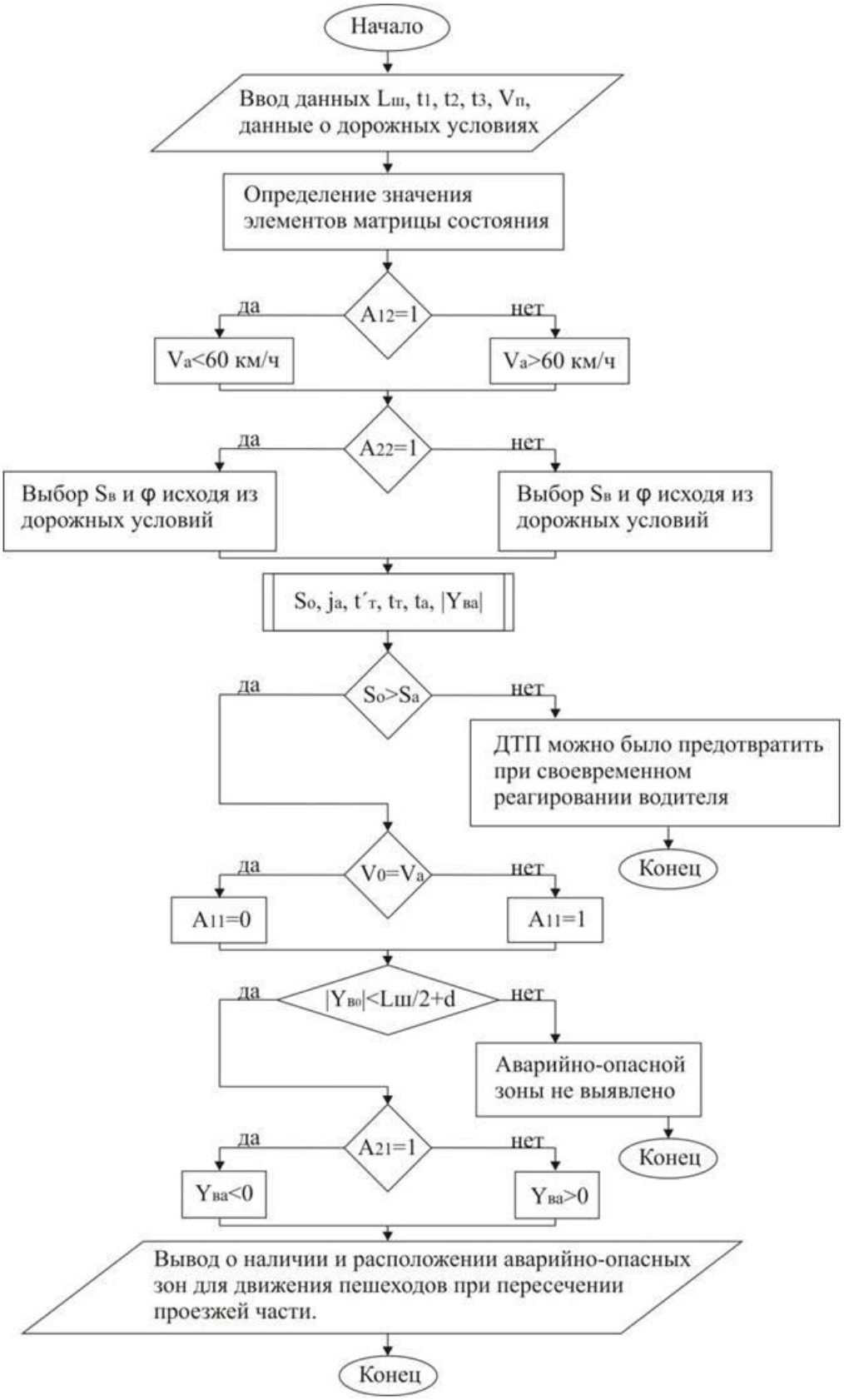


Рис. 2. Алгоритм анализа механизма дорожно-транспортного происшествия

Таким образом, с помощью алгоритма могут быть выявлены участки улично-дорожной сети, на которых даже при выполнении водителями правил дорожного движения (п.п. 14.1 и 14.2) не обеспечивается необходимый уровень безопасности дорожного движения [2], что приводит к необходимости обеспечения данных участков дополнительными техническими средствами организации дорожного движения.

Библиографический список

1. Комаров, Ю.Я. Экспертиза дорожно-транспортных происшествий в примерах и задачах / Ю.Я. Комаров, С.В. Ганзин, Р.А. Жирков, Н.К. Клепик, Д.Ю. Комаров. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 290 с.

2. Правила дорожного движения Российской Федерации. – М.: Медиасервис, 2013. – 64 с.

К содержанию

УДК 656.13.05(094)

КОММЕНТАРИИ К НЕКОТОРЫМ ИЗМЕНЕНИЯМ, ВНЕСЕННЫМ В ПОСТАНОВЛЕНИЕ СОВЕТА МИНИСТРОВ – ПРАВИТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ОТ 23 ОКТЯБРЯ 1993 г. N 1090 «О ПРАВИЛАХ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ», ОТ 22 МАРТА 2014 г. N 221

В.А. Городокин

Проанализированы некоторые изменения, внесенные в Правила дорожного движения, их целесообразность, обоснованность, практическая ценность и своевременность. Дана оценка логики измененным требованиям и технической грамотности. Показана необходимость более тщательной проработки предлагаемых изменений, вносимых в законодательные акты.

Ключевые слова: Правила дорожного движения; велосипед, мопед.

Анализируемым постановлением в Правила дорожного движения Российской Федерации внесены следующие изменения:

В пункте 1.2 абзац четвертый изложен в следующей редакции: «Велосипед» – транспортное средство, кроме инвалидных колясок, которое имеет по крайней мере два колеса и приводится в движение как правило мускульной энергией лиц, находящихся на этом транспортном средстве, в частности при помощи педалей или рукояток, и может также иметь электродвигатель номинальной максимальной мощностью в режиме длительной нагрузки, не превышающей 0,25 кВт, автоматически отключающийся на скорости более 25 км/ч».

В комментируемом измененном понятии «велосипед» следует обратить внимание на некорректный термин «рукояток». Данный термин заимствован из русскоязычного варианта текста Конвенции о дорожном движении, состоявшейся в Вене 8 ноября 1968 года. В оригинале текст Конвенции составлен на трех языках: английском, французском и русском. Все три варианта, согласно информации, заложенной в Конвенции, являются аутентичными. Вместе с тем, русский текст, как и французский (по мнению лингвистов, владеющих французским языком) являются переводом с английского языка. Более того, русский текст названной Конвенции, по большому счету, является «подстрочником», т.е. дословным переводом, и не учитывает принятой в Российской Федерации действующей терминологии. Таким образом, при технически грамотном переводе с английского языка, термин «рукояток» должен читаться, как «рычагов», действительно используемых в некоторых конструкциях двух- и трехколесных транспортных средств.

Термин же «рукоятка», согласно толковым словарям:

1. 1) Часть предмета, инструмента и т.п., за которую держатся рукой при пользовании им. 2) Часть механизма, прибора, за которую берутся рукой для приведения их в движение (Толковый словарь Ефремовой).

2. Часть инструмента, оружия, за которую его держат. Рукоятка шила. Рукоятка кинжала (Малый академический словарь).

3. 1. Часть инструмента, оружия, за которую его держат. Р. шила. Р. кинжала, ножа (Толковый словарь Кузнецова).

4. 1. Ручка (в 1 знач.) оружия, ручного инструмента. Р. кинжала. Р. молотка, заступа. 2. Часть механизма, прибора, за к-рую берутся рукой для управления, поворота. Р. штурвала, рулевого колеса. II прил. рукояточный, –ая, -ое (Толковый словарь Ожегова).

5. 1. часть ручного инструмента, за к-рую его держат. Рукоятка молотка. Рукоятка кинжала. 2. Приспособленная для держания рукой часть машины или прибора для передвижения, поворота и проч. (спец.) (Толковый словарь Ушакова).

Таким образом, подмена одного термина другим, не оказывая заметного влияния на понимание сущности объекта, тем не менее, свидетельствует о пробеле в техническом лексиконе лиц, осуществлявших перевод Конвенции и внесших изменения в Правила дорожного движения Российской Федерации.

Изменениям подверглось и понятие «пешеход». Так, согласно новому варианту, «Пешеход» – лицо, находящееся вне транспортного средства на дороге либо на пешеходной или велопешеходной дорожке и не производящее на них работу. К пешеходам приравниваются лица, передвигающиеся в инвалидных колясках без двигателя, ведущие велосипед, мопед, мотоцикл, везу-

щие санки, тележку, детскую или инвалидную коляску, а также использующие для передвижения роликовые коньки, самокаты и иные аналогичные средства». Определяющим и положительным следует признать отнесение к пешеходам лиц, использующих «для передвижения роликовые коньки, самокаты и иные аналогичные средства». Такое изменение напрашивалось достаточно давно, т.к. указанная категория лиц не была отнесена ни к пешеходам, ни к водителям и, следовательно, они не являлись юридически участниками дорожного движения, формально принимая участие в дорожном движении и являясь носителями определенных обязанностей по обеспечению безопасности движения. Более того, в Республике Беларусь на протяжении нескольких лет Правилами дорожного движения закреплено отнесение к пешеходу лица, передвигающегося «...на роликовых коньках, лыжах, на другом спортивном инвентаре».

Вместе с тем, как ранее уже указывалось автором данной статьи, в Правилах дорожного движения продолжает существовать категория лиц, находящихся на дороге, но не отнесенных к какой-либо категории. Во-первых, наличие такой категории вытекает из самого термина, согласно которому **не относится к пешеходу** лицо, «находящееся вне транспортного средства на дороге ... и не производящее на них работу». То есть существует какая-то категория лиц, находящихся на дороге, но не относящихся к пешеходам. А так как число участников дорожного движения согласно Правилам ограничено тремя категориями: водитель, пассажир, пешеход, то возникает логичный вопрос: «К какой категории следует отнести субъектов, не охватываемых понятием «пешеход»? К оставшимся двум? Во-вторых, следует дать разъяснение тому, какой смысл закладывает законодатель в понятие «не производящее на них (на дороге или пешеходной дорожке. Авт.) работу». Относятся ли к данной категории только рабочие, занятые на ремонте и реконструкции дороги, осуществляющие ее уборку и чистку? Можно ли считать «производящим на дороге работу» полицейского, регулирующего движение или сотрудника дорожно-патрульной службы ГИБДД, чьи функции также отличаются друг от друга? Допустимо ли отнести к лицу, «производящему на дороге работу», субъекта толкающего автомобиль, устанавливающего (закрепляющего) буксирный трос или жесткий буксир, или водителя, производящего замену колеса? К какой категории следует отнести лицо, привлеченное водителем транспортного средства в соответствии с требованиями п.8.12 Правил, для контроля за движением задним ходом? Этот перечень моно продолжить. По мнению автора статьи, давно назрела необходимость включения в Правила дорожного движения еще, как минимум, одной категории участников движения – «Иные лица».

Проананализируем вновь введенный термин «Полоса для велосипедистов». Согласно новой формулировке, это «полоса проезжей части, предназначенная для движения велосипедистов и на мопедах, отделенная от остальной проезжей части горизонтальной разметкой и обозначенная знаком 4.4.1 в сочетании с табличкой 8.14, расположенными над полосой». Законодателю в данной формулировке, видимо, захотелось лишний раз употребить также новый термин «велосипедист». С точки зрения русского языка, по выделенной на проезжей части специальной полосе должны двигаться не «велосипедисты», а следуя этой логике и «мопедисты», а велосипеды и мопеды, на что вполне грамотно и указано в отношении второго транспортного средства. Аналогично, не совсем грамотно говорить и о движении велосипедистов по велосипедной дорожке, равно, как было бы неверно говорить о движении по проезжей части водителей автомобилей, а не самих автомобилей. Конечно, совсем иначе следует строить предложение, в тех случаях, когда речь идет о требованиях, предъявляемых к кому бы то ни было, будь-то водитель автомобиля, мотоцикла, мопеда или велосипеда. Тогда обращение к «велосипедистам» было бы оправдано.

Не дает, видимо, законодателю покоя существующая долгое время и чрезвычайно неудачная формулировка понятия «дорога». Часть из этого понятия перекочевала в новый термин «Пешеходная дорожка», к которому будет отнесена «обустроенная или приспособленная для движения пешеходов полоса земли либо поверхность искусственного сооружения, обозначенная знаком 4.5.1.». Довольно оригинально, про мнению автора статьи, будет смотреться «приспособленная для движения пешеходов полоса земли», которую люди использовали (хотя бы несколько раз) для перехода из одной точки в другую, будь-то по полю, по лесу и т.п. Использовали, значит приспособили. Обозначив такую (даже не протоптанную) тропинку знаком 4.5.1., получим «поверхность земли» подпадающую под понятие «Пешеходная дорожка»!

Несколько хуже обстоит дело с изменениями, внесенными в п. 13.1 Правил. В измененном виде требования данного пункта имеют вид: «При повороте направо или налево водитель обязан уступить дорогу пешеходам и велосипедистам, пересекающим проезжую часть дороги, на которую он поворачивает». Проблем получилось несколько. Во-первых, в принятой формулировке законодатель не ограничил участок проезжей части, поворачивая на которую водитель обязан уступать дорогу пешеходам и велосипедистам. Следовательно, новое требование распространяется на всю протяженность проезжей части, в том числе, вплоть до следующего перекрестка или иного оговоренного Правилами места. Это абсурдно. Во-вторых, предположив (что, собственно, мы не имеем права делать), что законодатель имел в виду уступать дорогу ве-

лосипедистам и пешеходам, пересекающим проезжую часть по пешеходному переходу, расположенному в границах перекрестка, получим еще одно, но уже технически несостоятельное требование. Следует это из того, что в Правилах дорожного движения отсутствует прямой запрет пересечения велосипедистами проезжей части по нерегулируемому (регулируемому) пешеходному переходу. Косвенный запрет все же существует, но очень завуалированный. Так в п. 24.2. Допускается движение велосипедистов в возрасте старше 14 лет: ... по тротуару ... в следующих случаях: отсутствуют велосипедная и велопешеходная дорожки, полоса для велосипедистов либо отсутствует возможность двигаться по ним, а также по правому краю проезжей части или обочине». Иными словами, движение по тротуару велосипедистов в возрасте старше 14 лет запрещено в случае, если имеется возможность двигаться по краю проезжей части (обочине, велосипедной дорожке или велосипедной полосе). Соответственно, не имея права двигаться по тротуару, велосипедист не обладает и правом пересекать на велосипеде проезжую часть по пешеходному переходу. Данный запрет, с технической точки зрения, оправдан и чрезвычайно важен, т.к. разница в средней скорости движения пешехода и скорости велосипеда, двух- и трехкратная. Водитель же, приближающийся к пешеходному переходу, ориентируется на пешеходов вышедших или выходящих на проезжую часть, на их скорость и направление движения. Велосипедист, выезжающий из общей массы пешеходов, является для водителя объектом неожиданным и, зачастую, не позволяющим водителю автомобиля своевременно отреагировать на возникающую опасность для движения. Таким образом, для сохранения жизни и здоровья велосипедистов следует запретить им или пересекать проезжую часть по пешеходному переходу, или двигаться быстрее, чем основной поток пешеходов. Выполнение второго запрета, по мнению автора статьи, практически, не реализуемо. Из вышеизложенного следует, что велосипедистов, пересекающих проезжую часть по пешеходному переходу быть не должно. Если это так, то каким велосипедистам должен уступать дорогу водитель, выполняющий поворот на пересекаемую дорогу? Некорректность введенного требования следует еще и оттого, что водитель обязан «уступить дорогу пешеходам и велосипедистам, пересекающим проезжую часть дороги, на которую он поворачивает», т.е. всем пешеходам и всем велосипедистам, вне зависимости от правомерности их действий. Иными словами, уступать дорогу водитель, совершающий поворот, должен и велосипедистам и пешеходам, пересекающим проезжую часть неправомерно, т.е., во-первых, на любом участке проезжей части, вне зависимости от дальности его расположения относительно перекрестка, во-вторых, вне зависимости от того, является ли этот участок пешеходным переходом и предназначен ли он вообще

для перехода, в-третьих, без учета направления и скорости пешехода и велосипедиста, предваряющих начало движения по проезжей части и т.д. При этом, следует помнить, что «уступить дорогу», значит не создавать помех, т.е. и пешеход, нарушающий требования Правил дорожного движения, и велосипедист, задумавший повернуть налево в непосредственной близости от приближающегося транспортного средства, будут пользоваться преимуществом, а неуступивший им дорогу водитель будет неопровержимо виновен в ДТП. По мнению автора статьи, исправление в анализируемый пункт Правил необходимо внести как можно быстрее и при этом грамотно.

Возможна попытка возразить автору статьи в части указанного выше недостатка, мотивируя это тем, что законодатель имел ввиду «уступать дорогу только тем пешеходам и велосипедистам, которые пересекают проезжую часть в зоне перекрестка», т.к. анализируемый пункт относится к 13 разделу Правил, т.е. «Проезд перекрестков». Возражение заранее не принимается, т.к. множество пешеходных переходов, как обозначенных соответствующими знаками, так и необозначенных, расположено вне окончания закругления проезжих частей и, следовательно, данные пешеходные переходы находятся вне зоны перекрестка, что, тем не менее, не снимает с поворачивающего на эту дорогу водителя обязанности уступить дорогу пешеходам, пересекающим проезжую часть.

Если же законодатель вообще имел ввиду необходимость при повороте уступать дорогу велосипедам, движущимся в попутном автомобилю направлении, то и это будет неверно, т.к. взаимоотношения этих участников дорожного движения, регламентированы совсем другими пунктами Правил.

Не выдерживают критики и изменения, внесенные в п. 24.5., согласно которому «При движении велосипедистов по правому краю проезжей части в случаях, предусмотренных настоящими Правилами, велосипедисты должны двигаться только в один ряд. Допускается движение колонны велосипедистов в два ряда в случае, если габаритная ширина велосипедов не превышает 0,75 м».

С технической точки зрения, интерес представляет вторая часть (второй абзац) пункта. Во-первых, возможность двигаться по двое в ряду следует ограничивать не габаритной шириной велосипедов, а габаритами велосипедистов. Ширина спортивного и гоночного велосипеда, конструктивно имеющего узкий профиль, вполне может уложиться в обозначенные 0,75 м. Однако, габариты велосипедиста, тем более взрослого, ни при каких условиях не укладываются в заданные пределы. По существу, 0,75 м – это ширина плеч мужчины. Если добавить к этому невозможность двигаться на велосипеде строго по линии, то ширина полосы (ряда), занимаемой одним велосипедистом, достигнет 1 метра. Если же законодатель имел ввиду (т.е. мы опять

должны догадываться о том, что законодатель имел ввиду), что 0,75 м – это именно полоса, занимаемая одним велосипедистом, тогда и формулировать соответствующее требование следовало не «…габаритная ширина **велосипедов** не превышает 0,75 м», а «габариты **одного** велосипедиста…». В противном случае получилась бессмыслица, при которой условие, позволяющее двигаться по два велосипедиста в ряд (тем более при соблюдении необходимого бокового интервала между ними), никогда не будет выполнимо.

К содержанию

УДК 656.073

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ПЕРЕВОЗОК НА ОСНОВЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОБЕГОВ ТРАНЗИТНОГО ТРАНСПОРТА

З.В. Альметова, О.Н. Ларин

По результатам проведенных исследований производится оценка эффективности магистральных перевозок на основе коэффициента использования пробегов транзитного транспорта. Получены аналитические выражения для расчёта коэффициента использования пробега для межтерминальных сообщений, с использованием которых выполнен анализ влияния доли порожнего транспорта в составе транзитного потока на его эффективность.

Ключевые слова: коэффициент использования пробега транзитного транспорта,транзитные терминалы, межтерминальные сообщения.

Одним из направлений повышения эффективности транзитных перевозок является загрузка порожнего транзитного транспорта «попутными» (транзитными) грузами при его движении в обратном направлении $l^{m}_{об}$после выполнения груженой перевозки в прямом направлении $l^{г}_{пр}$. При отсутствии транзитных терминалов дозагрузка транзитного транспорта «попутным» грузом может быть осуществлена, как правило, за счёт отклонения от первоначального маятникового маршрута, протяженностью $l_{м}$, что, естественно, приводит к возрастанию планового обратного пробега транспортного средства $l_{об}$, как за счет возможного увеличения порожнего пробега $l^{x}_{об}$, связанного с заездом в пункт погрузки или возвращения после разгрузки в транзитном пункте, так и за счет возможного увеличения груженого пробега $l^{г}_{об}$:

$$l^{m}_{об} = L^{x}_{об} + l^{г}_{об}. \quad (1)$$

Организация транзитного терминала аналогичным образом, как правило, приводит к отклонению транспортного средства от прямого кратчайшего обратного маршрута, что, во-первых, увеличивает обратный пробег $l^{m}_{об}$ и, как следствие, общий пробег $l_{общ}$ транзитного транспорта:

$$l_{общ} = l^{г}_{пр} + l^{m}_{об}, \quad (2)$$

во-вторых, неоднозначно влияет на эксплуатационные показатели использования транзитного транспорта, на себестоимость перевозок, их рентабельность и пр.

В работе [2] рассмотрено влияние обратной загрузки транзитного транспорта при его отклонении от кратчайших маршрутов на показатели экономической эффективности работы транзитного транспорта. Отмечается, что при любой конфигурации новых транзитных маршрутов с обратными груженными пробегами коэффициент использования пробегаβ^{T} транзитного транспорта должен превышать значение коэффициента использования пробега β для маятникового маршрута β:

$$\beta^{T} > \beta. \quad (3)$$

Коэффициент использования пробега β рассматривается в качестве одного из основных эксплуатационных показателей, определяющего эффективность работы транспорта и влияющего на уровень тарифов за перевозку[4]. При максимальной величине коэффициента $\beta = 1$ тариф на перевозку может быть установлен по минимально допустимой для перевозчика ставке. При $\beta = 0{,}5$, что соответствует маятниковому маршруту с обратным порожним пробегом, перевозчик устанавливает такой тариф, который должен полностью компенсировать его расходы на перевозку. То есть перевозка единицы груза по маршруту с коэффициентом $\beta = 0{,}5$ для клиента будет примерно в 2 раза дороже, чем по маршруту с $\beta = 1{,}0$. Поэтому, если у перевозчика имеется возможность на обратном направлении перевозить «попутный» транзитный груз, и при этом $\beta > 0{,}5$, то у него появляется возможность либо получать дополнительный доход, либо с учетом этого дополнительного дохода снизить тарифную ставку для клиентов и обеспечить себе конкурентное преимущество на рынке.

При межтерминальных транзитных перевозках для терминалов, как правило, характерно осуществление разнонаправленных сообщений с терминалами других регионов, выполняемых с обратными груженными и порожними пробегами [1]. Произвести оценку эффективности использования таких пробегов можно через отношение суммарных груженых пробегов $L_{гр}$ по всем межтерминальным маршрутам к общему пробегу $L_{общ}$, включающему как суммарные груженые пробеги$L_{гр}$, так и порожние пробеги$L_{пр}$:

$$\beta^{T} = \frac{L_{гр}}{L_{общ}} = \frac{L_{гр}}{L_{гр} + L_{пр}}. \quad (4)$$

Общие гружёные пробеги для маятниковых маршрутов с обратными гружёными и с порожними пробегами различаются. Поэтому их суммарное значение должно учитывать кол-во выполненных ездок по каждому из таких маршрутов:

$$L_{гр} = l_{гр} \cdot n_{гр}, \quad (5)$$

$$L_{пр} = l_{пр} \cdot n_{пр}, \quad (6)$$

где $n_{гр}$ и $n_{пр}$ – количество ездок с обратными гружёными и порожними пробегами соответственно, ед.:

$$n = n_{гр} + n_{пр}, \quad (7)$$

где n – общее количество ездок, ед.

Подставляя указанные значения, выполнив преобразования с учётом, что маятниковых маршрутов расстояния гружёных и порожних пробегов равны маршрутному расстоянию: $l_{гр} = l_{пр} = l_{м}$, получим значение коэффициента использования пробега для маршрутов с порожними и груженными пробегами:

$$\beta^{T} = \frac{l_{гр} \cdot n_{пр} + 2 \cdot l_{гр} \cdot n_{гр}}{l_{пр} \cdot n_{пр} + l_{гр} \cdot n_{пр} + 2 \cdot l_{гр} \cdot n_{гр}} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{n_{гр}}{n}\right). \quad (8)$$

Выражение в скобе показывает, как будет прирастать коэффициент использования общих пробегов и, как следствие, эффективность работы транзитного транспорта в виде дополнительных гружёных ездок при наличии на смежных межтерминальных маршрутах встреченного транзитного грузопотока.

При отсутствии на смежных межтерминальных маршрутах встречного грузопотока, количество ездок с обратной загрузкой будет равно нулю: $n_{гр} = 0$, следовательно $\beta^{T} = 0{,}5$, что характерно для обычных маятниковых маршрутов. В этом случае направление транспортных средств по новому маршруту через транзитный терминал приведет только к увеличению общего пробега без синхронного повышения эффективности перевозок, так как коэффициент использования пробега на межтерминальных сообщениях останется прежним $\beta^{T} = 0{,}5$, что нецелесообразно. Стоит заметить, что при $n_{гр} = 1$ направлять транзитный транспорт через терминал также нецелесообразно, так как все транспортные средства уже максимально эффективно используются в прямом и обратном направлениях: $\beta^{T} = 1$. Исключение составляют случаи, когда интеграция транзитных грузопотоков в транзитном терминале позволит укрупнять грузовые партии для использования более эффективного подвижного состава с большей грузоподъёмностью или грузовместимостью.

При полном использовании грузоподъёмности транспортного средства в формуле (8) вместо количества гружёных ездок и общего количества ездок могут использоваться показатели минимальных и максимальных объёмов межтерминальных сообщений соответственно.

Приведённые выше граничные условия нецелесообразности организации межтерминальных сообщений через транзитные терминалы могут быть интерпретированы при помощи коэффициента неравномерности объема транзитного грузопотока по направлениям перевозок η, величина которого фактически определяет потенциальную величину количества ездок $n_{гр}$ с обратным гружёным пробегом, и имеет обратную зависимость с эффективностью транзитных перевозок. Увеличение η приводит к уменьшению количества $n_{пр}$ и наоборот, при коэффициенте η = 1, количество гружёных ездок $n_{гр}$ = 0. Поэтому для оценки эффективности межтерминальных транзитных перевозок может быть использован коэффициент неравномерности объемов транзитного грузопотока η по направлениям. Повышение эффективности межтерминальных транзитных перевозок сопровождается уменьшением коэффициента η, что может быть обеспечено только за счёт интеграции в транзитном терминале разнонаправленных по максимальному объему встречных межтерминальных грузопотоков [3].

Принимая во внимание приведенные выше доводы, можно сделать вывод, что эффект от организации транзитного терминала связан с сокращением совокупных порожних пробегов транзитного транспорта за счет интеграции объемов разнонаправленных по направлениям и регионам назначения межтерминальных сообщений. Для межтерминальных сообщений с учетом неравномерности грузопотоков по смежным направлениям целесообразно создание дополнительных транзитных терминалов, обеспечивающих интеграцию транзитных грузопотоков, для перераспределения партий грузов, оптимизации загрузки транзитного транспортного средства, сокращения непроизводительных пробегов подвижного состава.

Библиографический список

1. Альметова, З.В. Интеграция грузопотоков в транзитных транспортных узлах / З.В. Альметова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – 2012. – № 44(303). – С. 180–183.

2. Альметова, З.В., Ларин О.Н. Вопросы сокращения порожних пробегов автомобилей при транзитных грузовых перевозках / З.В. Альметова, О.Н. Ларин // Транспорт Урала. – 2012. – №4(35). – С. 54–58.

3. Альметова, З.В. Повышение эффективности эксплуатации автомобильного транспорта при транзитных грузоперевозках / З.В. Альметова, О.Н. Ларин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – 2012. – № 30(289). – С. 161–167.

4. Горяев, Н.К. Экономическая целесообразность использования транзитных провозных возможностей транспорта / Н.К. Горяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Экономика и менеджмент. – 2011. – № 41 (258). – С. 178–180.

К содержанию

УДК 621.43.001.4 + 62-233.1 + 62-233.21

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАГРУЖЕННОСТИ КОРЕННЫХ ОПОР КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Н.А. Хозенюк, А.А. Мыльников, Д.О. Клюканов

Предложена методика, позволяющая оценить точность результатов расчета нагруженности коренных опор коленчатого вала, полученных с использованием классической стержневой пространственной модели. Представлены результаты моделирования нагруженности коленчатого вала и его опор с использованием метода конечных элементов.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, коленчатый вал, пространственная стержневая модель, коренные опоры, метод конечных элементов.

Коленчатый вал и его опоры – это наиболее нагруженные элементы конструкции двигателя внутреннего сгорания, работоспособность которых часто лимитирует надежность двигателя в целом. Методы расчета, используемые в настоящее время для расчетов этих объектов, чаще всего основываются на упрощении реальной трехмерной геометрии коленчатого вала, картера двигателя некоторыми более простыми элементами. Например, при расчете нагрузок на коренные подшипники и оценке прочности коленчатого вала обычно используется стержневая модель последнего. Такой метод был предложен в свое время Тимошенко С.П. (1937 г.), Трапезиным И.И. (1938 г.) и до настоящих дней является классическим в теории расчета динамики и прочности элементов двигателей внутреннего сгорания (ДВС), несмотря на то, что подготовка исходных данных для расчетов требует проведения натурного или численного экспериментов [1]. Точность указанных методик подтверждена косвенно экспериментальными исследованиями с тензометрированием коленчатого вала.

Однако современные тенденции в двигателестроении связаны с повышением мощностей при одновременном снижении массы деталей. Это приводит к увеличению нагрузок на детали двигателя и, следовательно, к росту напряжений в них. Однако точность методов определения нагруженности коленчатого вала в изменившихся условиях не оценивалась. Во всяком случае, авторам работы такие исследования не известны.

Цель работы состоит в создании методики расчета нагруженности коленчатого вала и его опор, позволяющей оценить точность результатов расчета, полученных с применением пространственной стержневой модели коленчатого вала.

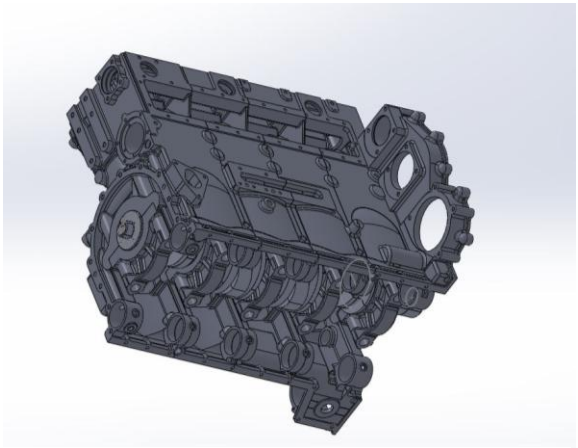


Рис. 1. Трехмерные модели коленчатого вала и картера двигателя

Предложенная методика основана на использовании трехмерных конечно-элементных моделей коленчатого вала и блок-картера (рис. 1) двигателя и рассмотрена на примере элементов четырех цилиндрового рядного двигателя типа ЧН 13/15. Модель состоит из 156404 твердотельных элементов и 329511 узлов. В качестве расчетного выбран режим номинальной мощности. Нагрузки, действующие на шатунные шейки (рис. 2), задавались распределенными по линии. Их величина рассчитывалась в системе координат, связанной с шатунной шейкой, с шагом 10 град. поворота коленчатого вала в пакете прикладных программ «Орбита» [1]. Инерционные нагрузки задавались путем использования инструмента Angular Velocity.

Плотность материала принималась равной 7800 кг/м^3. Ввиду отсутствия геометрической модели противовесов, силы инерции противовесов задавались как сосредоточенные нагрузки, приложенные к щеке. Модель коленчатого вала закреплялась в срединных сечениях коренных шеек по нижней полуокружности. Запрещались линейные смещения вдоль осей *OX, OY*. Смещение вдоль оси вращения запрещалось для одной точки вала на оси его вращения. Трехмерная модель коленчатого вала не изменяла своего положения для различных моментов времени цикла работы ДВС. Все результаты расчета опорных реакций определялись в системе координат, связанной с валом. В расчете с использованием стержневой модели коленчатого вала такая система координат является подвижной (вращающейся с угловой скоростью, соответствующей режиму работы ДВС).

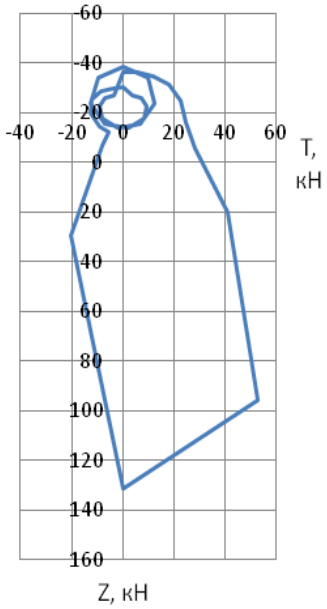


Рис. 2. Годограф нагрузок на шатунные шейки коленчатого вала

На первом этапе выполнено сравнение нагрузок на коренные опоры, полученных: а) в рамках разрезной схемы коленчатого вала методом конечных элементов при помощи программного комплекса Ansys; б) с использованием стержневой модели, рассчитанных при помощи пакета программ «Орбита». Сравнивались три варианта нагружения: 1) только силы, действующие на шатунные шейки; 2) силы, действующие на шатунные шейки совместно с силами инерции коленчатого вала (без учета противовесов); 3) силы, действующие на шатунные шейки совместно

с силами инерции коленчатого вала и противовесов. Результаты для первых трех опор коленчатого вала исследуемого двигателя представлены на рис. 3–5 (оси *OZ*, *OT* связаны с первым кривошипом).

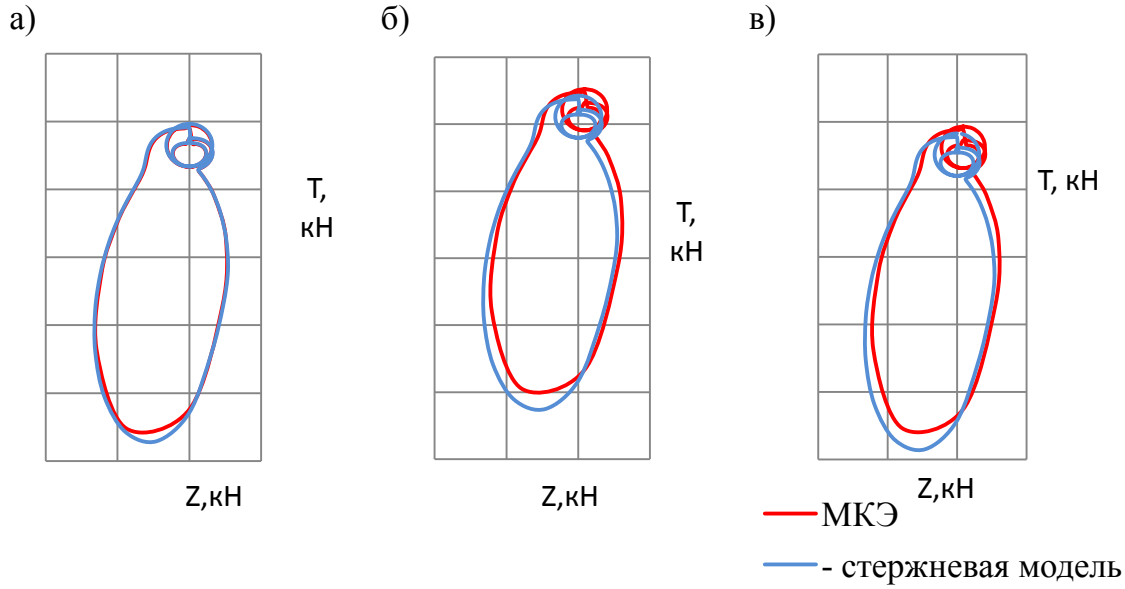


Рис. 3. Годографы сил, действующих: на первую коренную опору коленчатого вала: первый вариант нагружения (а); второй вариант нагружения (б); третий вариант нагружения (в). Разрезная схема вала

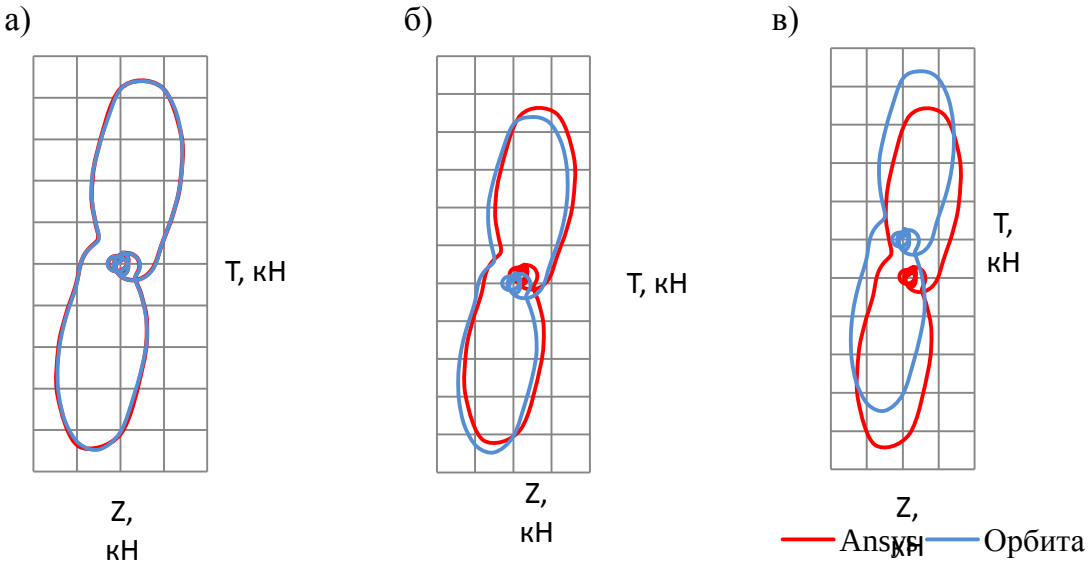


Рис. 4. Годографы сил, действующих: на вторую коренную опору коленчатого вала: первый вариант нагружения (а); второй вариант нагружения (б); третий вариант нагружения (в). Разрезная схема вала

На втором этапе сопоставлены нагрузки на коренные опоры, полученные с использованием неразрезной трехмерной конечно-элементной модели коленчатого вала и ее стержневого аналога. На рис. 6 представлены результаты расчетов для первого и третьего вариантов нагружения, описанных выше.

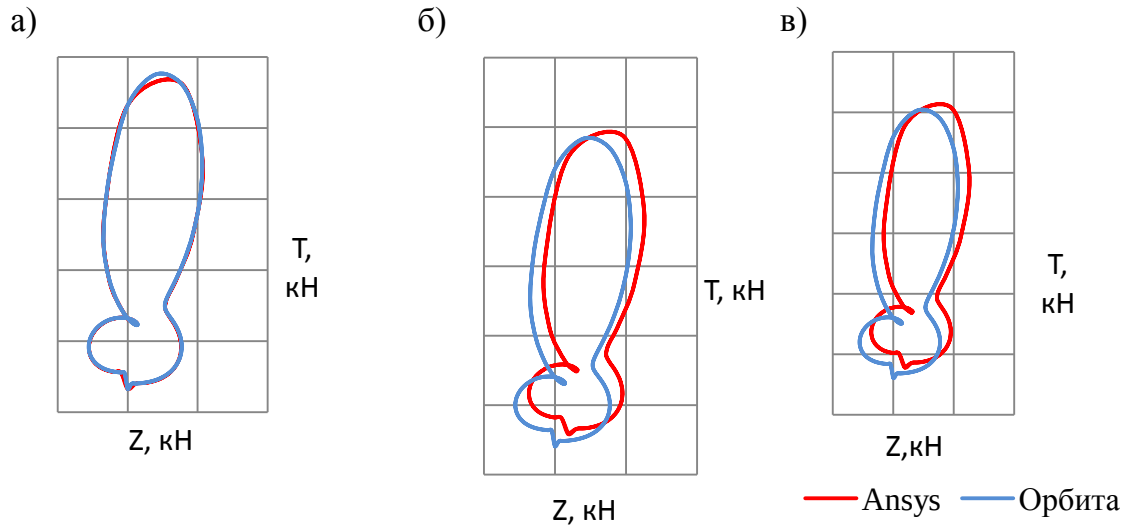


Рис. 5. Годографы сил, действующих: на третью коренную опору коленчатого вала: первый вариант нагружения (а); второй вариант нагружения (б); третий вариант нагружения (в). Разрезная схема вала

Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) нагрузки, действующие на опоры коленчатого вала, полученные при помощи рассмотренных методик, в целом близки;

2) при действии только сил, передаваемых от шатунов, результаты расчета нагрузок на опоры коленчатого вала с использованием модели сосредоточенных масс и модели с распределенной массой практически совпадают. Но при учете действия распределенных по объему сил инерции отличая значительнее (интегральная ошибка достигает 10 %);

3) при расчете нагрузок методом конечных элементов силы от шатунов допустимо моделировать нагрузками, распределенными по линии, а действие противовесов – сосредоточенными силами.

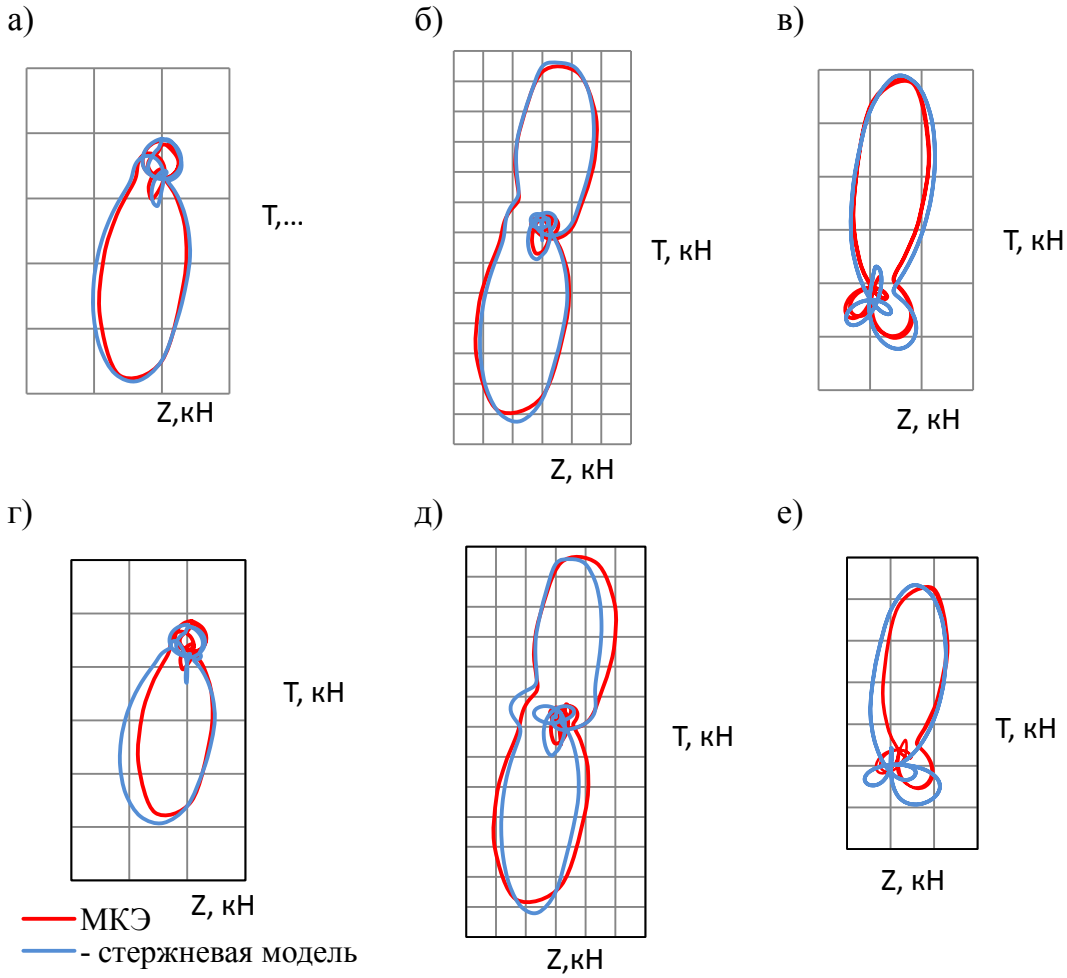


Рис. 6. Годографы сил, действующих: на первую (а), г)); вторую (б), д); третью (в), е) опоры коленчатого вала. а), б), в) – первый вариант нагружения; г), д), е) – третий вариант нагружения. Неразрезная схема вала

Анализ приведенных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1) нагрузки, действующие на опоры коленчатого вала, полученные при помощи рассмотренных методик, в целом близки;

2) при действии только сил, передаваемых от шатунов, результаты расчета нагрузок на опоры коленчатого вала с использованием модели сосредоточенных масс и модели с распределенной массой практически совпадают. Но при учете действия распределенных по объему сил инерции отличая значительнее (интегральная ошибка достигает 10 %);

3) При расчете нагрузок методом конечных элементов силы от шатунов допустимо моделировать нагрузками, распределенными по линии, а действие противовесов – сосредоточенными силами.

На основе предложенной конечно-элементной модели вала возможно моделирование системы «коленчатый вал в упруго-податливом корпусе», что позволит получить наиболее точную оценку сил, действующих на опоры коленчатого вала, с учетом реальной податливости элементов конструкции ДВС, несоосностей расположения подшипников и шеек, связанных с технологическими допусками и других параметров без привлечения существенных упрощающих допущений. Это позволит оценить точность методов расчета нагруженности опор коленчатого вала, используемых в настоящее время.

Рассмотренная методика может применяться при моделировании тяжелонагруженных гидродинамических трибосопряжений ДВС, методы расчетов которых подробно изложены в работах [3]–[6].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ НК-–13–08–008450).

Библиографический список

1. Мыльников, А.А. Экспериментальные исследования упругих характеристик коленчатого вала и блок-картера четырехцилиндрового рядного двигателя типа ЧН 13/15 / А.А. Мыльников // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2012. – Вып. 16. – № 29 (205). – С. 65–70.

2. Пакет прикладных программ «Орбита». Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ: 940513; правообладатель Южно-Уральский Государственный университет; зарег. 16.12.1994.

3. Рождественский, Ю.В. Применение современных технологий проектирования при разработке и форсировании дизельного двигателя / Ю.В. Рождественский, В.С. Мурзин, А.П. Маслов, В.В. Мальцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 44–47.

4. Задорожная, Е.А. Расчет сложнонагруженных трибосопряжений высокофорсированного дизеля / Е.А. Задорожная, И.Г. Леванов, С.А. Пырьев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 12. – С. 42–47.

5. Рождественский, Ю.В. Решение задач оптимизации трибосопряжений поршневых и роторных машин с использованием алгоритма сохранения массы / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов, А.А. Дойкин, М.А. Макарихин // Трение и смазки в машинах и механизмах. – 2011. – № 8. – С. 38–43.

6. Рождественский, Ю.В. Методика расчета системы коренных подшипников коленчатого вала с учетом податливости блок-картер двигателя / Ю.В. Рождественский, Н.А. Хозенюк, А.А. Мыльников // Трение и смазки в машинах и механизмах. – 2011. – № 12. – С. 40–45.

К содержанию

УДК 621.436

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЖЕКТОРА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ДИЗЕЛЯ

А.Н. Помаз

Рассмотрены функциональные и конструктивные особенности системы эжекционного охлаждения наддувочного воздуха в дизеле с газотурбинным наддувом. Определены газодинамические и геометрические параметры газового эжектора системы.

Ключевые слова: эжектор и его элементы, параметры газовых потоков, расходы газа и охлаждающего воздуха, коэффициент эжекции.

Введение

Анализ параметров рабочего цикла, состояния наддувочного воздуха после охладителя наддувочного воздуха (ОНВ) и отработавших газов на выходе из турбины турбокомпрессора по внешней характеристике дизеля свидетельствует, что резервы по использованию энергии отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу, еще не исчерпаны.

Потребность в снижении мощности источника охлаждающего агента привела к необходимости создания воздушного потока через ОНВ с помощью эжектора, утилизирующего теплоту отработавших газов дизеля. Для создания эффективно функционирующего эжектора необходимо разработать методику его расчета, учитывающую особенности работы его в системе газотурбинного наддува дизеля.

Особенности функционирования исследуемой системы эжекционного охлаждения наддувочного воздуха

В исследуемой системе эжекционного охлаждения наддувочного воздуха (рис. 1) воздух из атмосферы поступает в компрессор 3. В компрессоре его давление и температура возрастают. После компрессора воздух направляется в ОНВ 2, где теплота от наддувочного воздуха отводится охлаждающим воздухом, циркулирующим через матрицу охладителя из окружающей среды. Поток охлаждающего воздуха через матрицу ОНВ создается эжектором 6. После охлаждения в ОНВ 2 воздушный поток от компрессора 3 направляется во впускной трубопровод 1 и далее в цилиндры дизеля. Поток отработавших газов из цилиндров дизеля поступает через выпускной трубопровод в корпус турбины 4 турбокомпрессора, где тепловая энергия отработавших газов преобразуется в механическую энергию вращения колеса турбины. Затем поток отработавших газов направляется в эжектор 6.

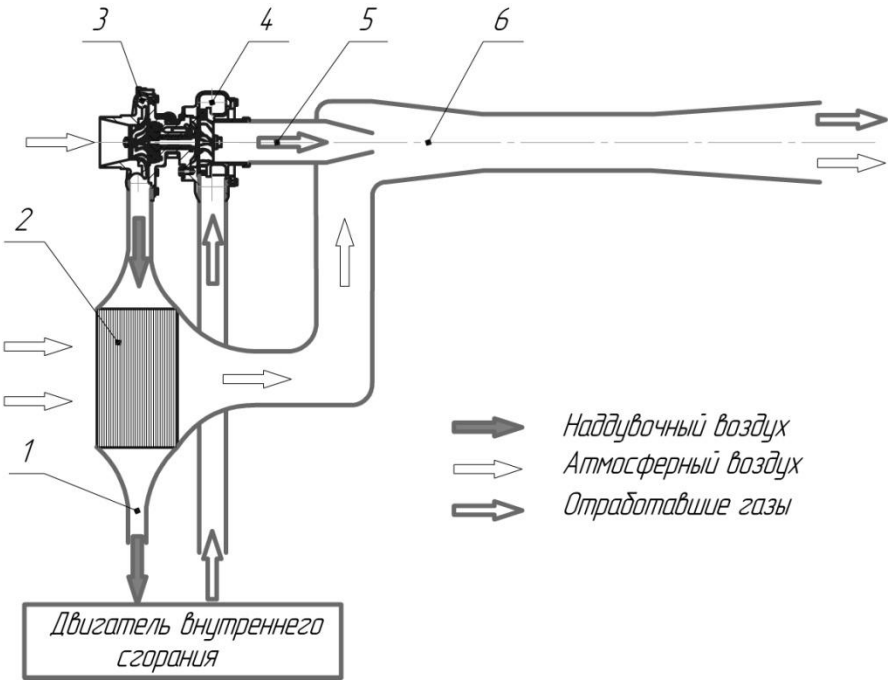


Рис. 1. Схема системы эжекционного охлаждения наддувочного воздуха в дизеле: 1 – впускной трубопровод, 2 – охладитель наддувочного воздуха (ОНВ), 3 – компрессор, 4– турбина, 5 – выпускной трубопровод, 6 – эжектор

Методика определения газодинамических и геометрических параметров эжектора

В рассматриваемом эжекторе выделяют конструктивные элементы: сопло 1 высоконапорных (эжектирующих) отработавших газов, сопло 2 низконапорного (эжектируемого) охлаждающего воздуха, смесительная камера 3 и диффузор 4 (рис. 2).

Через сопло 1 в эжектор поступают отработавшие газы с давлением P_1, большим, чем давление P_2 охлаждающего воздуха прошедшего через охладитель. При сужении канала скорость отработавших газов увеличивается, а давление P_1 уменьшается и становится меньше давления охлаждающего воздуха поступающего в ОНВ. В результате возникающего перепада давлений охлаждающий воздух после ОНВ устремляется в камеру смешения эжектора, где происходит увеличение его скорости за счет передачи части энергии от эжектирующих отработавших газов и рост кинетической энергии потока.

К окончанию процесса смешения скорость и давление эжектирующих отработавших газов и эжектируемого охлаждающего воздуха в газовой смеси практически выравниваются. При этом давление в смеси составляет значение P_3. Это происходит благодаря наличию диффузора, в котором скорость смеси падает, а давление увеличивается, т.е. часть кинетической энергии превращается в потенциальную. Процесс приведения в движение охлаждающего воздуха под действием разрежения, создаваемого отработавшими газами, движущимися с большой скоростью, называют эжектированием.

Одним из главных параметров эжектора является коэффициент эжекции - отношение расхода эжектируемого газа к эжектирующему. Расход эжектирующего газа может быть меньше, чем эжектируемого. Коэффициент эжекции определяется формулой [1]:

$$q = \frac{G_2}{G_1}, \quad (1)$$

где q – коэффициент эжекции,

G_1 – расход эжектирующего газа, кг/с,

G_2 – расход эжектируемого газа, кг/с.

Например, если в исследуемой системе охлаждения надувочного воздуха на номинальном режиме работы дизеля расход наддувочного воздуха составляет $G_в$ = 0,3 кг/с, то для понижения его температуры на 55 ^{0}C требуется расход охлаждающего воздуха G = 0,225 кг/с, соответственно требуется коэффициент эжекции не менее 0,75.

Основные трудности при расчете эжектора заключаются в определении параметров газовой смеси на выходе из смесительной камеры по параметрам газов до смешения. Для рассмотрения параметров состояния газовых потоков введем следующие допущения:

– при определении параметров потока на выходе из камеры особенности процесса смешения не учитываются;

– не учитываются потери, возникающие в процессе смешения, и особенности механизма передачи энергии.

При рассмотрении основных уравнений не оговариваются никакие условия о необратимости процессов. Для расчета эжектора использована методика Успенского-Кузнецова [2]. В качестве исходных данных примем:

1) G_2 = 0,225 – расход эжектируемого охлаждающего воздуха, кг/с,

2) q = 0,75 – коэффициент эжекции,

3) Δp_2 = 0,005 – сопротивление матрицы ОНВ по охлаждающему воздуху, МПа,

4) p_3 – давление в эжекторе перед входом в диффузор, МПа.

Определим напор, создаваемый эжектором без диффузора:

$$H_x = p_3 - \Delta p_2 \quad (2)$$

Расход эжектирующих отработавших газов составит:

$$G_1 = \frac{G_2}{q} \quad (3)$$

Находим оптимальное отношение площади цилиндрической смесительной камеры к площади выходного сечения сопла:

$$m = 2(1+q)^2 \quad (4)$$

Динамический напор эжектирующей струи отработавших газов определится:

$$H_1 = H_x \cdot m \quad (5)$$

Давление эжектирующих отработавших газов перед соплом:

$$p_0 = 1{,}1 \cdot H_1 \quad (6)$$

Скорость истечения отработавших газов из сопла:

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot H_1}{\rho}} \quad (7)$$

где ρ – плотность отработавших газов на выходе из сопла.

Площадь выходного сечения сопла:

$$F_1 = \frac{G_1}{\rho_1 \cdot w_1} \quad (8)$$

Диаметр выходного сечения сопла:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi}} \quad (9)$$

Площадь сечения цилиндрической смесительной камеры:

$$F_3 = F_1 \cdot m \quad (10)$$

Диаметр выходного сечения цилиндрической смесительной камеры:

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_3}{\pi}} \quad (11)$$

Скорость газовой смеси на выходе из смесительной камеры:

$$w_3 = \frac{G_3}{\rho_3 \cdot F_3} \quad (12)$$

где G_3 – расход газовой смеси на выходе из смесительной камеры,

ρ_3 – плотность газовой смеси.

Давление газовой смеси на выходе из диффузора:

$$p_4 = p_3 + \varphi \cdot \frac{\rho_3 \cdot w_3^2}{2} \quad (13)$$

где φ – коэффициент восстановления давления газовой смеси в диффузоре.

Площадь выходного сечения диффузора:

$$F_4 = F_3 \cdot S \quad (14)$$

где S – отношение площадей выходного сечения к входному сечению диффузора.

Диаметр выходного сечения диффузора:

$$D_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_4}{\pi}} \quad (15)$$

Скорость потока газовой смеси на выходе из диффузора:

$$w_4 = \frac{w_3}{S} \tag{16}$$

Число Рейнольдса для потока газовой смеси на выходе из диффузора:

$$\mathrm{Re} = \frac{w_4 D_4}{\nu} \tag{17}$$

где ν – динамическая вязкость.

Расстояние от сопла до места соприкосновения расширяющейся эжектирующей струи отработавших газов со стенками цилиндрической смесительной камеры:

$$x''' = D_1\left[4(1+q)-1{,}8\right] \tag{18}$$

Длина смесительной камеры от места соприкосновения струи с ее стенками до диффузора:

$$l_{\text{см}} = 2{,}5 \cdot D_3 \tag{19}$$

Расстояние от сопла до входа в цилиндрическую смесительную камеру:

$$l_1 = x''' - 0{,}5 \cdot D_3 \tag{20}$$

Длина цилиндрической смесительной камеры:

$$l_2 = x''' + l_{\text{см}} - l_1 \tag{21}$$

Длина диффузора эжектора

$$l_3 = \frac{D_4 - D_3}{2tg\dfrac{\alpha_2}{2}} \tag{22}$$

где α_2 – угол раскрытия диффузора, град.

В результате использования приведенной методики расчета определяются основные геометрические параметры профиля проточной части эжектора.

Наибольшее давление имеют отработавшие газы в эжектирующем сопле, на выходе из сопла их давление резко падает в результате смешения с охлаждающим воздухом (рис. 2). Неравномерно давление по сечению струи. В центре струи давление ниже, а в конце камеры смешения давление потока выравнивается.

Система эжекционного охлаждения обеспечивает высокую эксплуатационную надежность. Такая система автоматически приспосабливается к температуре окружающего воздуха, обладает простотой конструкции и отсутствием подвижных деталей. Использование эжекционной системы охлаждения сопровождается разбавлением отработавших газов воздухом и снижению их температуры, в результате чего улучшаются экологические показатели. Эжекционная система охлаждения наддувочного воздуха снижает потери мощности дизеля на функционирование системы газообмена.

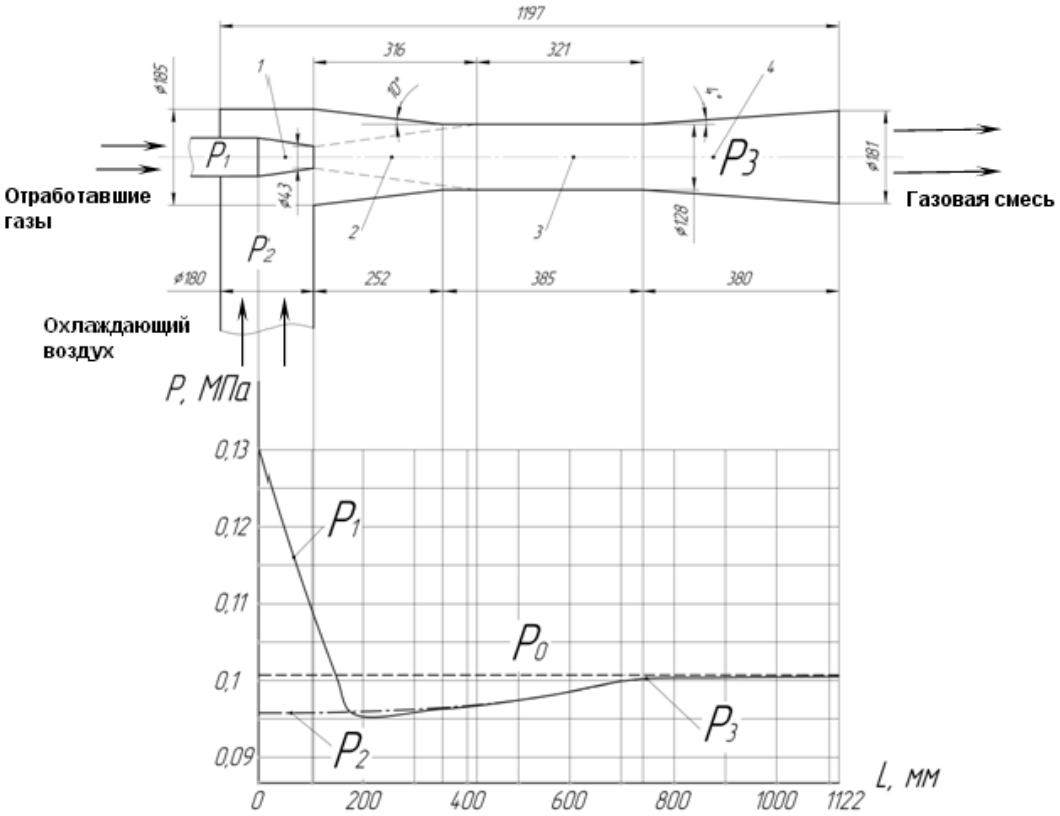


Рис. 2. Геометрические параметры профиля проточной части элементов эжектора и характер изменения давлений газовой смеси и ее составляющих: 1 – сопло эжектирующих отработавших газов, 2 – сопло эжектируемого охлаждающего воздуха из окружающей среды, 3 – смесительная камера эжектора, 4 – диффузор,P_0 – давление окружающей среды, равное 0,1013 МПа

Выводы

Наличие достаточной располагаемой энергии отработавших газов позволяет использовать ее в эжекционном устройстве для обеспечения циркуляции охлаждающего воздуха через матрицу ОНВ.

В соответствии с предложенной методикой были определены основные газодинамические и геометрические параметры эжектора в системе эжекционного охлаждения дизеля для номинального режима работы.

Геометрические и функциональные параметры эжектора позволяют разместить его в моторном отделении машины и обеспечивают заданную степень охлаждения наддувочного воздуха при работе дизеля по внешней характеристике.

Библиографический список

1. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.

2. Успенский, В.А. Струйные вакуумные насосы / В.А. Успенский, Ю.М. Кузнецов. – М.: Машиностроение, 1973. – 144 с.

К содержанию

МЕХАНИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УДК 621.922:539.4

ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА ИЗНОСА АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА С ПОЗИЦИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ

Д.В. Ардашев

Статья содержит результаты теоретических исследований износа абразивного зерна с позиций кинетической теории прочности твердого тела. Разработанная методом конечных элементов модель взаимодействия единичного абразивного зерна с обрабатываемой заготовкой позволила получить величины напряжений в абразивном зерне в процессе резания. Определена долговечность абразивного материала для различных технологических условий работы шлифовального круга.

Ключевые слова: термофлуктуационный механизм износа абразивного зерна, кинетическая теория прочности, износ абразивного зерна.

Процесс шлифования, как известно, сопровождается взаимным износом двух взаимодействующих тел, однако абразивный материал разрушается менее интенсивно и в гораздо меньших объемах. В технической литературе имеется большое количество эмпирико-теоретических исследований посвященных вопросу износа и разрушения абразивных зерен в процессах шлифования. Это работы Т.Н. Лоладзе и Г.В. Бокучавы [1, 2], Е.Н. Маслова [3] и Л.Н. Филимонова [4], Л.Л. Мишнаевского [5] и др. Все они содержат исследования различных механизмов износа абразивных зерен в процессах шлифования и содержат эмпирические формулы для нахождения этих величин в определенных условиях взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала заготовки.

С технологической точки зрения характеристикой интенсивности и степени износа абразивного инструмента, является термин «период стойкости», под которым подразумевается время эффективной работы инструмента, в течение которого он соответствует определенным требованиям [6, 7].

В начале прошлого века обнаружилась «временная» зависимость прочности: один и тот же образец, разорванный за короткое время, обладает более высокими прочностными свойствами, чем образец разорванный медленно [8]. Модель временной характеристики долговечности τ от напряжения σ, действующего в материале и температуры нагружаемого тела T имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right)}, \qquad (1)$$

где τ_0 – период тепловых флуктуаций одного атома тела; U_0 – величина энергоактивационного барьера (энергия активации); γ – коэффициент перенапряжения материала тела; k – постоянная Больцмана.

Износ абразивного зерна процесс длительный во времени, суммарный износ формируется по результатам многократного контакта единичного абразивного зерна с обрабатываемым материалом. Однако абразивное зерно в процессе шлифования подвергается циклическому нагружению: число циклов нагружения, их длительность и период зависят от кинематических и геометрических характеристик схема шлифования.

С.Н. Журковым получена формула временного показателя долговечности τ для тела, находящегося в сложнонапряженном состоянии – под действием циклических нагрузок:

$$\tau_{\text{ц}} = N_{ц} t_0 \frac{I_0\left(i, \frac{\gamma\sigma}{2kT}\right)}{exp\frac{\gamma\sigma}{2kT}}, \qquad (2)$$

где $N_{ц}$ – число циклов, воспринимаемое телом; t_0 – время длительности одного цикла; I_0 – функция Бесселя от мнимого аргумента (модифицированная функция Бесселя); γ – элементарный объем материала, в котором происходит единичный акт разрыва межатомных связей; σ – величина напряжения в нагружаемом теле; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура деформируемого тела.

Параметры уравнения (2) для условий работы абразивного зерна возможно определить либо экспериментально, либо из технической литературы. Учитывая, что параметры абразивного зерна (величина и интенсивность образования площадки затупления, угол заострения, прочностные характеристики и т. д.), испытывающие столь сложное многоцикловое термомеханическое нагружение, оказывают существенное влияние на величину напряжения в теле зерна, тем не менее, фиксируя указанные выше аргументы можно получить величину временного показателя долговечности абразивного зерна под нагрузкой, соответствующей определенным условиям работы шлифовального круга.

Для определения величины напряжений в абразивном материале, соответствующей различным условиям шлифования, необходимо создать конечно-элементную модель, провести серию численных экспериментов в пакете твердотельного моделирования ANSYS. Результаты этого моделирования приведены на рис. 1 и в табл. 1.

Анализируя рис. 2, 3 можно заключить, что между технологическими условиями и величиной эквивалентных напряжения, возникающих в теле зерна имеется четкая зависимость. Так, в начальный период работы зерна на нем образуется и начинает постоянно увеличиваться площадка затупле-

ния. Это приводит к снижению напряжения в материале, что соответствует периоду приработки и образованию на зерне «наилучшей», с точки зрения стойкости зерна, величины площадки затупления, при которой напряжения в теле зерна минимальны. Дальнейший рост площадки приводит к увеличению напряжения в зерне, тем более, когда величина площадки сопоставима с размерами самого зерна. Это объясняется уменьшением количества связей в элементарном объеме зерна, воспринимаемых напряжения, а впоследствии существенным увеличением напряжения, действующего на одну связь. Влияние зернистости абразивного зерна (его геометрических размеров) на величину напряжения в зерне также однозначно: с увеличением номера зернистости, при одинаковых температурах и величинах площадки затупления зерна меньшего размера испытывают большие напряжения. Это объясняется опять же наличием в крупных зернах большего количества межатомных связей, воспринимающих внешнюю нагрузку. Долговечность абразивного зерна, рассчитанная по формуле (6) для различных условий его работы приведены в табл. 2.

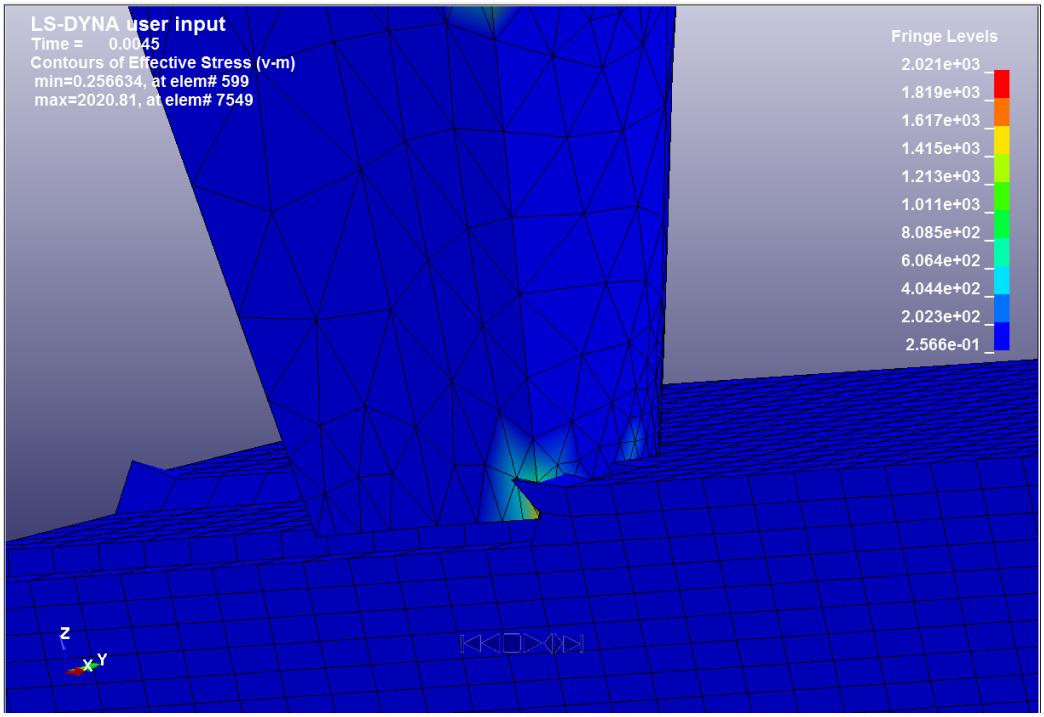


Рис. 1. Результаты моделирования взаимодействия
абразивного зерна с обрабатываемым материалом

Таблица 1

Величина эквивалентного напряжения в абразивном зерне в различных технологических условиях

Температура, ºС	Зернистость	Площадка затупления $l_{зат}$, мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Эквивалентные напряжения σ, МПа							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	F90	2097	913	1131	–	–	–	–	–
	F60	1944	887	677	809	1053	–	–	–
	F54	870	653	369	416	460	500	–	–
	F46	500	470	309	241	291	348	398	573
400	F90	1191	616	943	–	–	–	–	–
	F60	871	532	507	669	752	–	–	–
	F54	828	489	361	327	332	408	–	–
	F46	488	387	268	211	246	236	308	374
600	F90	1172	203	252	–	–	–	–	–
	F60	631	154	175	92	93	107	–	–
	F54	509	395	203	168	172	201	142	–
	F46	417	231	150	119	104	138	147	155
800	F90	404	89,3	76	–	–	–	–	–
	F60	388	67	47	42	38	49	–	–
	F54	290	201	45	32	28	46	57	–
	F46	246	177	88	27	23	46	59	67
1000	F90	177	49,7	72	–	–	–	–	–
	F60	155	39	30	30	30	28	–	–
	F54	110	52	36	24	20	39	35	–
	F46	109	41	24	19	29	34	55	63

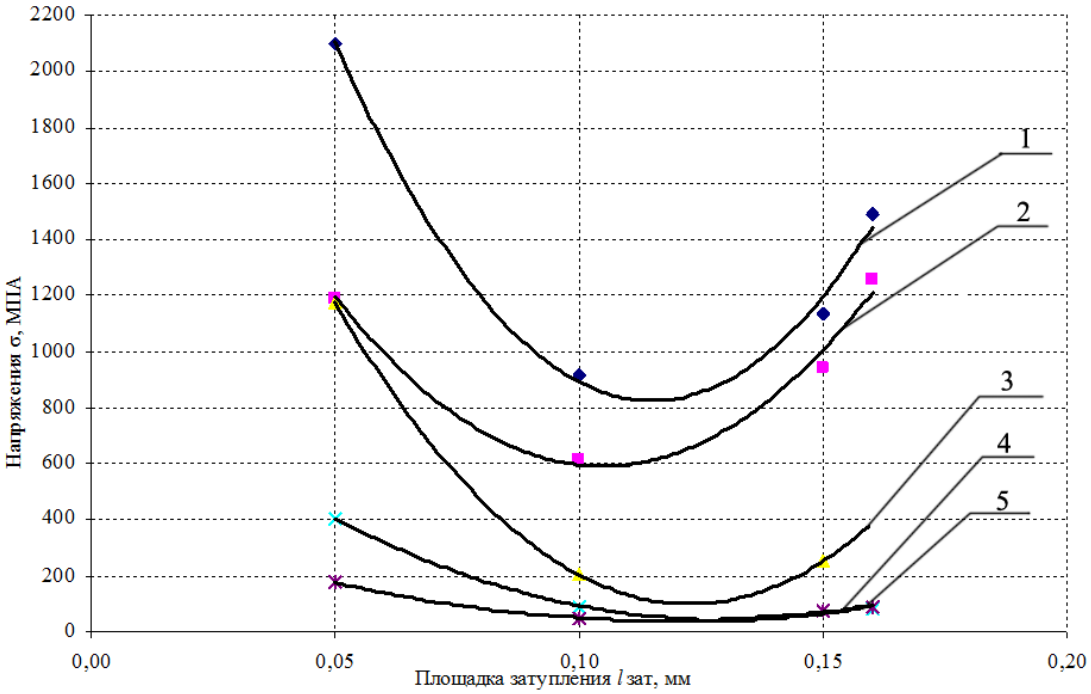


Рис. 2. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F90 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

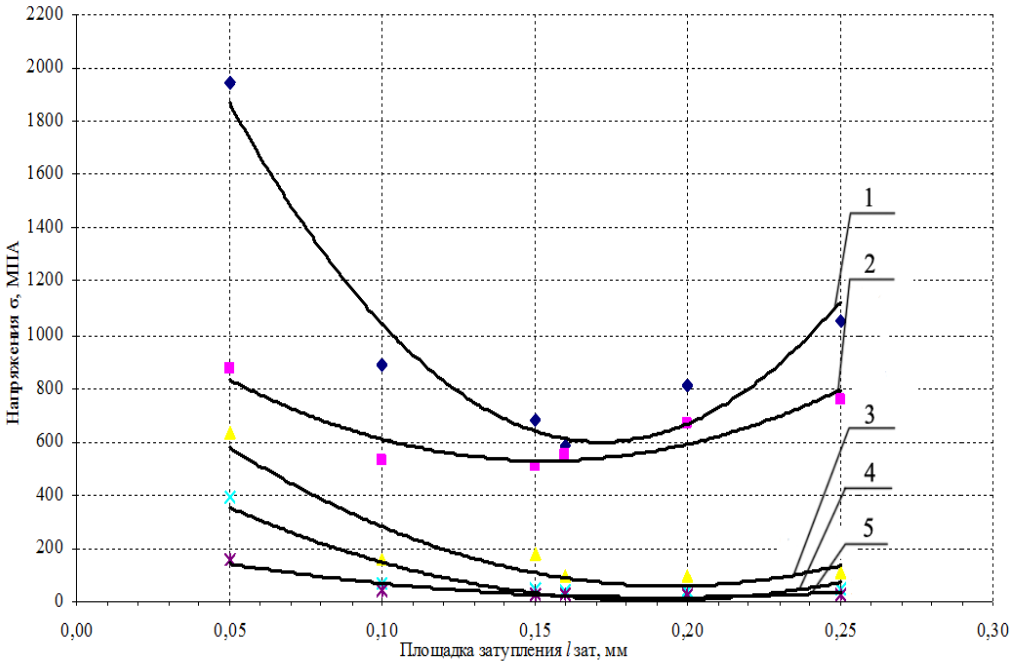


Рис. 3. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F60 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

Таблица 2

Долговечность абразивного зерна в различных условиях

Температура, °С	Зернистость	Площадка затупления $l_{зат}$, мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Временной показатель долговечности τ, с							
200	F90	0,23	0,55	0,40	–	–	–	–	–
	F60	0,24	0,62	0,69	0,45	0,36	–	–	–
	F54	0,36	0,65	0,93	1,03	0,78	0,48	–	–
	F46	0,48	0,49	0,61	0,69	0,63	0,58	0,54	0,45
400	F90	0,37	0,67	0,55	–	–	–	–	–
	F60	0,43	0,91	0,99	0,63	0,42	–	–	–
	F54	0,44	0,93	1,24	1,65	1,30	0,92	–	–
	F46	0,58	0,65	0,79	0,90	0,83	0,84	0,73	0,66
600	F90	0,42	0,86	0,45	–	–	–	–	–
	F60	0,58	1,00	1,17	0,84	0,46	–	–	–
	F54	0,65	1,26	1,67	2,16	2,07	1,61	–	–
	F46	0,72	0,98	1,25	1,43	1,55	1,52	1,43	1,22
800	F90	0,81	1,62	1,18	–	–	–	–	–
	F60	0,83	1,27	1,54	1,36	1,10	–	–	–
	F54	0,97	1,50	1,92	2,25	2,03	1,64	–	–
	F46	1,06	1,60	2,46	3,20	3,37	3,06	2,42	1,70
1000	F90	1,42	2,57	0,78	–	–	–	–	–
	F60	1,54	2,21	2,46	1,93	1,27	–	–	–
	F54	1,56	2,00	2,49	2,61	1,99	1,66	–	–
	F46	1,90	3,11	3,66	3,86	3,66	3,31	2,74	2,09

Влияние степени износа абразивного на его долговечность однозначна: на зависимости (рис. 4, 5) можно выделить три основных участка – начальный период, когда с обрабатываемой заготовкой контактирует острое зерно и на нем начинает образовываться площадка затупления, период стабильной работы, на котором площадка достигает своего оптимального значения, при котором долговечность абразивного зерна максимальная и период интенсивного износа зерна, при котором площадка увеличивается до размеров, сопоставимых с размерами самого зерна и происходит существенное уменьшение его долговечности.

Увеличение температуры в зоне контакта абразивного зерна с обрабатываем материалом приводит к увеличению величины долговечности абразивного зерна: это связано со снижением прочностных свойств обрабатываемого материала [9]. Абразивные зерна больших размеров (зернистостей) обладают большей долговечностью, нежели зерна меньших размеров, работающих в тех же технологических условиях. Так, увеличение размеров зерна в 1,5 и 2,5 раза увеличивает долговечность в 2,4 и 4 раза соответственно.

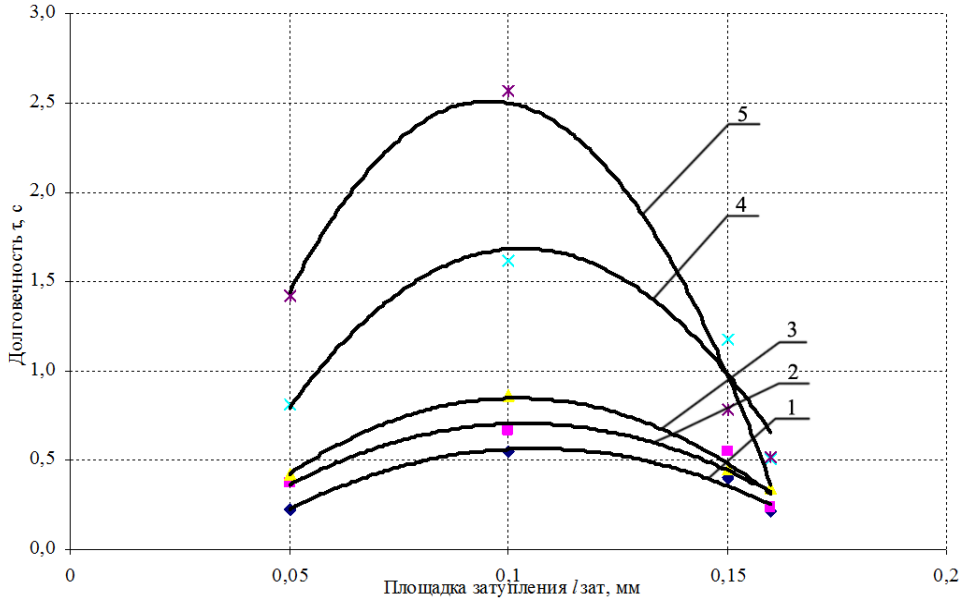


Рис. 4. Зависимость долговечности абразивного зерна F90 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

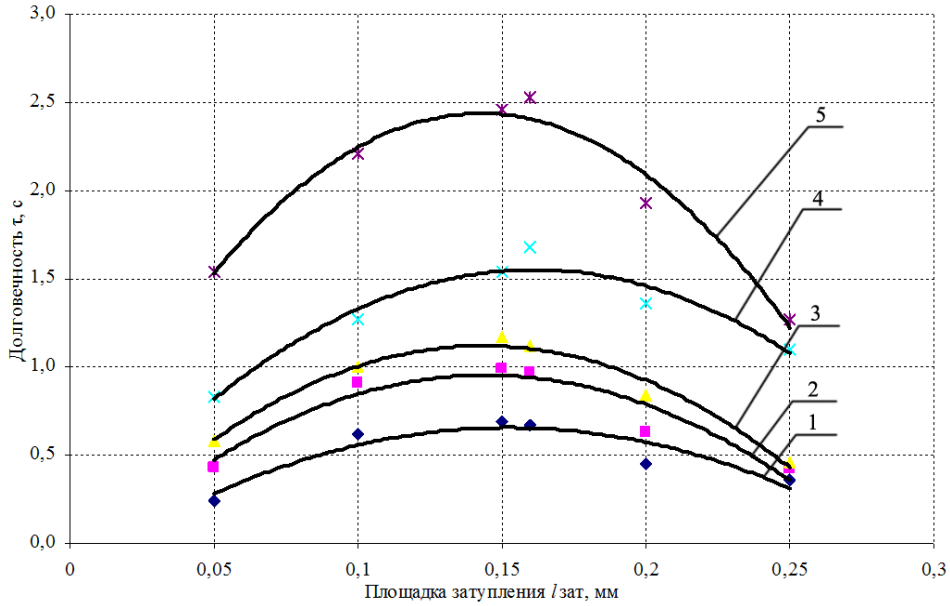


Рис. 5. Зависимость долговечности абразивного зерна F60 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

Полученные результаты могут послужить основой для создания единой многофакторной модели износа абразивного зерна [10], с целью разработки прогнозных моделей эксплуатационных показателей абразивных инструментов для создания энерго- и ресурсосберегающей технологии процессов абразивной обработки [11–15].

Выводы

1. Предложена имитационная модель термофлуктуационного механизма разрушения абразивного зерна в процессах шлифования, реализованная на базе кинетической теории прочности твердых тел.

2. Разработана имитационная модель механического взаимодействия абразивного зерна с обрабатываемым материалом, созданная средствами твердотельного моделирования и реализованная в пакете ANSYS.

3. Для различных сочетаний величины площадки затупления на абразивном зерне и температуры в зоне контакта обрабатываемой заготовки с абразивным материалом рассчитаны величины эквивалентных напряжения, возникающих в абразивном материале.

4. Расчетным путем установлена долговечность абразивных зерен различных номеров зернистости, эксплуатирующихся в изменяющихся технологических условиях.

Библиографический список

1. Лоладзе, Т.Н. Износ режущего инструмента / Т.Н. Лоладзе. – М.: Машгиз, 1958. – 354 с.

2. Лоладзе, Т.Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т.Н. Лоладзе, Г.В. Бокучава. – М.: Машиностроение, 1967. – 112 с.

3. Маслов, Е.Н. Теория шлифования материалов / Е.Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

4. Филимонов, Л.Н. Стойкость шлифовальных кругов / Л.Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 134 с.

5. Мишнаевский, Л.Л. Износ шлифовальных кругов / Л.Л. Мишнаевский. – Киев: Наукова думка, 1982. – 188 с.

6. ГОСТ 23505–79 Обработка абразивная. Термины и определения.

7. Ардашев, Д.В. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. – 384 с.

8. Регель, В.Р. Кинетическая теория прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – Изд-во «Наука», 1974. – 560 с.

9. Дьяконов, А.А. Научно-методическая база повышения эффективности процессов абразивной обработки на основе многофакторной оценки обрабатываемости материалов / А.А. Дьяконов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 1. – С. 19–26.

10. Ардашев, Д.В. Основные механизмы износа абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – Кисловодск, 2013. – С. 40–43.

11. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение проектирования групповой технологии операций шлифования / Д.В. Ардашев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2(288). – С. 14–19.

12. Ардашев, Д.В. Основы групповой технологии шлифования / Д.В. Ардашев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 54–55.

13. Ардашев, Д.В. Информационно-методическая база режимно-инструментального оснащения операций абразивной обработки для современных условий мирового машиностроения / Д.В. Ардашев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 813–817.

14. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 113–116.

15. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение проектирования групповой технологии операций шлифования / Д.В. Ардашев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2(288). – С. 14–19.

К содержанию

УДК 621.74.002.6

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЗК ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Д.В. Ардашев, С.Н. Лебедев

По результатам проведенных исследований на ООО «БВК» Литейное производство» (г. Челябинск) проведена отработка методики и сравнения 3-х способов по эффективности проведения контроля. В результате установлено, что наиболее эффективным способом является косвенный – с помощью формул акустического тракта.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль отливок; АРД – диаграмма; формула акустического тракта.

На сегодняшний день значительное число арматуры, в том числе и для опасных производственных объектов, изготавливается с литыми корпусными деталями, однако качество литого металла часто оставляет желать лучшего. В связи с этим, проблема обеспечения надлежащего качества литых корпусных деталей, и в первую очередь, крупногабаритного литья, продолжает оставаться актуальной.

Принято считать, что одной из основных причин отказов арматуры, связанных с неудовлетворительным качеством литых корпусных деталей, являются дефекты литья (поры, трещины и др.), а также неудовлетворительные механические свойства металла. Действующие в настоящее время нормативы допустимых дефектов, механических свойств и методы неразрушающего и разрушающего контроля направлены на недопущение в готовом изделии отмеченных выше нарушений.

Одним из основных методов неразрушающего контроля является ультразвуковой метод контроля (УЗК). Суть ультразвукового метода заключается в излучении в изделие и последующем принятии отраженных ультразвуковых колебаний с помощью специального оборудования – ультразвукового дефектоскопа и пьезоэлектропреобразователей и дальнейшем анализе полученных данных с целью определения наличия дефектов, а также их эквивалентного размера, формы (объемный/плоскостной), вида (точечный/протяженный), глубины залегания и пр. Параметры выявленных дефектов определяются с помощью ультразвуковых дефектоскопов. Так, например, по времени распространения ультразвука в изделии определяют расстояние до дефекта, а по амплитуде отраженного импульса – его относительный размер.

На сегодняшний день существует пять основных методов УЗК: теневой, зеркально-теневой, зеркальный, дельта-метод и эхо-метод. В промышленности ультразвуковой контроль металла проводят, как правило, в диапазоне ультразвуковых волн от 0,5 МГц до 10 МГц. В отдельных случаях неразрушающий контроль сварных швов проводится ультразвуковыми волнами с частотой до 20 МГц, что позволяет выявлять очень небольшие дефекты. Ультразвук низких частот применяют при: работе с объектами большой толщины (ультразвуковой контроль отливок, поковок, сварных соединений выполненных электрошлаковой сваркой); контроле металлов, имеющих крупнозернистую структуру (чугун, медь, аустенитные стали) и большое затухание – «плохо проводят ультразвук».

Прямой способ наиболее прост и автоматически учитывает многие параметры акустического тракта, но требует изготовления стандартных образцов. Искусственные дефекты выбирают такими, чтобы их можно было легко изготовить с достаточной точностью, чтобы от них четко наблюдался максимум сигнала и, по возможности, чтобы искусственный дефект имитировал наиболее часто встречающиеся реальные дефекты. Получив сигнал, устанавливают его на стандартный уровень экрана дефектоскопа, регулируют аттенюатором, при необходимости, чтобы установить заданный уровень фиксации по нормативному документу. Основной мерой чувствительности в России является плоскодонные отверстия, которые довольно сложно изготовить. Кроме того, для УЗК необходима подготовка поверхности: чистота поверхности после абразивной обработки согласно ГОСТ 14782–86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые» должна быть не ниже R_z 40 мкм по ГОСТ 2789–73. Также следует отметить, что процесс изготовления стандартных образцов

предприятия (СОП) с плоскодонными отверстиями трудоемок, дорог и нетехнологичен, так как требуется набора стандартных образцов с различными отражателями в зависимости от толщины объекта контроля. Так же имеются известные трудности в метрологической поверке.

Косвенный способ. Важным шагом по сокращению числа используемых образцов является АРД диаграмм при настройке чувствительности и оценке размеров дефектов. В этом случае число образцов при благоприятном стечении обстоятельств можно свести к одному или непосредственно проводить настройку на объекте контроля (ОК) (рис.).

Расчетный способ, реализуемый на основе АРД – диаграмм, получаемых экспериментально или на основе расчетов. Данные диаграммы графически связывают между собой для конкретного преобразователя амплитуду эхосигнала, эквивалентный размер плоскодонного отражателя и расстояние до него. АРД – диаграммы обладают определенным преимуществом перед испытательными образцами, поскольку учитывают коэффициент затухания ультразвука в контролируемых материалах. Кроме того, использование АРД – диаграмм экономичнее, чем испытательных образцов. Применение АРД – диаграмм особенно эффективно при мелкосерийном производстве. Однако их используют в основном для изделий простой геометрической формы и большой толщины, так как совпадение расчетных кривых с экспериментальными данными наблюдается только в дальней зоне преобразователя.

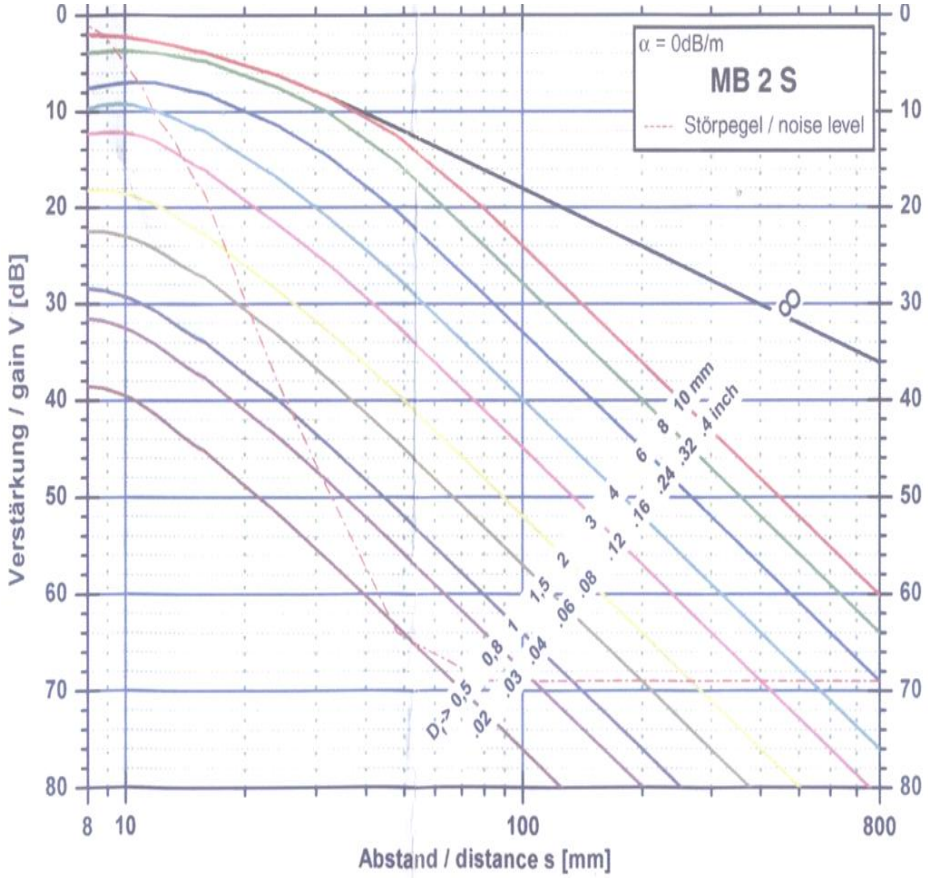


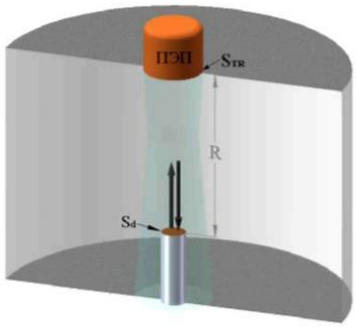
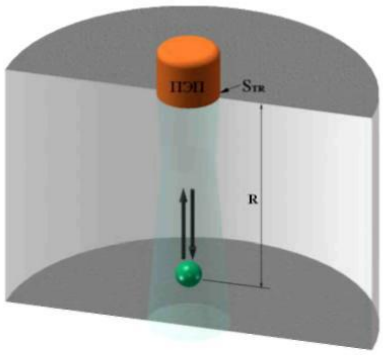
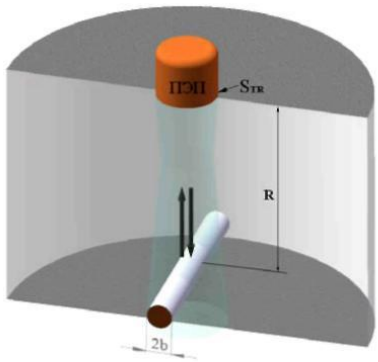
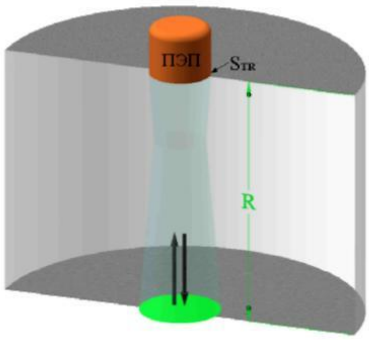
Рис. 1. АРД – диаграмма прямого совмещенного преобразователя MB2S

Особенностью данного способа является то, что для проведения контроля требуется подготовка поверхности.

Анализ по формулам акустического тракта может быть реализован с применением указаний Бархатова В.А. (табл. 1) [3].

Таблица 1

Формулы акустического тракта

Тип отражателя	Эскиз, схема прозвучивания	Формула акустического тракта
Плоскодонный (диск)		$\frac{A}{A_0} = Exp(-2\delta R) S_{TR} \frac{S_d}{\lambda^2 R^2}$
Сферический ∅=D		$\frac{A}{A_0} = Exp(-2\delta R) S_{TR} \frac{D}{\lambda R^2}$
Цилиндрический ∅=2b (боковое сверление)		$\frac{A}{A_0} = Exp(-2\delta R) S_{TR} \frac{1}{2\lambda} \sqrt{\frac{b}{R^3}}$
Бесконечный (донная поверхность)		$\frac{A}{A_0} = Exp(-2\delta R) S_{TR} \frac{1}{2\lambda R}$

В выражениях табл. 1 приняты следующие обозначения:

S_{TR} – площадь ультразвукового преобразователя;

R – расстояние между преобразователем и отражателем;

δ – коэффициент затухания, учитывающий поглощение и рассеяние волн в материале;

λ – длина волны;

A_0 – амплитуда колебаний акустического зондирующего импульса на поверхности преобразователя (в момент излучения);

A – амплитуда колебаний волн, отраженных от несплошности, и пришедших на поверхность преобразователя (в момент приема эхосигнала).

При использовании данного метода прибор может быть настроен непосредственно на объекте контроля. Затем определяется эквивалентная площадь донной поверхности и в дефектоскоп вводится поправка на чувствительность. Подготовка поверхности не требуется, так как учитываются параметры акустического тракта.

Например, изделие толщиной R прозвучивается прямым преобразователем, типа П111. На развертке ультразвукового дефектоскопа формируется донный эхосигнал. Необходимо определить, какова эквивалентная площадь донной поверхности.

Воспользуемся формулами акустического тракта для отражателя в виде диска и бесконечного отражателя (см. табл. 1). Согласно определению эквивалентной площади амплитуда донного эхосигнала равна амплитуде эхосигнала от диска, расположенного на той же глубине R. Следовательно, правые части уравнений равны, а также равны и левые части этих уравнений. Откуда получим:

$$\frac{A}{A_0} = Ex\,p\left(-2\delta R\right)S_{TR}^2\frac{S_d}{\lambda^2 R^2} = Exp\left(-2\delta R\right)S_{TR}^2\frac{1}{2\lambda R}. \qquad (1)$$

После преобразований получим, что:

$$S_{экв.д} = \frac{1}{2}\lambda R. \qquad (2)$$

Сравнение двух способов настройки (калибровки) ультразвукового (УЗ) дефектоскопа прямым и косвенным способом эталонирования позволило выявить преимущества последнего:

– минимизацию абразивной зачистки участков УЗК, то есть не требуется подготовка поверхности под УЗК, шероховатость поверхности не хуже R_z 40;

– отказ от изготовления СОПов. Процесс изготовления СОПов с плоскодонными отверстиями трудоемок и нетехнологичен. Также имеются известные трудности в метрологической поверке.

В табл. 2 приведен ряд экономических показателей доказывающих эффективность предложенной методики на примере отливки крышка DN 1000 PN 8.

Таблица 2

Экономические показатели

№	Показатели	Прямой способ калибровки	Косвенный способ АРД-диаграммы	Косвенный способ с помощью формул
1	Подготовка поверхности объекта контроля	Требуется	Требуется	Не требуется
	Время подготовки поверхности, ч	12	12	
	Стоимость операции, руб	1570	1570	
	Годовая программа шт.	4500	4500	
	Стоимость подготовки всей партии, руб	7 065 000	7 065 000	
2	Изготовление стандартного образца предприятия 4, шт	Требуется	Не требуется	Не требуется
	Стоимость изготовления 1 СОП, руб	4		
	Стоимость изготовления партии СОП, руб	40 000		
3	Требуемая квалификация дефектоскописта	1 уровень	2 уровень	2 уровень
	Количество дефектоскопистов	2	2	2
4	Время калибровки прибора УЗК мин	Многократное 30 мин	Однократное 10 мин	Однократное 10 мин

Таким образом, из рассмотренных нами способов эффективным является косвенный способ с помощью формул акустического тракта.

Библиографический список

1. Крауткремер, Й. Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; пер. с нем. – М: Металлургия, 1991. – 752 с.

2. Голямина, И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / И.П. Голямина. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

3. Бархатов, В.А. Расчет эквивалентной площади и эквивалентных размеров отражателей в ультразвуковом контроле изделий: методические указания / В.А. Бархатов. – Екатеринбург, 2009. – 12 с.

К содержанию

УДК 621.919.1.04 + 621.9.01

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ РЕЗАНИЯ ПРИ МНОГОКООРДИНАТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В.А. Батуев, В.В. Батуев

На основе аналитической геометрии в пространстве разработана математическая модель зоны резания при многокоординатном фрезеровании. Данная математическая модель позволяет производить расчет толщины среза при обработке пространственно-сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами, учитывая трахоидальный характер движения их режущих кромок.

Ключевые слова: толщина среза; фрезерование; зона резания; многокоординатная обработка.

Непрерывное изменение геометрии зоны резания при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей вызвано не только влиянием конфигурации обрабатываемой поверхности, но и сложным перемещением в пространстве инструмента, имеющего криволинейную режущую кромку.

В работах исследователей для определения параметров срезаемого слоя при фрезеровании (толщины среза, угла контакта, ширины фрезерования) рассматривалась кинематическая схема, основанная на сочетании двух равномерных движений: вращательного и поступательного, совершаемых в плоскости, перпендикулярной оси фрезы. Такой подход осуществлялся при изучении относительно простых случаев фрезерования различными видами инструмента, включая и фасонный, для одно и двухкоординатной обработки.

Для трехкоординатной обработки до исследований, проведенных авторами настоящей работы, не было строгих зависимостей, однозначно определяющих связь конфигурации обрабатываемой поверхности, а следовательно, и направления вектора подачи в пространстве, с параметрами срезаемого слоя. В свою очередь параметры срезаемого слоя оказывают большое влияние на силы резания. В связи с этим необходимо с учетом кинематики фрезерования пространственно-сложных поверхностей определить теоретические зависимости для расчета основных параметров геометрии зоны резания (толщины среза, положения и длины активной части режущей кромки) с целью количественного анализа изменения последних и использования при разработке расчетно-аналитического метода определения сил резания.

Для обработки пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ наиболее употребительны концевые радиусные фрезы. В данной работе приведены результаты исследования процесса фрезерования радиусной частью инструмента, как менее всего изученного, хотя разработанная методика и результаты исследования могут быть использованы для фрез с любым профилем.

При фрезеровании радиусной частью криволинейное лезвие фрезы срезает стружку серпообразной формы с переменной толщиной. Толщина срезаемого слоя является одним из важнейших элементов фрезерования, которая определяется как расстояние между двумя последовательными положениями трахоидальной траектории движении точки лезвия фрезы, измеряемое в сечениях, перпендикулярных к профилю инструмента. С некоторым приближением, для упрощения математического описания размеров срезаемого слоя при фрезеровании, трахоиду заменяют дугами окружности. В этом случае, при фрезеровании горизонтальной плоскости, когда ось фрезы перпендикулярна вектору движения подачи (рис. 1), текущее значение толщины срезаемого слоя для произвольной точки М криволинейной режущей кромки определяется из известного соотношения:

$$a_M = S_z \cdot \sin\psi_M \cdot \sin\varphi_M, \quad (1)$$

где S_z – подача на зуб; ψ_M – значение угла контакта зуба фрезы для точки М; φ_M – угол профиля в рассматриваемой точке режущей кромки.

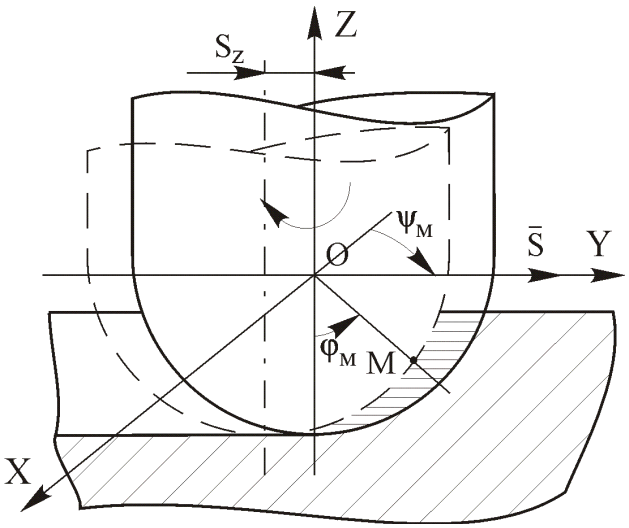


Рис. 1. Схема фрезерования горизонтальной плоскости

При фрезеровании наклонной поверхности (рис. 2) движение подачи направлено под некоторым углом ω к горизонтальной плоскости. В этом случае толщина среза не может быть определена по общеизвестной формуле (1), так как не выполняется условие перпендикулярности вектора $\bar{S}$ к оси вращения инструмента, для которого она получена. Поэтому, рассматривая произвольную точку пересечения режущей кромки с секущей плоскостью, в которой необходимо определить толщину срезаемого слоя, следует повернуть систему координат XYZ на угол ω таким образом, чтобы ось OZ’ оказалась перпендикулярной вектору $\bar{S}$ (см. рис. 2), и предположить, что OZ’ является осью вращения фрезы. Следует отметить, что направление измерения толщины среза для любой точки радиусной части фрезы при проведенных преобразованиях сохраняется.

На основе указанного подхода авторами получена формула для расчета толщины среза для любой точки криволинейной режущей кромки в нормальном сечении при фрезеровании наклонных поверхностей:

$$a_i = S_z\sqrt{1-\left(\pm\sin\varphi_i\cdot\sin\psi_i\cdot\sin|\omega|+\cos\varphi_i\cdot\cos\omega\right)^2-\sin^2\varphi_i\cdot\cos^2\psi_i}. \qquad (2)$$

Знак (+) берется при схеме резания «вверх». Знак (–) при схеме резания «вниз». При угле ω = 0, т. е. в случае, когда вектор $\bar{S}$ совпадает с горизонтальной плоскостью, формула (2) принимает вид (1).

Из теории резания металлов известно, что траектория движения зуба фрезы представляет собой трахоиду. При отношениях скорости движения детали (подачи) к скорости вращения инструмента, имеющих место при фрезеровании, дуга трахоиды по форме весьма мало отличается от дуги окружности. Поэтому, для упрощения расчетов, трахоиду заменяют дугами окружности с диаметром равным диаметру фрезы. При этом ошибка от указанной замены не превышает одного процента. Формула (2) для определения толщины среза при объемном фрезеровании была выведена на основе данной упрощенной кинематической схемы, т.е. путем замены трахоид дугами окружности. Однако, особенностью обработки радиусной частью фрезы является то, что процесс резания в разных точках криволинейного лезвия протекает при различных скоростях. Причем скорость изменяется в широком диапазоне – от максимальной, в точке сопряжения радиусной части с цилиндрической (конической), до нулевой в точке оси фрезы. Изменение скорости оказывает существенное влияние на форму траекторий движения точек криволинейной режущей кромки. В свою очередь, форма траектории определяет толщину срезаемого слоя и длину контакта зуба с обрабатываемым материалом. Поэтому необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования по выявлению количественных связей между изменением траектории и геометрией срезаемого слоя.

Для подтверждения влияния трахоидального характера движения точек режущей кромки радиусной части фрезы на форму срезаемого слоя и, как следствие, на длину контакта зуба с обрабатываемым материалом (путь зуба в металле были проведены эксперименты по измерению сил резания.

Анализируя результаты экспериментов было обнаружено, что при обработке паза радиусной частью двухзубой фрезы существует зона одновременной работы зубьев, расположенных через 180°, т. е. второй зуб вступал в работу тогда, когда первый еще продолжал резание. Следовательно, угол контакта зуба с припуском больше 180°. Экспериментальные данные также показали увеличение угла контакта с ростом подачи. При подаче на зуб S_z = 0,05 мм/зуб величина ψ равна 200°, а при подаче на зуб S_z = 0,15 мм/зуб – 220°. Таким образом, данные экспериментов через величину пути зуба в металле, подтверждают существенное влияние трахои-

дального характера движения криволинейной режущей кромки фрезы на форму срезаемого слоя, которая в большей степени зависит от величины подачи и от скорости движения точек режущей кромки, определяемой их удалением от оси фрезы.

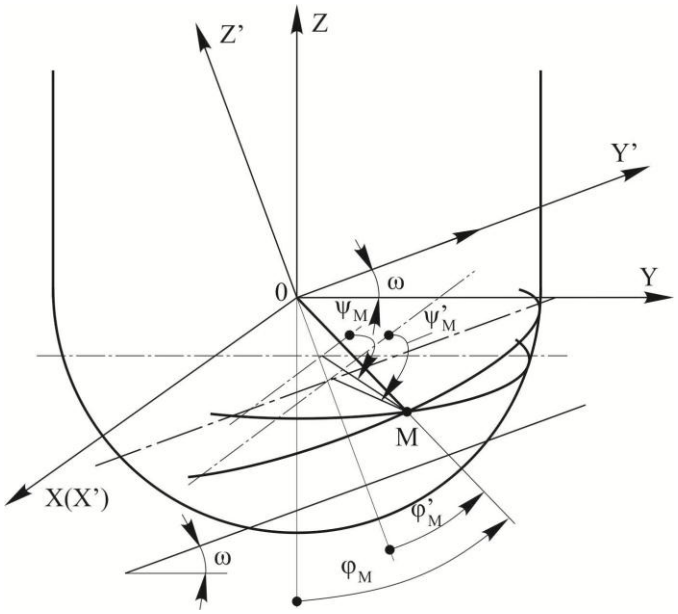


Рис. 2. Определение толщины среза при фрезеровании наклонных поверхностей концевыми радиусными фрезами

Траектория движения точек режущей кромки в зависимости от их положения на радиусной части инструмента меняется значительно. При сравнении углов контакта от начала резания до выхода из металла разных участков зуба фрезы выявлено, что точки режущей кромки, расположенные ближе к центру, вступают в работу раньше и заканчивают ее позднее чем точки, находящиеся на большем диаметре. Это объясняется различием их траекторий движения, которые определяют форму сечения среза. Не трудно заметить, что ближе к оси вращения фрезы трахоиды имеют форму, значительно отличающуюся от круглой. Следовательно, замена их дугами окружности для расчета толщины среза, может внести существенную погрешность. Это подтверждает необходимость учета в аналитических зависимостях влияния трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки на размеры срезаемого слоя. Такие зависимости могут быть выведены для трех различных схем резания встречающихся при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей.

1. Схема резания «вверх», когда угол $\alpha = 90° - \omega$ между положительным направлением оси фрезы и вектором движения подачи меньше 90°. За положительное принято направление от конца фрезы к шпинделю.

2. Схема резания «вниз», когда угол α больше 90°.

3. Контурная схема, когда направление вектора движения подачи перпендикулярно оси вращения фрезы, т. е. $\alpha = 90°$.

Для аналитического описания толщины срезаемого слоя при схеме резания «вверх» разработана расчетная схема (рис. 3), на которой изображены два последовательных положения режущей кромки фрезы.

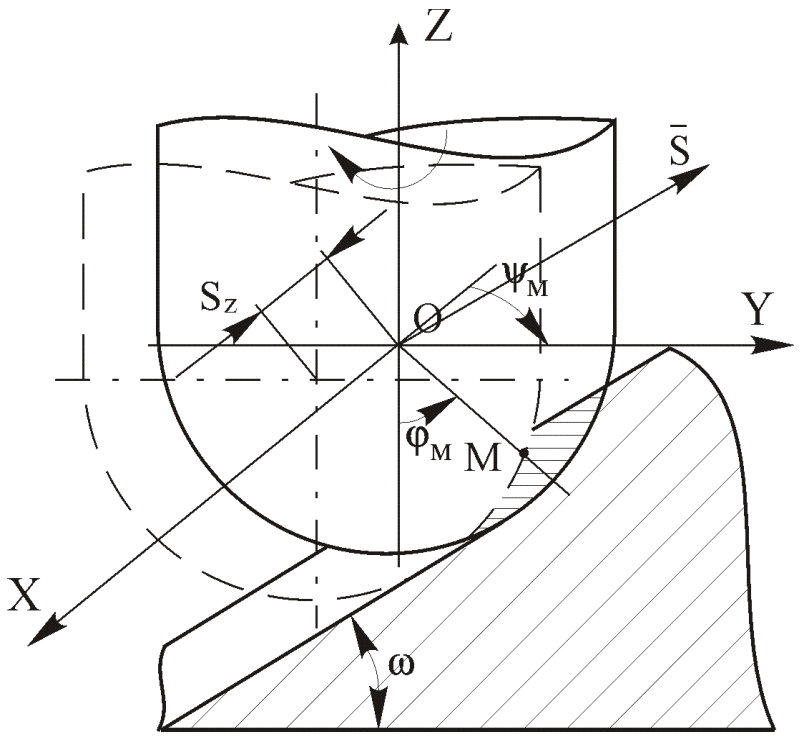


Рис. 3. Расчетная схема для определения толщины среза с учетом трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки при фрезеровании «вверх»

На основе приведенной расчетной схемы получено трансцендентное уравнение (3) для определения текущего значения угла контакта λ предыдущего зуба фрезы с учетом трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки:

$$\frac{2\pi\cdot\sqrt{R^2-\left[\frac{S_z\cdot(2\pi+z\psi-z\lambda)}{2\pi}\cdot\left(\frac{\cos\omega\cdot\cos\lambda}{\sin(\lambda-\psi)\cdot tg\varphi}\mp\sin|\omega|\right)\right]^2}\times}{S_z\cdot z\cdot\cos\omega\cdot\cos\psi} \qquad (3)$$
$$\frac{\times\sin(\psi-\lambda)}{z}+\frac{2\pi+z\cdot\psi}{z}=\lambda,$$

где z – количество зубьев фрезы; λ – текущие значения угла контакта первого и второго зубьев фрезы соответственно.

Знак (–) берется при схеме резания «вверх». Знак (+) при схеме резания «вниз». При контурной схеме в уравнения подставляется угол ω = 0.

Таким образом, зная взаимосвязь двух последовательных положений режущей кромки, толщину среза, измеренную по нормали к поверхности резания, можно определить:

$$a = R - \frac{S_z \cdot (2\pi + z\psi - z\lambda) \cdot \cos\omega \cdot \cos\lambda}{2\pi \cdot \sin(\lambda - \psi) \cdot \sin\varphi}. \quad (4)$$

Анализируя уравнения (3) и (4) видим, что толщина среза зависит не только от текущего значения угла контакта ψ и угла профиля φ, но и от радиуса фрезы R, подачи на зуб S_z, количества зубьев z и от угла наклона обрабатываемой поверхности в направлении вектора движения подачи. Для количественной оценки влияния перечисленных параметров и трахоидального характера движения точек криволинейной режущей кромки на толщину срезаемого слоя, проведен анализ результатов расчетов по зависимостям (2) и (4).

Анализ результатов показал, что в случае замены трахоид дугами окружностей относительная погрешность расчетной толщины среза достигает 50 % в точках криволинейной режущей кромки, находящихся вблизи оси вращения фрезы. По мере удаления точек от оси эта погрешность уменьшается и в местах сопряжения радиусной части с цилиндрической не превышает 1 %.

Таким образом, трахоидальный характер движения точек криволинейной режущей кромки, находящихся вблизи оси вращения фрезы, оказывает существенное влияние на фактическую величину толщины среза. Поэтому данную особенность необходимо учитывать при разработке аналитических силовых зависимостей объемного фрезерования.

К содержанию

УДК 621.92.06-229

УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫЕ СТАНОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ (УСП) СТАЦИОНАРНЫЕ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ–СПУТНИКИ

Д.Ф. Валиев, Ю.И. Мясников

Главное преимущество УСП заключается в возможности значительно повышать технологическую оснащенность производства, направленную не только на обеспечение заданной точности обработки деталей машин, но и на повышение производительности труда за счет сокращения затрат на вспомогательные операции.

Ключевые слова: универсально-сборные приспособления (УСП), станочные приспособления, стационарные приспособления, приспособления–спутники.

Современное производство предъявляет особые требования к конструкциям универсально-сборным станочным приспособлениям (УСП), которые связаны с разнообразием структур современного производства, особенностями обработки деталей по управляющим программам на станках с ЧПУ, автоматизацией производства и другими условиями [1].

Универсально-сборные станочные приспособления (УСП) с начала их эксплуатации совершенствовались и развивались не только в нашей стране, но и за рубежом. В настоящее время накоплен большой опыт по их созданию и применению.

В технологии обработки деталей на металлорежущих станках универсально-сборные станочные приспособления (УСП) различаются как стационарные и приспособления–спутники (рис. 1, 2).

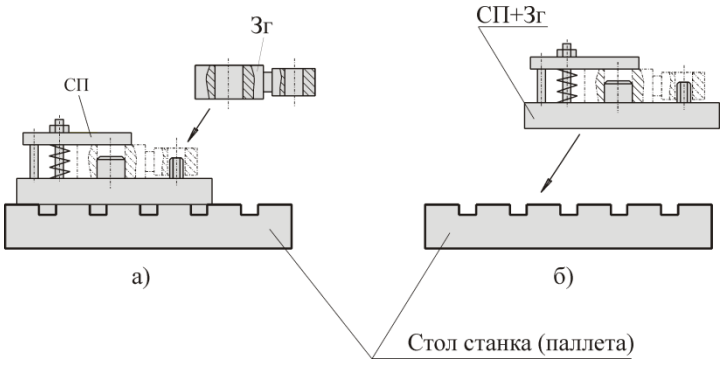


Рис. 1. Схемы СП настольного типа: стационарного (а) и приспособления–спутники (б)

Стационарные СП (а) фиксируются и жестко закрепляются на столах (паллетах) или шпинделях металлорежущих станков. В них заготовки устанавливаются и закрепляются, обрабатываются, раскрепляются и перемещаются от одного станка к другому. Далее СП очищаются от стружки,

в них устанавливаются новые заготовки, и цикл обработки повторяется. В условиях гибкого производства эти приспособления выполняют практически те же функции, что и традиционно применяемые специальные СП в поточном производстве.

Приспособления-спутники (б) сопровождают установленные и закрепленные в них заготовки (Зг) от одного станка к другому. Они фиксируются и закрепляются на столах (паллетах) или шпинделях для последующей обработки заготовок. В результате установки заготовки в приспособление-спутник образуется единая статическая система «Приспособление + Заготовка» (СП–Зг), позволяющая выполнять при обработке принцип постоянства баз.

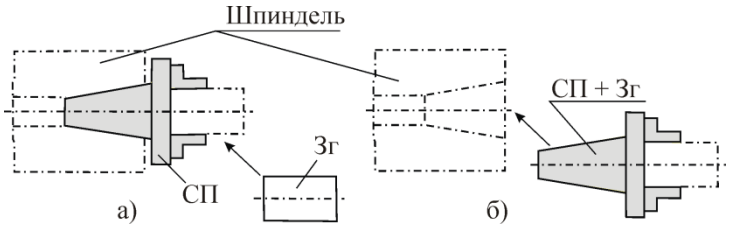


Рис. 2. Схемы СП нашпиндельного типа:
стационарного (а) и приспособления-спутника (б)

Для установки приспособлений–спутников на всех рабочих позициях станков имеются однотипные стационарные части, обеспечивающие взаимозаменяемость в пределах одной гибкой линии.

Несмотря на различие конструктивного исполнения, все приспособления–спутники имеют общие признаки – жесткие корпусные элементы с точно обработанными поверхностями под установочные элементы (УЭ).

Библиографический список

1. Мясников, Ю.И. Станочные приспособления металлорежущих станков: справочник в 2 т. / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2010. – Т.1. – 422 с.

2. Мясников, Ю.И. Конструкции универсально-сборных приспособлений (УСП): справочник / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. Ю.И. Мясникова. – Челябинск: Издательство типография ООО «УралПечать», 2011. – 490 с.

3. Мясников, Ю.И. Конструкции приспособлений для станков с ЧПУ: справочник / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. Ю.И. Мясникова. – Челябинск, Издательство типография ООО «УралПечать», 2011. – 262 с.

К содержанию

УДК 004.5 + 004.512.3+004.4

РАЗРАБОТКА ИНТЕРФЕЙСА ПОИСКОВОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BORLAND

А.В. Выбойщик

В статье рассмотрена разработка интерфейса программного обеспечения, позволяющего получить выходные данные в таблицах по известным различным наборам исходных данных. Результаты исследований используются для расчёта нормативов режимов резания.

Ключевые слова: объектно-ориентированное программирование, база данных, интерфейс, программное обеспечение.

Одной из задач, стоящих перед разработчиками современного программного обеспечения, является разработка интерфейса, который, с одной стороны, должен отвечать требованию максимальной информативности, а с другой – быть максимально доступен. Основными недостатками интерфейса программ, разрабатываемых в том числе и для решения инженерных нужд, являются, во-первых, неудобство доступа ко многим функциям, во-вторых, перегруженность различного рода компонентами, не несущими информационной нагрузки, в-третьих, недостаточные по размеру окна для ввода и вывода, в-четвёртых, отсутствие защиты от ввода некорректных или бессмысленных данных, в-пятых, неудобное расположение самих окон ввода и вывода. Перечисленные недостатки значительно снижают скорость работы с программным обеспечением, что ведёт к большим временным затратам. Необходимость постоянно отвлекаться на учёт указанных недостатков в итоге приводит к отказу от использования программного обеспечения.

Поэтому для широкого и производительного использования программного обеспечения необходима не только корректная работа самих программ, но и интерфейс, являющийся удобным средством работы с компьютером.

При разработке интерфейса необходимо выполнение следующих действий: определение минимально необходимого количества окон; корректное открытие и закрытие окон; корректное отображение компонентов ввода и вывода данных, а при большом количестве исходных данных – с группировкой по типам данных; желательное указание пользователю на последовательность ввода исходных данных; помещение компонентов, используемых для подтверждения ввода исходных данных; использование компонентов для необходимых пояснений.

Как правило, количество окон в приложении определяется количеством баз данных, для которых составляется; чаще всего таких окон три: главное

окно, окно расчёта и окно информации о программе, разработчике и т.п. Открытие и закрытие окон выполняется с использованием событий OnActivate, OnCreate, OnClose. Для корректного последовательного ввода данных удобнее всего использовать фокус ввода, а для избежания нарушения последовательности ввода – включение/выключение опции ввода данных. Для группировки исходных данных и конечного результата, как правило, используются декоративные компоненты, например, GroupBox. Необходимые пояснения можно выполнить использованием свойства Hint или помещением отдельных компонентов, например, Label.

Пример фрагмента программы, формирующего интерфейс, приведён ниже.

```
procedure Tform2.Button1Click(Sender: TObject);
var kf1,kf2,kf3,kf4,kf5,kf6,rf1,rf2,rf3,rf4,rf5,rf6: string;
kv1,kv2,kv3,kv4,kv5,kv6: variant;
vrnres1,vrnres2,vrnres3,vrnres4,vrnres5,vrnres6: variant;
strres1,strres2,strres3,strres4,strres5,strres6: string;
m1,m2,m6: integer;
m3,m40,m41: real;
label 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10;
begin
kf1:='Mat_mach';
kv1:=dbcombobox1.text;
rf1:='Code_mat_mach';
vrnres1:=table1.lookup(kf1,kv1,rf1);
m1:=integer(vrnres1);
1: table2.First;
repeat
2: if m1=table2.FieldByName('Code_mat_mach').AsInteger then
3: if strtofloat(trim(maskedit1.text))<=table2.FieldByName('HB').Asfloat
then
begin
kf2:='Code_mat_mach;HB';
kv2:=vararrayof([table2.FieldByName('Code_mat_mach').AsInteger,
table2.FieldByName('HB').Asfloat]);
rf2:='Code_HB';
vrnres2:=table2.lookup(kf2,kv2,rf2);
m2:=integer(vrnres2);
goto 4;
end
else
begin
table2.Next;
```

```
goto 3;
end
else
begin
table2.Next;
goto 2;
end;
until table2.Eof;
4: table3.First;
repeat
5: if m2=table3.FieldByName('Code_HB').AsInteger then
6: if strtofloat(trim(maskedit2.text))<=table3.FieldByName('d_1').Asfloat
then
begin
kf3:='Code_HB;d_1';
kv3:=vararrayof([table3.FieldByName('Code_HB').AsInteger,
table3.FieldByName('d_1').Asfloat]);
rf3:='v';
vrnres3:=table3.lookup(kf3,kv3,rf3);
m3:=real(vrnres3);
goto 7;
end
table3.Next;
else
begin
goto 6;
else
end
begin
table3.Next;
goto 5;
end;
until table3.Eof;
7: maskedit3.Text:=floattostr(m3);
table4.First;
kf4:='Code_HB;d_2';
rf4:='S;n';
repeat
8: if m2=table4.FieldByName('Code_HB').AsInteger then
9: if strtofloat(trim(maskedit2.text))<=table4.FieldByName('d_2').Asfloat
then
begin
```

```
kv4:=vararrayof([m2, table4.FieldByName('d_2').Asfloat]);
vrnres4:=table4.lookup(kf4,kv4,rf4);
m40:=real(vrnres4[0]);
m41:=real(vrnres4[1]);
goto 10;
end
else
begin
table4.Next;
goto 9;
end
else begin
table4.Next;
goto 8;
end;
until table4.Eof;
10: maskedit4.Text:=floattostr(m40);
maskedit5.Text:=floattostr(m41);
kf6:='Code_Mat_mach';
kv6:=m1;
rf6:='Code_cool';
vrnres6:=table6.lookup(kf6,kv6,rf6);
// combobox1.items.add(string(vrnres6));
m6:=integer(vrnres6);
// table5.First;
kf5:='Code_cool';
kv5:=m6;
rf5:='Cool';
vrnres5:=table5.lookup(kf5,kv5,rf5); student
Maskedit6.Text:=String(vrnres5);
end;
```

Выполнение перечисленных требований позволяет сформировать корректный и удобный для пользователя интерфейс.

К содержанию

УДК 621.914.1.04

РАСЧЁТ НЕРОВНОСТЕЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.В. Выбойщик

Статья содержит расчёт геометрических параметров макронеровностей сложнопрофильных поверхностей при обработке концевыми радиусными фрезами при различных схемах обработки.

Ключевые слова: сложнопрофильная поверхность, объёмное фрезерование, макронеровность, концевая радиусная фреза, схема «поперёк» следа, схема «вдоль» следа, схема «под углом» к следу.

При обработке пространственно-сложных поверхностей на чистовых переходах могут применяться различные схемы обработки – «вдоль», «поперек» следа и «под углом» к следу предшествующего чернового перехода. Схема обработки «вдоль» следа достаточно подробно изучена в [1]. В [2] был выполнен расчёт геометрических параметров, связанных с обработкой «поперек» следа.

Особенностью обработки пространственно-сложных поверхностей «поперек» следа является наличие макронеровностей в виде «ступенек», от которых зависит глубина резания t. Глубина резания определяется конфигурацией обрабатываемой поверхности (радиусом кривизны R и углом наклона поверхности к горизонтальной плоскости ω в текущей точке), высотой «ступенек» B, радиусом фрезы $R_ф$ и периодической подачей на строку $S_{пер}$ на предшествующем переходе.

В конструкции детали обычно задается ее радиус R или угол наклона поверхности к горизонтальной плоскости ω, Радиус фрезы $R'_ф$ на черновых переходах выбирается исходя из условия прочности инструмента.

Ниже приведены типовые случаи обработки макронеровностей от предшествующей обработки.

1. В случае обработки на предшествующем переходе плоского участка поверхности концевой цилиндрической фрезой максимальная высота образующейся «ступеньки» B определяется следующим образом:

$$B = S_{пер}\ \mathrm{tg}\omega, \qquad (1)$$

Текущая глубина резания t_i определяется как перпендикуляр, опущенный из любой точки профиля предшествующего перехода i на обрабатываемую поверхность. Формулы определения текущей глубины резания имеют вид:

$$\begin{cases} t_i = l_i \ \mathrm{ctg}\omega & \text{при } l_i \in \left[0; S_{пер} \ \dfrac{\sin^2\omega}{\cos\omega}\right]; \\ t_i = S_{пер} \ \dfrac{\sin\omega}{\cos^2\omega} - l_i \ \mathrm{tg}\omega & \text{при } l_i \in \left[S_{пер} \ \dfrac{\sin^2\omega}{\cos\omega}; \dfrac{S_{пер}}{\cos\ \omega}\right]. \end{cases} \quad (2)$$

где l_i – текущее расстояние от начала «ступеньки» до точки пересечения отрезка t_i с обрабатываемой поверхностью.

2. В случае обработки на предшествующем переходе плоского участка поверхности концевой радиусной фрезой с радиусом $R'_ф$ максимальная глубина резания t_{max} определяется следующим образом:

$$t_{\max} = R'_ф\left[1 - \sin\left(\omega + \kappa_1\right)\right], \quad (3)$$

где κ_1 – угол между горизонтальной осью и отрезком, соединяющим центр первой окружности с точкой пересечения двух дуг окружностей.

Текущая глубина резания t_i определяется как перпендикуляр, опущенный из точки i на обрабатываемую поверхность. Формулы определения текущей глубины резания имеют вид:

$$\begin{cases} t_i = R'_ф\left(1 - \cos \arcsin \ \dfrac{l_i}{R'_ф}\right) & \text{при } l_i \in \left[0; \dfrac{S_{пер}}{2\ \cos\omega}\right]; \\ t_i = R'_ф\left(1 - \cos \arcsin \left[\dfrac{S_{пер}}{\cos\omega} - \dfrac{l_i}{R'_ф}\right]\right) & \text{при } l_i \in \left[\dfrac{S_{пер}}{2\ \cos\omega}; \dfrac{S_{пер}}{\cos\omega}\right]. \end{cases} \quad (4)$$

3. В случае обработки на предшествующем переходе выпуклого участка поверхности концевой цилиндрической фрезой высоты образующихся «ступенек» В оказываются разными из-за изменения угла ω по длине дуги профиля. Высота «ступеньки», сформированная углами ω_1 и ω_2, определяется как катет прямоугольного треугольника:

$$B = S_{пер} \ \mathrm{tg}\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right), \quad (5)$$

где ω_1 – угол наклона касательной к обрабатываемой поверхности в начале «ступеньки»; ω_2 – угол наклона касательной к обрабатываемой поверхности в конце «ступеньки».

Текущая глубина резания t_i определяется как отрезок, проведенный из точки i по нормали к обрабатываемой поверхности. Формулы определения текущей глубины резания имеют вид:

$$\begin{cases} t_i = \dfrac{2B \sin \dfrac{\varphi}{2} \cos\left(\dfrac{\varphi_i}{2} + \omega_1\right)}{\sin(\varphi_i + \omega_1)\left[1 - \cos(\omega_1 + \omega_2)\right]} & \text{при } \varphi_i \in [0; \varphi_к]; \\ t_i = \dfrac{2S_{пер} \sin\left(\dfrac{\omega_1 - \omega_2}{2} - \dfrac{\phi_i}{2}\right) \sin\left(\dfrac{\varphi_i}{2} - \dfrac{\omega_1 + \omega_2}{2}\right)}{\cos(\varphi_i + \omega_1)\sin(\omega_1 + \omega_2)} & \text{при } \varphi_i \in [\varphi_к; \omega_2 - \omega_1]. \end{cases} \quad (6)$$

4. В случае обработки выпуклого участка поверхности с радиусом R концевой радиусной фрезой радиусом $R'_ф$ максимальная глубина резания t_{max} определяется следующим образом:

$$\frac{R + t_{\max}}{\sin\left(\dfrac{\pi}{2} + \omega' - \kappa_2\right)} = \frac{R'_ф}{\sin\left(\dfrac{\omega' - \omega''}{2}\right)}, \quad (7)$$

где κ_2 – угол между горизонтальной осью и прямой, соединяющей центр первой (верхней) окружности с точкой пересечения двух дуг окружностей; ω', ω'' – углы наклона к вертикальной плоскости прямых, соединяющих центр окружности обрабатываемой поверхности с центрами двух окружностей, образующих строки, отстоящие друг от друга на величину периодической подачи $S_{пер}$.

Формулы определения текущей глубины резания имеют вид:

$$\begin{cases} t_i = R'_ф\left(1 - \cos \arcsin \dfrac{l_i}{R'_ф}\right) - \\ -l_i \sin\left(\dfrac{\omega' - \omega''}{2}\right) \quad \text{при } \varphi_i \in \left[0; \dfrac{\omega' - \omega''}{2}\right]; \\ t_i = R'_ф\left(1 - \cos \arcsin\left[\dfrac{S_{пер}}{\cos\left(\dfrac{\omega' + \omega''}{2}\right)} - \dfrac{l_i}{R'_ф}\right]\right) - \\ -l_i \sin\left(\dfrac{\omega' - \omega''}{2}\right) \quad \text{при } \varphi_i \in \left[\dfrac{\omega' - \omega''}{2}; \omega' - \omega''\right]. \end{cases} \quad (8)$$

5. В случае обработки на предшествующем переходе вогнутого участка поверхности концевой цилиндрической фрезой максимальная высота образующейся «ступеньки» В определяется аналогично п. 2 по формуле (5).

Текущая глубина резания t_i определяется как отрезок, проведенный из точки i по нормали к обрабатываемой поверхности. Формулы определения текущей глубины резания имеют вид

$$\begin{cases} t_i = \dfrac{2B \sin\dfrac{\varphi_i}{2}\cos\left(\dfrac{\varphi_i}{2}+\omega_1\right)}{\sin(\varphi_i+\omega_1)\left[1-\cos(\omega_1+\omega_2)\right]} & \text{при } \varphi_i \in [0;\varphi_к]; \\ t_i = \dfrac{2S_{пер}\sin\left(\dfrac{\omega_2-\omega_1}{2}-\dfrac{\varphi_i}{2}\right)\sin\left(\dfrac{\varphi_i}{2}-\dfrac{\omega_1+\omega_2}{2}\right)}{\cos(\varphi_i+\omega_1)\sin(\omega_1+\omega_2)} & \text{при } \varphi_i \in [\varphi_к;\omega_2-\omega_1]. \end{cases} \quad (9)$$

6. В случае обработки на предшествующем переходе вогнутого участка поверхности с радиусом R концевой радиусной фрезой радиусом $R'_ф$ максимальная глубина резания t_{max} определяется следующим образом:

$$\frac{R-t_{\max}}{\sin\left(\dfrac{\pi}{2}+\omega'+\kappa_1\right)} = \frac{R'_ф}{\sin\left(\dfrac{\omega''-\omega'}{2}\right)}, \quad (10)$$

где κ_1 – угол между горизонтальной осью и прямой, соединяющей центр первой (нижней) окружности с нижней точкой пересечения двух дуг окружностей; ω', ω'' – углы наклона к вертикальной плоскости прямых, соединяющих центр окружности обрабатываемой поверхности с центрами двух окружностей, образующих строки, отстоящие друг от друга на величину периодической подачи $S_{пер}$.

Текущая глубина резания t_i определяется как отрезок, проведенный из точки i по нормали к обрабатываемой поверхности. Формулы определения текущей глубины резания имеют вид:

$$\begin{cases} t_i = R'_ф\left(1-\cos\arcsin\dfrac{l_i}{R'_ф}\right)+ \\ +l_i\sin\left(\dfrac{\omega''-\omega'}{2}\right) \qquad \text{при } \varphi_i \in \left[0;\dfrac{\omega''-\omega'}{2}\right]; \\ t_i = R'_ф\left(1-\cos\arcsin\left[\dfrac{S_{пер}}{\cos\left(\dfrac{\omega'+\omega''}{2}\right)}-\dfrac{l_i}{R'_ф}\right]\right)+ \\ +l_i\sin\left(\dfrac{\omega''-\omega'}{2}\right) \qquad \text{при } \varphi_i \in \left[\dfrac{\omega''-\omega'}{2};\omega''-\omega'\right]. \end{cases} \quad (11)$$

Полученные закономерности позволяют рассчитать изменения составляющих силы резания при обработке пространственно-сложных поверхностей «поперек» следа и «под углом» к следу, а, следовательно, и погрешность обработки в любой точке обрабатываемой поверхности.

Библиографический список

1. Батуев, В.А. Повышение производительности и точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем стабилизации сил резания: автореф. дис. … канд. тех. наук / В.А. Батуев. – Челябинск: Изд-во ЧПИ, 1986. – 24 с.

2. Выбойщик, А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: автореф. дис. … канд. тех. наук / А.В. Выбойщик. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 24 с.

К содержанию

УДК 658.512

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ

В.И. Гузеев

В работе представлена методика структурной и параметрической оптимизации технологических процессов, выполняемых на многошпиндельных станках с ЧПУ. Рассмотрены этапы первичного базирования, выбора вариантов обработки, формирования схем обработки и параметрической оптимизации.

Ключевые слова: оптимизация технологических операций; синтез инструментальных наладок.

Имеющиеся научные разработки по повышению эффективности обработки на многошпиндельных станках в основном были направлены на обеспечение точности изготовления деталей [1, 2]. Вместе с тем, вопрос обеспечения производительности многоинструментальной черновой и получистовой обработки остался не достаточно изученным.

Для повышения производительности обработки необходимо стремиться к применению многоинструментальных наладок на одном шпинделе. Но статистические данные по заводам Уральской зоны показывают низкий уровень концентрации технологических переходов на таких станках, количество наладок с тремя инструментами на позиции не превышает 5 %. Объяснение причины низкого уровня концентрации переходов по позициям шпинделей связано с отсутствием оценки силовой нагруженности технологической системы в целом. А именно, при увеличении на позиции числа одновременно работающих на черновых режимах инструментов возрастает суммарная сила резания, которая может превысить силу зажима и нарушить положение заготовки относительно установочных элементов приспособления. Целью создания методики формализованного проектирования токарной обработки на полуавтоматах является обеспечение возможности формирования оптимальных наладок и технологических операций технологами средней квалификации.

Общая блок-схема методики приведена на рис. 1. Методикой предусматривается шесть этапов проектирования:

1 – составление вариантов первичного базирования заготовки;

2 – формирование всех возможных вариантов обработки заготовки на полуавтомате;

3 – формирование схем обработки всех поверхностей детали;

4 – параметрическая оптимизация режимов резания для каждой поверхности;

5 – структурная оптимизация с формированием вариантов технологических операций;

6 – экономическое обоснование и выбор оптимального варианта технологии.

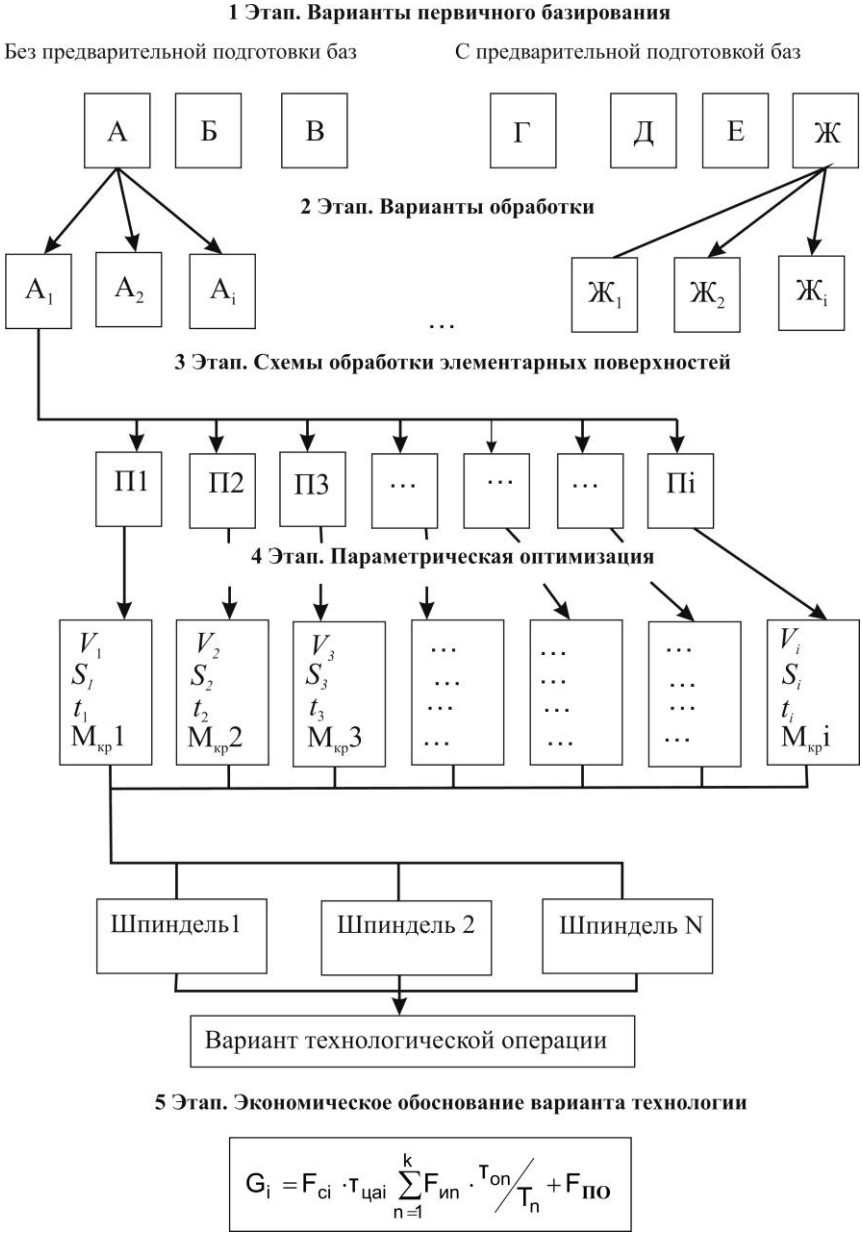


Рис. 1. Блок-схема общей методики проектирования операции

Для выполнения первого этапа формируются все возможные варианты первичного базирования заготовки (рис. 2).

Для каждого варианта первичного базирования составляются все возможные варианты маршрутов обработки заготовки на полуавтомате (рис. 2).

При выполнении третьего этапа проектирования вся деталь разбивается на элементарные поверхности. Для каждой элементарной поверхности составляется схема обработки (рис. 3). При этом может быть предусмотрена возможность обработки некоторых поверхностей с разными схемами (например, применяя продольный или поперечный суппорт).

Перечисленные три этапа может осуществлять технолог невысокой квалификации за счет формального применения типовых решений.

В четвертом этапе для каждой элементарной поверхности осуществляется оптимизационный расчет режимов резания с выполнением ограничений по мощности главного привода, по прочности механизма подач станка, по допустимому крутящему моменту, по прочности твердосплавной пластинки, по заданной шероховатости, по силе зажима патрона. В качестве целевой функции может задаваться либо минимальная себестоимость, либо максимальная производительность.

В результате параметрической оптимизации получаем для каждой элементарной поверхности оптимальные значения подачи, времени обработки и момента крутящего от сил резания.

Структурная оптимизация технологической операции заключается в нахождении оптимального сочетания инструментальных комплексов, обеспечивающих параллельную обработку заготовки несколькими инструментами. При этом должны выполняться ряд условий:

– все шпиндели станка должна быть равномерно загружены как по времени, так и по мощности;

– структура спроектированного технологического процесса должна отражать логику последовательности обработки поверхностей детали.

При выполнении структурной оптимизации решаются следующие задачи: 1. Составляется таблица технологических ограничений на последовательность переходов. При этом ставится в соответствие возможность обработки конкретной элементарной поверхности в зависимости от уже обработанных поверхностей или выполненных стадий обработки той же поверхности (например, чистовая стадия обработки выполняется после черновой стадии обработки) (табл. 1).

2. С учетом этой таблицы производится синтез всех возможных вариантов последовательностей обработки элементарных поверхностей (рис. 3). При этом учитываются ограничения по количеству шпинделей станка, возможности деления переходов на несколько позиций, и технологические ограничения на последовательность переходов. При этом сразу осуществляется проверка предполагаемого совмещения инструментов по допусти-

мому крутящему моменту от сил резания. Например, объединение обработки поверхности П2 с поверхностью П4 или с поверхностью П7 (рис. 3) приведет к перегрузки шпинделя крутящим моментом свыше критического поэтому такие варианты сразу исключаются.

3. Для каждого варианта последовательностей обработки элементарных поверхностей формируются комплексы многоинструментальных наладок с учетом ограничений по суммарному крутящему моменту, по допустимому количеству инструментов в наладке, по количеству шпинделей станка.

4. Из составленных комплексов многоинструментальных наладок выбирается наладка, обеспечивающая минимальное время обработки.

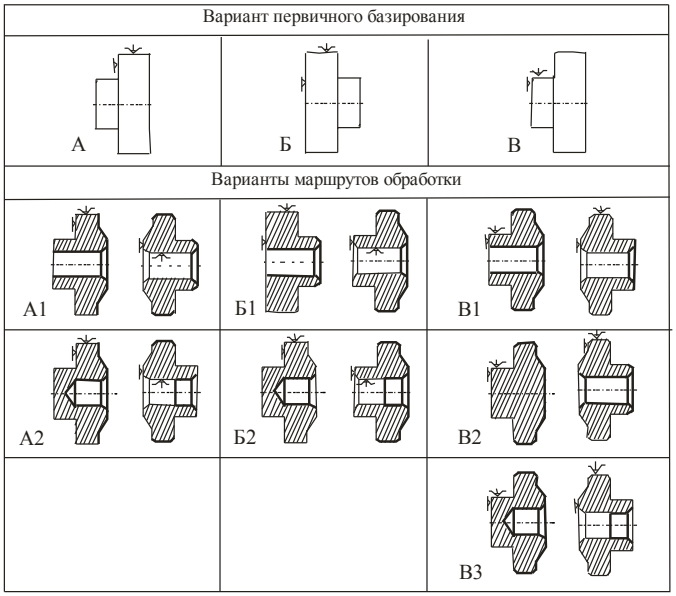


Рис. 2. Варианты первичного базирования заготовки и маршрутов обработки

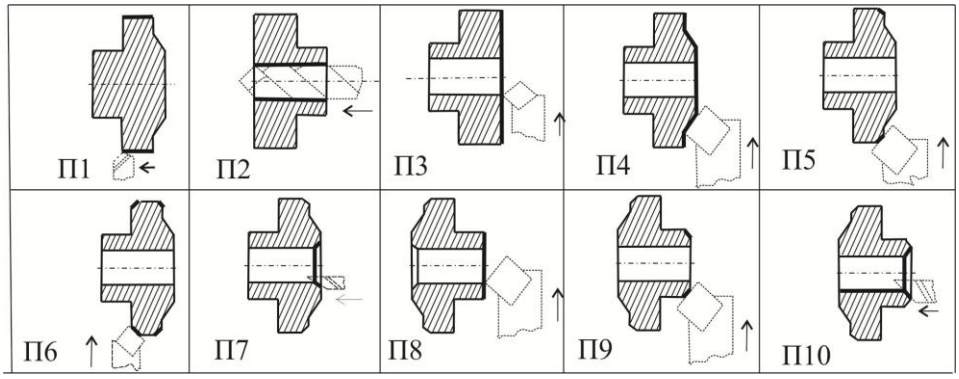
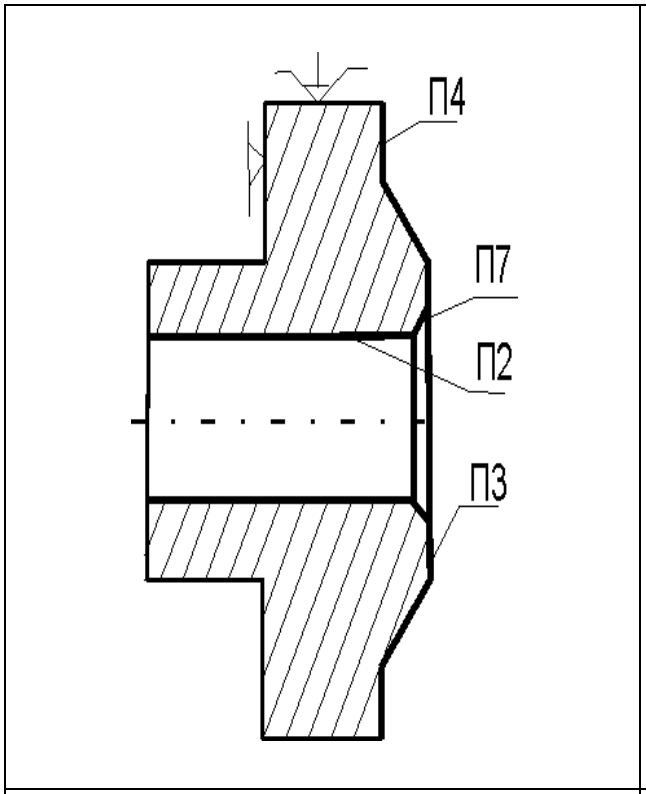
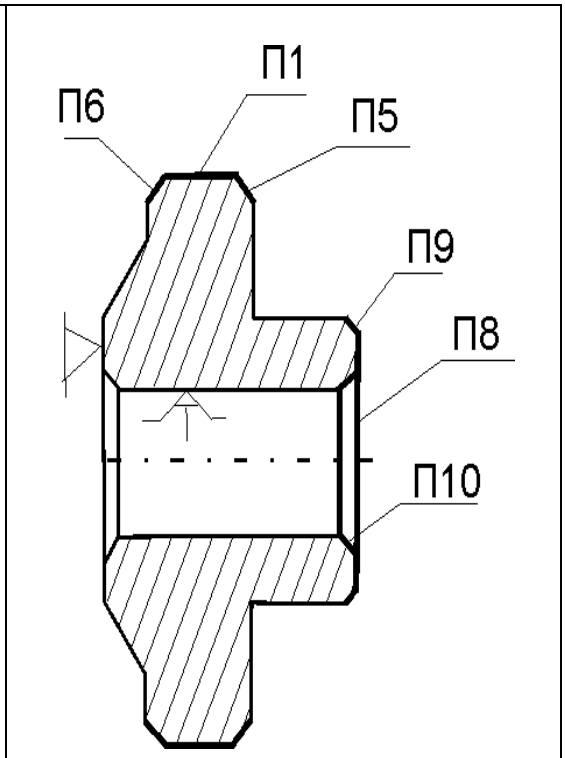


Рис. 3. Схемы обработки элементарных поверхностей (вариант А1)

Таблица 1

Таблица технологических ограничений на последовательность переходов





Установ I					Установ II				
Поверхность	После какой поверхности	Делимость переходов	$M_{кр}$, Нм	Время, мин	Поверхность	После какой поверхности	Делимость	$M_{кр}$, Нм	Время, мин
П2	+	+	471	1,2	П1	+	–	125	0,3
П3	П2	+	210	0,7	П5	П1	–	80	0,1
П4	П3	–	187	0,4	П6	П1	–	80	0,1
П7	П2, П3	–	40	0,1	П8	+	–	70	0,2
					П9	П8	–	55	0,1
					П10	П8	–	40	0,1

Наилучшие комплексы наладок формируются для всех вариантов маршрутов обработки (табл. 2).

Для лучших комплексов вариантов наладок рассчитывается оперативное время, анализ которого позволяет выбрать оптимальный вариант операции обработки детали (табл. 3).

Оптимальный вариант технологической операции зависит не только от параметров оптимизируемой операции но и от затрат, связанных с выполнением дополнительных технологических операций для подготовки технологических баз.

Таблица 2

Синтез многоинструментальных наладок
и формирование вариантов операций

№ варианта	№ шпинделя	Элементарные поверхности						$\Sigma M_{рез}$, Н	Лимитирующее время t, мин
		П1	П2	П3	П3	П4	П7		
		t_i/M_{PE3i}							
I, II	1	0,6 / 471	–	–	–	–	–	471	0,6
	2	–	0,6 / 471	0,7 / 210	–	0,4 / 187	0,1 / 40	908	0,7
III,IV, VII-IX,XI-XIII	1	0,6 / 471	–	0,35 / 210	–	–	–	681	0,6
	2	–	0,6 / 471	–	0,35 / 210	0,4 / 187	0,1 / 40	818	0,6
V,VI, XV,XVI	1	0,6 / 471	–	0,7 / 210	–	–	–	681	0,7
	2	–	0,6 / 471	–	–	0,4 / 187	0,1 / 40	698	0,6
X,XIV	1	1,2 / 471	–	0,35 / 210	–	–	–	681	1,2
	2	–	–	–	0,35 / 210	0,4 / 187	0,1 / 40	347	0,4
XVII	1	1,2 / 471	–	–	–	–	–	471	1,2
	2	–	–	0,7 / 210	–	0,4 / 187	0,1 / 40	437	0,7
XVIII	1	1,2 / 471	–	0,7 / 210	–	–	–	681	1,2
	2	–	–	–	–	0,4 / 187	0,1 / 40	227	0,4

Например, при рассмотрении вариантов Г1–Ж2 (см. рис. 1) учитываются дополнительные затраты, связанные с выполнением операций подготовки баз.

Разработанная методика формализованного проектирования многоинструментальных технологических операций легко алгоритмизируется и реализуется на компьютере.

Методика формализованного составления маршрута обработки детали позволяет технологу невысокой квалификации сформировать все многообразие возможных вариантов изготовления детали.

Таблица 3

Обоснование выбора вариантов операций

Вариант	А1	А2	Б1	Б2	В1	В2	В3	Г1	Г2
Время	0,7	0,4	0,6	–	–	1,2	–	0,7	0,6
Вариант	Г3	Д1	Д2	Д3	Е1	Е2	Ж1	Ж2	Ж3
Время	0,35	0,6	0,6	0,35	0,4	0,4	0,35	0,35	0,5

Разработанная методика параметрической оптимизации режимов резания позволяет определить режимы максимальной производительности и лимитирующие переходы.

Методика структурной оптимизации позволяет осуществить синтез оптимальных наладок и выбрать экономически обоснованный вариант изготовления деталей.

Промышленная апробация методики показала возможность повышения производительности на 40–60 % и снижения себестоимости обработки на 30 %.

Библиографический список

1. Гузеев, В.И. Особенности определения режимов резания для многопереходной обработки / В.И. Гузеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2003. – Вып. 4. – № 9(25). – С. 112–120.

2. Кошин, А.А. Применение клеточных матриц в моделях точности многоинструментной обработки / А.А. Кошин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб.науч.тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 68–74.

К содержанию

УДК 621.92.06-229

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ УНИВЕРСАЛЬНО-СБОРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ (УСП)

А.С. Дегтярева, Ю.И. Мясников

Универсально-сборные приспособления (УСП) относятся к общемашиностроительным видам технологической оснастки металлорежущих станков. Главное преимущество УСП заключается в возможности значительно повышать технологическую оснащенность производства, направленную не только на обеспечение заданной точности обработки деталей машин, но и на повышение производительности труда за счет сокращения затрат на вспомогательные операции.

Ключевые слова: универсально-сборные приспособления (УСП), технологическая оснастка, станочные приспособления.

Универсально-сборные приспособления (УСП) относятся к общемашиностроительным видам технологической оснастки металлорежущих станков, на детали и сборочные единицы которой были разработаны и утверждены государственные стандарты, и действовала в стране единая техническая документация. УСП являются одним из видов технологической оснастки, элементы которой изготовлялись до 1991 г. централизованно и чаще других применялись при механической обработке деталей во всех отраслях промышленности. Например, только в г. Челябинске УСП использовались на Челябинском тракторном заводе («ЧТЗ-Уралтрак»), Челябинском радиозаводе («Полете»), заводе «Теплоприбор», заводе «Строммашина» и других предприятиях. Несмотря на то, что комплекты УСП были приобретены этими заводами в 60–80 годах прошлого столетия, они успешно используются в настоящее время.

Система УСП разработана российскими учеными Б.С. Кузнецовым и В.А. Пономаревым в 1947 г. (а.с.75777) и применяются в различных отраслях промышленности уже свыше 60 лет.

Технико-организационная сущность системы УСП заключается в том, что любое специальное приспособление собирается из специальных стандартизованных и нормализованных деталей и сборочных единиц, заранее изготовленных и многократно используемых. После использования СП разбираются на составные элементы и применяются в новых компоновках приспособлений. Элементы этих систем находятся постоянно в обращении в течение срока их службы. Они эффективны при базировании и закреплении обрабатываемых заготовок в условиях современного серийного производства, а также в опытном производстве в период освоения новых видов изделий. Приспособления этих систем отличаются по многим признакам, основными из которых являются:

– высокая точность составных частей (деталей и сборочных единиц);
– хорошая взаимозаменяемость и сборность;
– возможность механизации и автоматизации зажима заготовок;
– возможность использования УСП в качестве приспособлений–спутников;
– другие.

Универсально-сборные станочные приспособления собираются из специальных стандартизованных и нормализованных деталей и узлов, заранее изготовленных и многократно используемых. После использования СП разбираются на составные элементы, которые потом применяются в других компоновках СП.

Принципиальные особенности конструкций УСП поясняются примерами, приведенными на рис. 1 и рис. 2, где показаны схемы СП тисочного типа (а, б), собранных из элементов УСП.

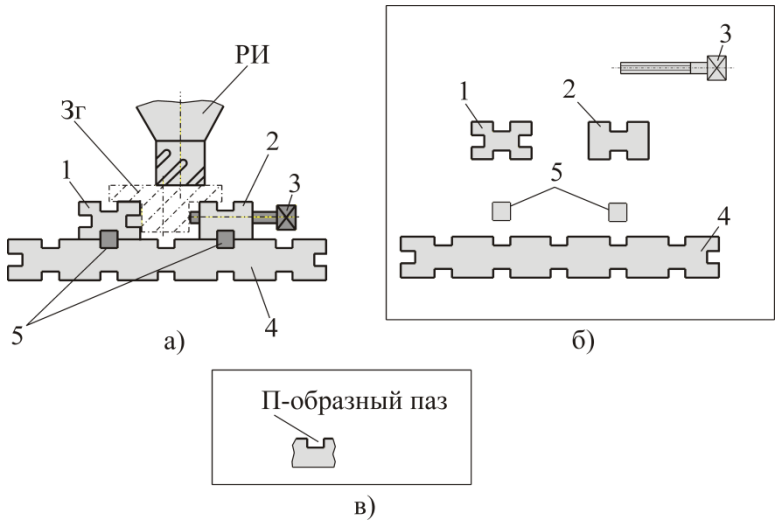


Рис. 1. Схема СП тисочного типа системы УСП с ручным зажимом:
1 – опора левая; 2 – опора правая; 3 – винт; 4 – плита; 5 – шпонки

На первом рисунке (см. рис. 1) показана схема УСП с ручным зажимом заготовки (Зг). Для установки призматической заготовки (Зг) используются две стойки 1 и 2, а для ее закрепления – винтовой зажим 3. Все элементы приспособления зафиксированы и закреплены на базовой плите 4 с П-образными пазами (в).

На втором рисунке (см. рис. 2) показана схема УСП с механизированным зажимом заготовки (Зг). Для установки призматической заготовки (Зг) также используются две стойки 1 и 2, а для ее закрепления – силовой привод 3 поршневого типа. Все элементы приспособления зафиксированы и закреплены на базовой плите 4 с Т-образными пазами.

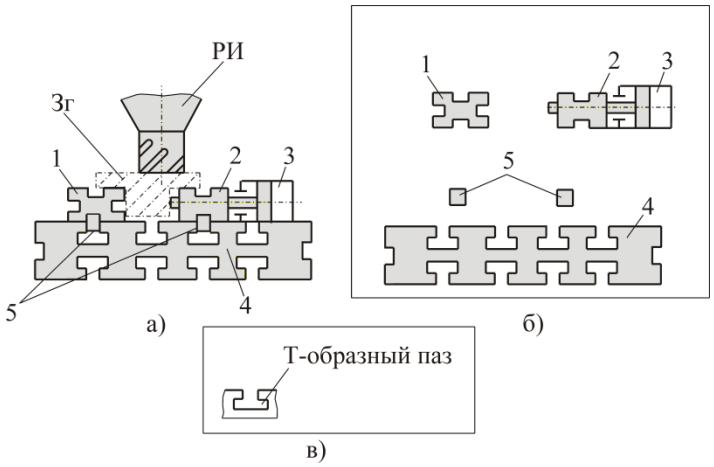


Рис. 2. Схема СП тисочного типа системы УСП с механизированным зажимом:
1 – опора левая; 2 – опора правая; 3 – силовой привод; 4 – плита; 5 – шпонки

На рис. 3 представлен общий вид конструкции УСП.

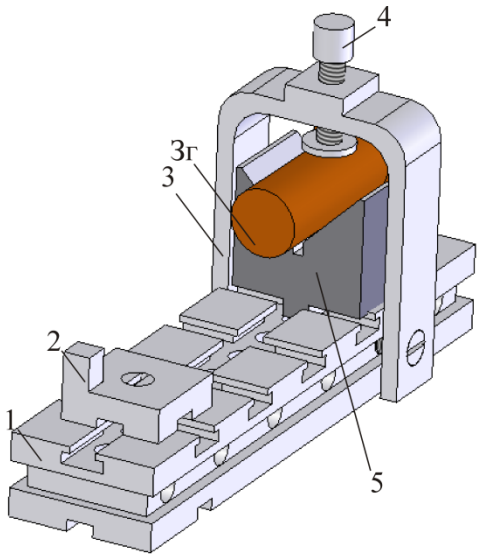


Рис. 3. Общий вид конструкции УСП: 1 – базовая плита;
2 – установ; 3 – хомутик; 4 – винтовой зажим; 5 – призма

Приспособление предназначено для установки (для базирования и закрепления) цилиндрических деталей на операциях обработки наружных поверхностей на станках сверлильно-фрезерно-расточной групп, в том числе на станках с ЧПУ.

Устанавливается заготовка (Зг) на призме 5 и закрепляется винтовым зажимом 4, установленном на хомутике 3.

Для настройки УСП на станке предусмотрен установ 2.

Библиографический список

1. Мясников, Ю.И. Станочные приспособления металлорежущих станков: справочник в 2 т. / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2010. – Т. 1. – 422 с.

2. Мясников, Ю.И. Конструкции универсально-сборных приспособлений (УСП): справочник / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. Ю.И. Мясникова. – Челябинск: Издательство типография ООО «УралПечать», 2011. – 490 с.

К содержанию

УДК 621.923.4-529

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛА ОБРАБОТКИ ДЛЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

А.А Дьяконов, О.В. Ковалерова

Рассмотрены возможности современного шлифовального оборудования, понятие рабочего цикла шлифования и возможные пути его оптимизации. Определена необходимость разработки методики оптимизации рабочего цикла для современного многокоординатного оборудования.

Ключевые слова: шлифование; цикл обработки; математическое моделирование; станки с ЧПУ; современные возможности.

Обеспечение высокого качества и эффективного результата производства предполагает использование современных прогрессивных технологий и оборудования. Одно из основных требований, предъявляемых к оборудованию, является обеспечение высокой производительности при выполнении высочайших требований к точности обработки. Для достижения необходимых потребностей станкостроительные заводы внедряют различные инновационные разработки. Отечественные предприятия по производству станочного оборудования видят перспективный путь развития в трансформации в сборочные заводы с механической обработкой только определяющих деталей узлов и ноу-хау в конструкторских разработках. Западные же станкостроительные концерны большое внимание уделяют совершенствованию не только механической части, но и электронной, а также улучшению эргономики и дизайна.

Современное производство сегодня невозможно представить без использования станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Особое место в этой линейке занимает шлифовальное оборудование, различающееся по расположению обрабатываемой детали, её форме, способу

подачи и принципу вращения шлифовального круга. В этой группе выделяют: плоскошлифовальные, бесцентрошлифовальные, внутришлифовальные и круглошлифовальные станки (КШС).

Шлифовальные станки с ЧПУ относятся к классу оборудования, обладающие огромным производственным потенциалом и многочисленными технологическими преимуществами. Они отличаются повышенной надежностью и жесткостью, быстродействием рабочих органов и точностью работы.

Среди отечественных производителей круглошлифовальных станков можно выделить: ООО «Санкт-Петербургский завод прецизионного станкостроения», модели: ЛЗ – 190А; ЛЗ – 194; ЛЗ – 250; ЛЗ -259; ЛЗ – 259М; Владимирский станкостроительный завод, модели: КШ – 400(600); КШ – 400.2; КШ – 600.4; ЗАО «МСЗ – Салют», модели: МШ 475 – I(II); МШ 476 – I(II).

Представителями ближнего зарубежья являются: харьковские станки ОАО «Харвест», модели 3У131М; 3У142МВ; 3У143МВ; 3У144МВ; 3М152МВ – 01; 3М132В; 3М162В01(02); ХШ – 138Ф2, технологические функции которых ограничены наружным продольным (полуавтоматическим) и врезным (ручным) шлифованием цилиндрических и конических поверхностей; белорусский ОАО «Вистан», модели: 3У131ВМ; 3У12УВФ10; Вильнюсский завод шлифовальных станков «Vingriai», модели: 3У10МАФ10; 3У10МС; 3У12РА; 3У12АФII, сфера их возможностей распространяется на наружное и внутреннее шлифование цилиндрических, конических и торцевых поверхностей.

Первую пятерку западных импортеров составляют традиционно сильные в этом секторе производители Японии, Германии, Китая, Италии, Испании, Чехии, Южной Кореи. Чуть отстает от корейских производителей Тайвань. Среди лидеров находятся США и Швейцария.

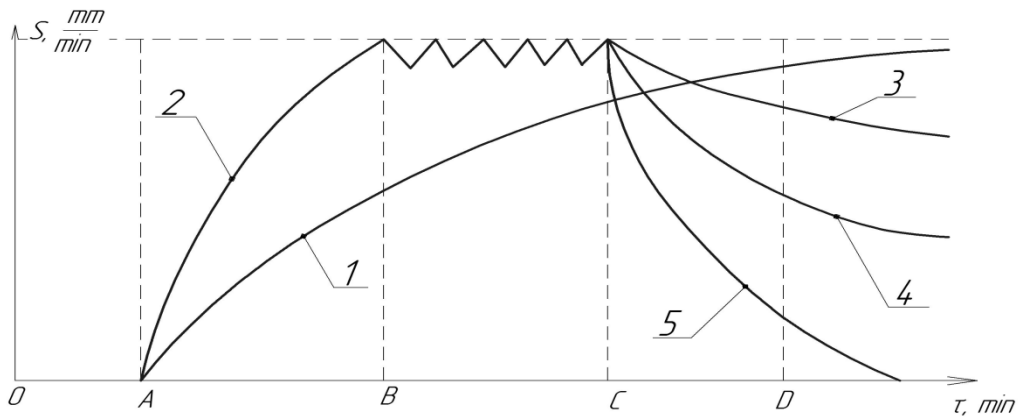
Известная фирма Studer (Швейцария) разработала универсальный круглошлифовальный станок с ЧПУ модели Favorit CNC для шлифования деталей среднего размера в штучном и серийном производстве. За счет различных опций, таких как система активного контроля, система балансировки, распознавание касания кругом детали и продольное позиционирование, позже он может быть адаптироваться и к другим задачам шлифования. Не отстает и фирма Ulmer Werkzeugschleiftechnik, презентовавшая станок SF40 Reinecker для шлифовки концов режущего инструмента из твердых сплавов со скоростью до 140 м/с. Особенностями его являются шпиндель мощностью 11 кВт, вращающийся круг диаметром 350 мм с частотой до 7500 оборотов в минуту.

Особый интерес вызывает немецкое оборудование фирм Knuth, модели RSM 500 и RSM 1000 с высокопроизводительным ЧПУ GPlus 450, обеспечивающим точность, производительность, высочайшее качество обработки и гибкость переналадки. Группа JUNKER выпускает функциональные и экономичные шлифованые станки серии Lean Selection.

Круглошлифовальный станок Solaris фирмы Weldon Solutions (США) оснащён управляемой координатой *C* для обработки некруглых деталей.

Современное оборудование с ЧПУ позволяет производить шлифовальную обработку в 3–4-х координатах, но существуют станки с несколькими шлифовальными кругами, которые могут шлифовать изделия в 8-ми координатах. Круглошлифовальные станки оснащены программным управление типа CNC с управлением по *X*–*У*–*Z* координатам, позволяющим автоматически определять траекторию движений шлифовального круга и при необходимости вносить коррективы. Система ЧПУ способна контролировать износ круга и автоматически компенсировать его без изменения традиционной компоновки станка. Данные станки позволяют совершать полный цикл обработки изделий из металла. Обладают удобной системой наладки, управления и перенастройки. Управление шлифовальной операцией может осуществляться дистанционно и быть упрощено благодаря использованию шлифовальных циклов технологически оптимально разработанных с графической поддержкой. Рабочий цикл может быть выбран из уже имеющихся на станке или быть задан оператором.

При круглом врезном шлифовании под циклом понимают путь, проходимый шлифовальной бабкой в направлении поперечной подачи, состоит из нескольких этапов: быстрого подвода круга с форсированной подачей по воздуху до момента касания с обрабатываемой поверхностью, ускоренного врезания в металл; чернового и чистового шлифования [1]. Структура рабочего цикла приведена на рисунке.



Структура рабочего цикла: ОА – подвод круга; АВ – этап врезания;
ВС – этап установившегося съёма металла; СД – выхаживание;
1 – врезание при постоянной поперечной подаче;
2 – ускоренное врезание; 3 – выхажевание без поперечной подачи;
4 – выхаживание замедленное; 5 – выхаживание ускоренное

Рабочий цикл отражает последовательность изменения режимов шлифования и связанное с ней изменение интенсивности съёма металла во времени. Управление им осуществляется путем изменения программной скорости подачи шлифовального круга, обеспечивающей требуемую скорость

движения режущей кромки инструмента. Программная скорость подачи переключается ступенчато в зависимости от оставшейся части припуска и является постоянной для каждой ступени цикла.

Величина программной скорости подачи для каждой ступени цикла задается. Фактический же закон движения режущей кромки круга отличается от программного наличием зазоров в кинематических цепях узлов станка и упругой податливости звеньев технологической системы.

Максимальное значение фактической скорости подачи на каждой ступени цикла корректируется комплексом технологических ограничений в зависимости от требуемой точности обработки, заданной шероховатости поверхности, осыпаемости шлифовального круга и изменении его режущей способности, появлению тепловых дефектов (прижогов) и т. д.

Для первой ступени цикла существенными ограничениями являются: работа круга в режиме затупления для чистовых операций или частичного самозатачивания при обдирочных обработках; допустимая глубина прижога, мощность привода и др. В конце этой ступени цикла допустимы прижоги, глубиной резания не превышающей оставшейся части припуска.

На второй ступени цикла расчет фактической скорости подачи ограничивается требованиями точности размера и отклонений формы, а так же снижением интенсивности тепловыделения.

На третьей ступени цикла уменьшаются динамические погрешности обработки, и возникает необходимость учёта ограничений по шероховатости обрабатываемой поверхности до требуемого уровня.

Методиками формирования оптимального рабочего цикла круглого шлифования (без учёта пути быстрого подвода и отвода круга), применяющихся в промышленности занимались многие учёные [1–8].

Предлагаются пути оптимизации циклов на основе: эмпирических зависимостях скоростей съема металла за время шлифования (В.И. Островский и А.Г. Савицкая); использовании управляющего параметра, за который принимается нормальная составляющая силы резания, а не программная скорость подачи (Д.В. Каленник, А.И. Левин, В.М. Машинистов, Ю.И. Манохин); расчёта стартовых режимов через постоянную времени для всех ступеней (В.А. Иоголевич); динамического программирования (Ю.К. Новоселов).

Одной из последних методик проектирования и оптимизации циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках является научная работа П.П. Переверзева [8], позволяющая рассчитать высокопроизводительный процесс врезного круглого шлифования. Практическое применение данная методика получила в общемашиностроительных нормативах времени и режимов резания [9].

Оптимизация основана на подборе параметров управления рабочего цикла шлифования и сравнении их с предельно допустимыми по ряду технологических ограничений значениями. Одновременно учитывается комплекс технологических ограничений, на основе моделирования взаимосвя-

зи оптимальных режимов резания с получаемой точностью и другими показателями качества. Комплекс основных моделей ограничений базируется на единой модели силы резания, устанавливающей функциональную взаимосвязь с режимами резания, геометрией зоны резания (размерами шлифуемой поверхности, параметрами круга и т. д.), физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, затуплением круга и его характеристикой. Учтены колебания значений входных параметров (точности заготовок, припуска, затупления круга) на колебания результирующих качественных показателей обрабатываемой поверхности.

Однако предлагаемые в данной работе математические модели в силу ограниченных возможностей вычислительной техники, составляющие базу для реализации теории, содержат ряд допущений не позволяющих реалиизовать возможности современного оборудования.

Так теплофизическая модель, применяемая для реализации ограничения по глубине тепловых дефектов, построена на теории быстродвижущихся источников и сплошного контакта [10, 11], что не позволяет вести управление по скорости вращения заготовки и учитывать продвижение температурного поля по мере уменьшения припуска. Применение данной теории быстродвижущихся источников приводит к допущениям в силовой модели, модели по осыпаемости круга и др.

Современное оборудование, имеющие мощный привод и широкие диапазоны плавного изменения программных скоростей подач, и бесступенчатое регулирование частоты вращения рабочего шпинделя, позволяет применять более высокопроизводительные бесступенчатые циклы шлифования. Тем самым обеспечить полное совпадение траектории фактической скорости подачи с границей области допустимых значений, достигая теоретического предела производительности цикла.

Оптимизация рабочего цикла шлифования сегодня возможна на основе модели процесса, учитывающей его сложные термодинамические особенности, упругие свойства технологической системы, высокую теплопроводность, вероятностное множественное микрорезание и др.

Необходимо рассматривать построение рабочего цикла шлифования сочетанием численных значений управляющих параметров (программной скорости подачи и величиной припуска) для каждой его ступени.

Принимая во внимание современные технические и технологические тенденции, необходимо разработать комплексную модель, которая позволит учитывать современные возможности оборудования.

На основе вышеизложенного необходимо:

1. Провести анализ возможностей современного шлифовального оборудования на предмет реализации программных циклов.

2. Разработать комплексную математическую модель, прогнозирующую выходные показатели процесса шлифования с учётом современных возможностей оборудования.

3. Разработать методику проектирования оптимального цикла для современного оборудования.

Такой подход позволит перейти к проектированию максимально производительных циклов шлифования для конкретных требований по точности, шероховатости и тепловых дефектов обработки, а также соблюдения условий по стойкости.

Библиографический список

1. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.

2. Островский, В.И. Теоретические основы процесса шлифования / В.И. Островский. – Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1981. – 144 с.

3. Левин, А.И. Оптимизация цикла врезного круглого шлифования / А.И. Левин, В.М. Машинистов // Станкоинструмент. – 1992. – № 12. – С. 27–29.

4. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.

5. Новосёлов, Ю.К. Динамика формирования поверхностей при абразивной обработке / Ю.К. Новосёлов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1979. – 232 с.

6. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Методика программирования: учебное пособие / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, В.А. Иоголевич, И.В. Сурков. – Челябинск: Издательство ЧПИ, 1989. – 81 с.

7. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве / П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 12. – Вып. 19. – С. 152–157.

8. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.

9. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: нормативы режимов резания. – М.: Экономика, 1990. – Ч. 2. – 480 с.

10. Дьяконов, А.А. Стохастический подход к решению теплофизических и силовых задач теории шлифования / А.А. Дьяконов // Металлообработка. – 2008. – № 2(44). – С. 2–6.

11. Дьяконов, А.А. Область применения теории быстродвижущихся источников в задачах теплофизики абразивной обработки при дискретной схеме контакта / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4(2). – С. 136–142.

К содержанию

УДК 621.923

ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРУГЛОГО ШЛИФОВАНИЯ С ОСЕВОЙ ПОДАЧЕЙ

А.А. Дьяконов, А.С. Дегтярева

В статье рассмотрены геометрические особенности круглого шлифования с осевой подачей и их влияние на технологические ограничения режимов резания, таких как бесприжоговость, точность обработки и шероховатость поверхности. Поставлена задача на разработку теплофизической модели процесса круглого шлифования с осевой подачей.

Ключевые слова: теплофизика, моделирование, шлифование.

Исследование и моделирование параметров процесса, определяющих оптимальное значение режимов резания, является одной из основных задач технологии машиностроения.

Если рассматривать процессы абразивной обработки, то здесь одними из основных технологических ограничений на режимы резания являются бесприжоговость, точность обработки, шероховатость и др.

Существует два основных направления поиска оптимальных значений режимов резания:

– экспериментальные исследования;

– математическое моделирование процесса.

Режимы резания, полученные на основе экспериментальных исследований, справедливы лишь для условий, при которых получены эмпирические данные, что предопределяет их ограниченность [1, 2].

Второе направление является в настоящее время самым перспективным, т. к. соответствующая математическая модель и возможности современных вычислительных систем позволяют моделировать практически все показатели процесса, являющиеся ограничениями на режимы резания.

В этом направлении есть ряд работ, которые посвящены разработке математических моделей параметров круглого врезного шлифования [2–5].

Однако данные модели не учитывают ряд особенностей круглого шлифования с осевой подачей в силу кинематических и контактно-силовых особенностей данного вида абразивной обработки.

Если рассматривать кинематику круглого шлифования с осевой подачей, то она значительно отличатся от врезного шлифования. Например, цикл обработки, который реализуется при круглом врезном шлифовании, здесь по аналогии с плоским шлифованием периферией круга трансформируется в дифференцированные стадии обработки (рис. 1). Также существует особенность контактного взаимодействия – наличие осевой подачи приводит к образованию на передней кромке шлифовального круга заборного конуса, что существенно изменяет тепловой и контактно-силовой баланс в зоне взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью заготовки.

В этом направлении можно отметить ряд работ [1, 3, 4].

В работе В.Л. Кулыгина [1] приведена экспериментальная зависимость величины радиального износа вдоль высоты от поперечной подачи и высоты круга, связанных эмпирическим коэффициентом, зависящим от поперечной подачи и частоты вращения детали:

$$y(x) = t_{\phi}\left(1 - \frac{x}{B}\right)^{\alpha},$$

где $y(x)$ – величина относительного радиального износа шлифовального круга вдоль его высоты; t_{ϕ} – максимальная фактическая поперечная подача; B – высота шлифовального круга; α – коэффициент, зависящий от величины продольной подачи, частоты вращения детали.

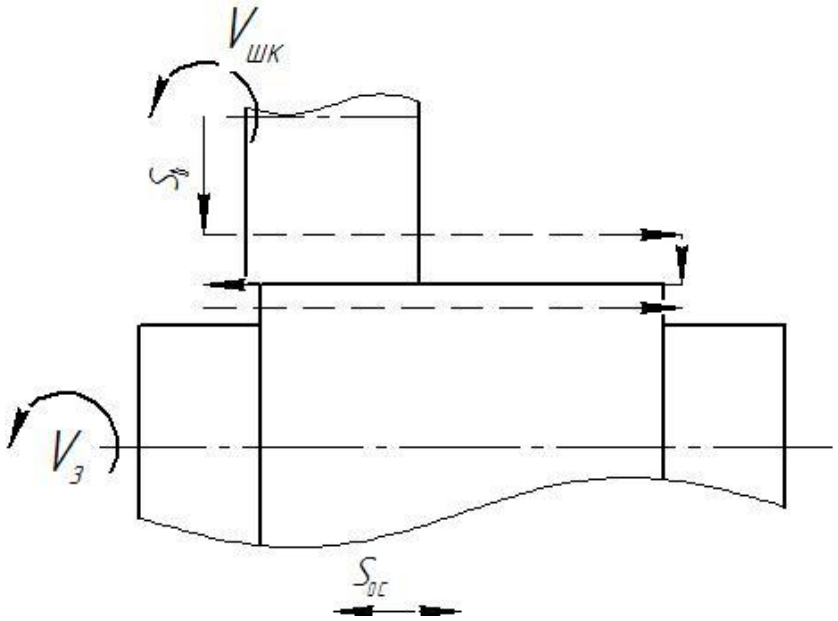


Рис. 1. Стадия обработки при шлифовании с осевой подачей

Е.П. Калининым [3] на основе анализа геометрии зоны контакта предложена статистическая зависимость для определения величины заборного конуса:

$$l = (6\ldots8)t_{\phi}.$$

Для прогнозирования технологического ограничения по бесприжоговости обработки с учетом кинематических особенностей круглого шлифования с осевой подачей необходима разработка соответствующей теплофизической модели процесса.

Наличие заборного конуса на шлифовальном круге предполагает, что в теплофизической модели необходим учет двух участков: зоны активного резания – заборный конус и зоны выхаживания, оставшейся части режущей кромки шлифовального круга, снимающей остаточные упругие деформации (рис. 2).

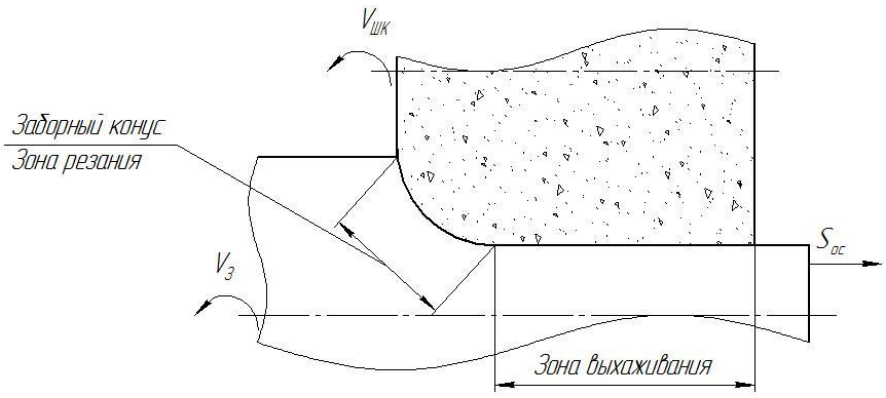


Рис. 2. Заборный конус

Подобная дифференциация зоны резания для исследования обрабатываемости материалов реализована в обобщенной теплофизической модели процессов абразивной обработки [6]. Данную модель можно принять за основу, но необходимо ставить теплофизическую задачу, учитывающую кинематические особенности осевого шлифования, все возможные перемещения детали и стадийность обработки (см. рис. 1).

Решение такой расчетной схемы можно представить в виде второй краевой задачи уравнения теплопроводности для полупространства:

$$\begin{cases} U_t - V_x U_x - V_y U_y = \chi \Delta U \left(U_{xx} + U_{yy} + U_{zz} \right), \\ U(x, y, z, 0) = 0, \\ \\ \lambda U_z (x, y, 0, t) = -q(x; y; t), \end{cases}$$

где V_x, V_y – скорость шлифовального круга; q – интенсивность тепловыделения; λ – коэффициент теплопроводности; χ – коэффициент температуропроводности.

Интенсивность тепловыделения q при этом необходимо рассматривать как дифференцированный источник: в зоне активного резания и в зоне выхаживания.

Такая постановка теплофизической модели позволит перейти к прогнозированию таких показателей процесса, как точность обработки и шероховатость поверхности.

Таким образом, ставится задача разработки теплофизической модели, учитывающей кинематику процесса круглого шлифования с осевой подачей.

Библиографический список

1. Кулыгин, В.Л. Разработка теории и методики расчета автоматических циклов наибольшей производительности при заданной точности обработки для круглого наружного продольного шлифования: дис. … канд. техн. наук / В.Л. Кулыгин. – Челябинск, 1987. – 199 с.

2. Ломова, О.С. Математическое моделирование структурных изменений в поверхностях заготовок при тепловых возмущениях в процессе шлифования / О.С. Ломова // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(120). – С. 95–99.

3. Калинин, Е.П. Теория и практика управления производительностью шлифования без прижогов с учетом затупления инструмента / Е.П. Калинин. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2009. – 358 с.

4. Нуркенов, А.Х. Повышение эффективности процесса шлифования на станке с ЧПУ NAXOS PMD 320 на основе ограничений комплексной модели управления циклом шлифования / А.Х. Нуркенов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3–3. – С. 151–157.

5. Переверзев, П.П. Моделирование технологических ограничений при оптимизации автоматических циклов шлифования / П.П. Переверзева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 165–168.

6. Дьяконов, А.А. Стохастический подход к решению теплофизических и силовых задач теории шлифования / А.А. Дьяконов // Металлообработка. – 2008. – № 2(44). – С. 2–6.

К содержанию

УДК 621.9.04 + 620.22-419.8

МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

А.А. Дьяконов

Приведен анализ современных мировых тенденций в области применения композитных материалов с микро- и нанодисперсными наполнителями в машиностроении. Рассмотрены проблемы получения и основные направления исследований в области композитных материалов, технологических процессов формообразования изделий и бережных локальных деструктивных технологии.

Ключевые слова: композитный материал, стабильность свойств, формообразование, аддитивные технологии.

Среди основных направлений технологического развития промышленного комплекса Российской Федерации в долгосрочной перспективе до 2020 года ожидается создание новых материалов, превосходящих по физико-механическим и эксплуатационным свойствам стали и сплавы. По экспертным оценкам, в ближайшие двадцать лет свыше 80 % материалов будут заменены принципиально новыми (в частности, прогресс ожидается в создании композитных материалов, керамики, материалов для микроэлектроники и др.).

Поэтому одним из направлений совершенствования современных конструкций и повышения их технологичности является применение композитных материалов.

Вместе со всеми плюсами – малой плотностью, пространственно ориентированной сопротивляемостью внешним силам, целенаправленным комплексом свойств (демпфированием колебаний, заданным уровнем модуля упругости, термостойкостью и т.д.) композитные материалы ставят перед технологами существенные проблемы механической обработки [1–6], а перед конструкторами – проблемы прочностных и деформационных расчетов [7–9]. Эти трудности вызваны присущей этим материалам особенностью строения.

Учет реальных свойств материалов имеет большое значение в развитии механики твердого деформируемого тела. Классическое представление о сплошном, однородном, изотропном, линейно-упругом теле в большинстве случаев уже не удовлетворяет практику, т.к. почти все материалы, применяемые в машиностроении и других отраслях: металлы и сплавы с неоднородной поликристаллической структурой, бетоны, армированные пластики и т.п. – являются композитными материалами.

Применяемые в виде покрытий композитные материалы позволяют формировать заданные специфические свойства рабочих поверхностей (фрикционные или антифрикционные свойства, стойкость к агрессивным средам определенного состава, заданные деформационные свойства и т.д.). К настоящему времени сформировались два основных направления применения композитных материалов в различных отраслях промышленности: новые конструктивные решения с использованием композитных материалов; ремонт, восстановление и профилактика износа рабочих поверхностей деталей и конструкций [10].

Современные мировые тенденции развития технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов сводятся к разработке и совершенствованию высокопроизводительных технологий, требующих минимальной доработки до готового изделия. К ним относятся: пропитка под давлением в закрытые формы (RTM – resin transfer molding), вакуумная инфузия полимера (IR – infusion resin), безавтоклавные методы (OoA – out of autoclave), программируемая роботизированная выкладка (PFP – programming fiber placement) и силовая намотка (Winding).

Технологический прорыв в разработке и совершенствовании данных технологий тесно связан с проведением крупномасштабных фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении. Подтверждением актуальности проблематики данных исследований является проведенный анализ публикационной активности мирового научного сообщества (данные Scopus), отражающий возрастающую тенденцию количества научных исследований в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов в период с 2000–2012 гг. (рис. 1).

По итогам 19-й международной конференции по композитным материалам (ICCM-19), которая проходила в г. Монреале (Канада) с 28 июля по 2 августа 2013 года, проблемы развития технологий производства материалов и изделий стоят на втором месте (12 % докладов), уступая проблемам прочности композитных материалов (около 14 % докладов) [11]. Здесь первыми по значимости факторами были стабильность и производительность процессов изготовления – главные характеристики для массового производства. Стабильность достигается автоматизаций производства. По этому пути идут компании Boeing, Airbus, ESA и другие крупные производители, используя роботы для выкладки лент из препрегов углепластика.

В тройку лидеров входит США, Китай и Япония, а Россия в этом списке занимает 9 место (табл. 1).

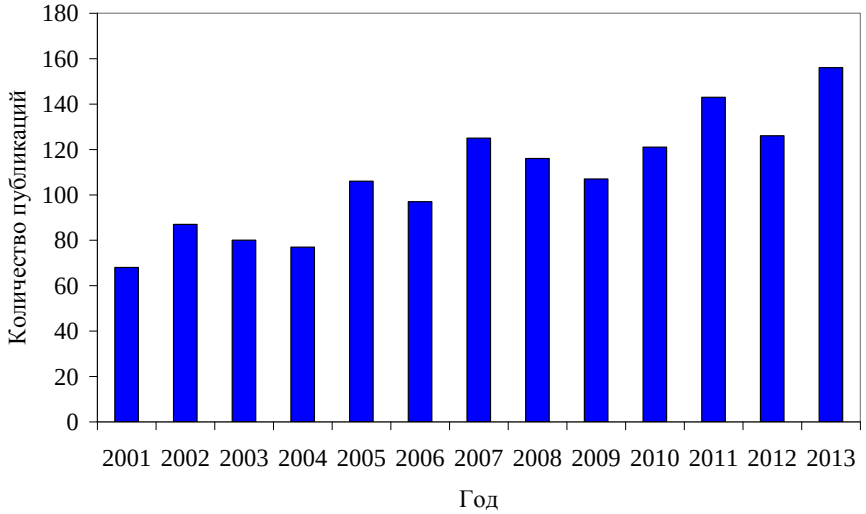


Рис. 1. Тенденция научных исследований в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов

Таблица 1

Распределение количества научных публикаций в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов по странам

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	615
2	Китай	314
3	Япония	129
4	Германия	118
5	Италия	106
6	Канада	102
7	Великобритания	99
8	Франция	92
9	Российская Федерация	90
10	Южная Корея	88
…	…	…
40	Пакистан	4

Основной технологический прогресс делается сейчас в сфере термопластичных матриц, имеющие низкую вязкость при нагревании, обеспечивающую минимальную пористость и качественную адгезию к волокнам. Предлагается использовать весь спектр химических и физических видов активации поверхности волокон, включая травление, выращивание нанотрубок, плазменную обработку и др. Для авиационных деталей сложной

формы предложено использовать горячее прессование хаотически уложенных коротких лент (ROS – randomly oriented strand) из однонаправленного углепластика с термопластичной матрицей [11].

Основными проблемами, сдерживающими прогресс РФ в данных технологиях, являются слабая база фундаментальных знаний о причинах и методах коррекции нестабильностей свойств конструкционных композитных материалов, в частности:

1) плохая адгезия частиц наполнителя к полимерной матрице, что при эксплуатации изделия приводит к деструкции композита;

2) неоднородность физико-механических свойств композита по объему, вследствие неупорядоченного расположения наполнителя в полимерной матрице и не регламентированного значения варьирования размеров агломератов наполнителя;

3) большие размеры агломерированных частиц наполнителя (100–400 мкм), что снижает качество окончательной поверхности, формируемой после финишной механической обработки – образование кратеров, вследствие деструкции частиц из матрицы, существенная переменность показателей шероховатости поверхности и др.

В соответствии с данными Scopus на период 2000–2012 гг., в мировом рейтинге научных исследований в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др. РФ занимает лишь 17 место (табл. 2).

Научные центры – лидеры в фундаментальных и прикладных исследованиях в этом направлении представлены в табл. 3.

Существующее противоречие между 9 местом РФ в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов и 17 местом в мировом рейтинге научных исследований в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др. объясняется тем, что практически 90 % технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов в РФ оснащаются импортным оборудованием, поставляемым с технологией под изготовление конкретного изделия. В свою очередь, применение данного оборудования ставит жесткие требования по структуре и свойствам конструкционных композитных материалов, что приводит к импортозависимости и по самим материалам.

Мировая практика показывает, что отмеченные недостатки составов и строения композитов, в настоящее время довольно успешно решаются путем введения в них наночастиц. Это позволяет создавать композиты и конструкции из них с новыми свойствами [12, 13]. Появляется возможность управлять такими важными характеристиками материала, как прочность, износостойкость, теплопроводность, влагопоглощение и т. д. Помимо кон-

струкционного нанокомпозита, путем введения определенных наночастиц в полимерную матрицу можно получить функциональные нанокомпозиты, например, меняющие электрические свойства под действием внешних нагрузок, изменения температуры и др. Это уникальное свойство может быть использовано, как составная часть полимерного нанокомпозита, отвечающая за его функциональные свойства.

Таблица 2

Распределение количества научных публикаций в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	214
2	Китай	128
3	Япония	41
…	…	…
17	Российская Федерация	7

Таблица 3

Мировой рейтинг научных центров в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др.

№ п/п	Организация	Количество публикаций в 2012 г.
1	Harbin Institute of Technology	10
2	Texas A and M Universyty	10
3	Korea Advanced Institute of Science & Technology	10
…	…	…
9	Massachusetts Institute of Science & Technology	6
…	…	…
40	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	4

Таким образом, формируется новый класс композитных материалов – конструкционный многофункциональный композитный наноматериал

Анализ тенденции исследований в области многофункциональных композитных наноматериалов, показывает экспоненциальное возрастание их числа, что говорит об актуальности данного направления (рис. 2).

В тройку лидеров входит США, Китай и Индия, а Россия в этом списке не представлена (табл. 4).

Разработка конструкционного многофункционального композитного наноматериала и развитие аддитивных технологий потребует исследований в области технологий локальной деструктивной обработки изделий из нанокомпозитов – высокоточной размерной обработки поверхностей изделий из нанокомпозитов.

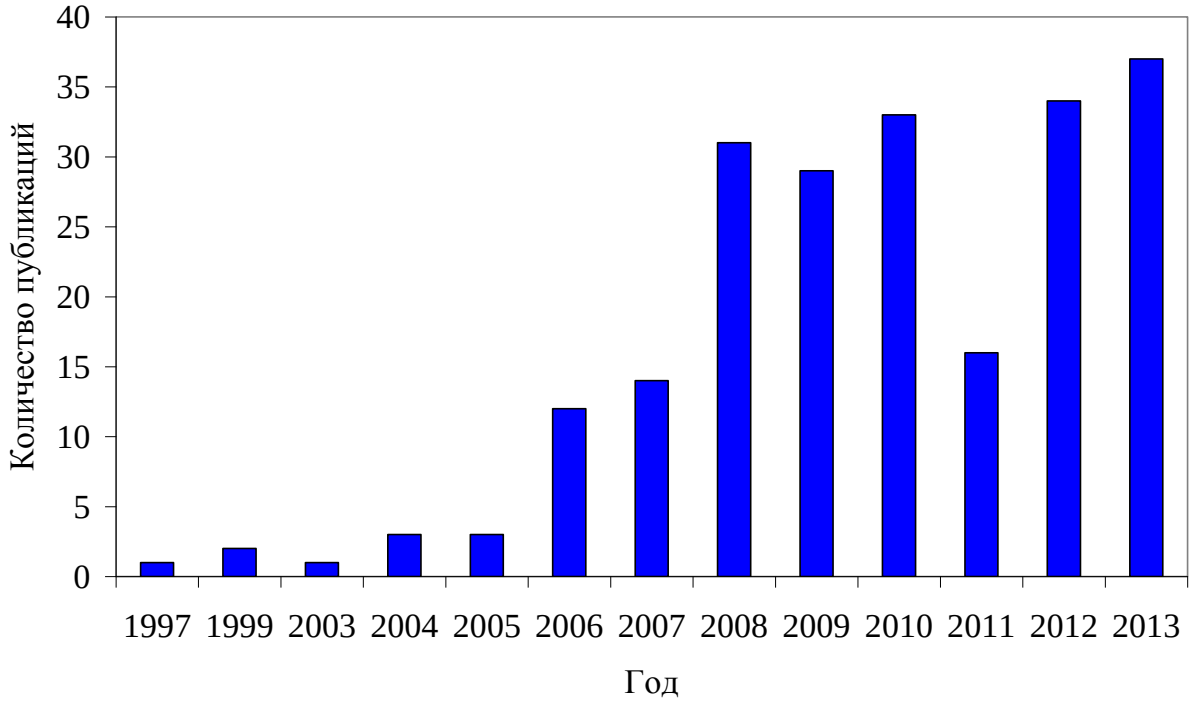


Рис. 2. Тенденция научных исследований
в области многофункциональных композитных наноматериалов

Таблица 4

Распределение научных исследований в области многофункциональных композитных наноматериалов по странам

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	55
2	Китай	49
3	Индия	17
4	Южная Корея	16
5	Германия	14
6	Испания	13
7	Япония	11
8	Италия	8
9	Франция	8
10	Великобритания	5
…	…	…
33	Вьетнам	1

Актуальность данных исследований обусловлена тем, что имеющийся опыт применения технологии для стандартных конструкционных сталей и сплавов при обработке композитов показывает полную его неработоспособность [1, 2].

Можно выделить основные недостатки существующих технологий механической обработки изделий из нанокомпозитов:

1. Интенсивный износ (разрушение) режущего инструмента, вследствие неоднородной структуры композита (недостатки составов и технологии получения композитов) и интенсивной активации химических процессов образования твердых углеродных соединений в зоне деформации. Последнее особенно характерно для процессов абразивной обработки, характеризующихся высокой температурой, скоростью и степенью деформации.

2. Неоднородность физико-механических свойств композита по объему, не регламентированное значение варьирования размеров наполнителя приводят к ударным нагрузкам на режущий инструмент и в целом на технологическую систему. Это приводит к усталостному разрушению режущей кромки инструмента, к возникновению в поверхностном слое композита знакопеременных остаточных напряжений, а в ряде случаев полной деструкции композита от основного материала изделия [14].

3. Используемые композитные материалы имеют низкий порог теплостойкости, что вызывает деструкцию полимерного связующего при резании. Деструкция происходит за счет действия больших локальных напряжений и высокой температуры, превышающей теплостойкость полимера, при этом происходит выгорание связующего и на поверхности обработанной детали появляются дефекты.

4. Композитные материалы имеют низкую теплопроводность, что существенно влияет на соотношение составляющих общего теплового баланса. Так, теплопроводность композитного материала в основном составляет 0,14–0,8 Вт/м·К, что в несколько сот раз ниже чем у металлов. Это обуславливает слабый отвод теплоты со стружкой и вглубь обрабатываемой заготовки, поэтому основная доля теплоты при обработке композита отводится через режущий инструмент.

Таким образом, для создания опережающего научно-технического задела Российской Федерации в области формообразования изделий с заданными эксплуатационными свойствами необходимо решить крупную проблему, связанную с разработкой отечественных конструкционных многофункциональных композитных наноматериалов. Это в свою очередь позволит достичь существенного развития отечественных аддитивных технологий формообразования и локальной деструктивной обработки изделий из нанокомпозитов.

Библиографический список

1. Дьяконов, А.А. Анализ механики микрорезания и дисперсной структуры металлополимеров / А.А. Дьяконов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1(297). – С. 83–88.

2. Дьяконов, А.А. Особенности обработки резанием металлополимеров / А.А. Дьяконов, А.А. Кошин // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 11(29). – С.14–18.

3. Komanduri, R. Machining of Fiber Reinforced Composite / R. Komanduri // Mechanical Engineering. – 1993. – V.115(4). – Pp. 58–66.

4. Wang, X.M. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. –V. 43. – Pp. 1015–1022.

5. Шмидт, И.В. Напряженное состояние полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 7. – С. 27–31.

6. Кошин, А.А. Модель нагрева заготовки при шлифовании слоистой полимерно-композитной системы / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3. – С. 52–57.

7. Сапожников, С.Б. МКЭ моделирование силовых композитных обшивок транспортных средств / С.Б. Сапожников, А.А. Шакиров, Р.Р. Абдрахимов // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2013. – № 2. – Т. 13. – С. 58–62.

8. Сапожников, С.Б. Особенности разрушения пластины из хрупкого материала при взаимодействии с ударником / С.Б. Сапожников, О.А. Кудрявцев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 177–181.

9. Сапожников, С.Б. Использование композитных материалов на основе поликорбоната в защитных структурах / С.Б. Сапожников, А.А. Левинский // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 187–193.

10. Кошин, А.А. Систематика ремонтных полимерно-композитных материалов / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 5. – С. 39–44.

11. Сапожников, С.Б. 19-я международная конференция по композитным материалам (ICCM-19) / С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2013. – № 4. – С. 58–72.

12. Абдрахимов, Р.Р. Исследование реологии суспензий для эффективного диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле / Р.Р. Абдрахимов, С.Б. Сапожников, В.В. Синицын // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 68–74.

13. Форенталь, Г.А. Оценка упругих и прочностных свойств эпоксидного композита, наполненного наночастицами оксида кремния / Г.А. Форенталь, С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2011. – № 2. – С. 21–27.

14. Щуров, И.А. Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов / И.А. Щуров, И.С. Болдырев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 143–147.

К содержанию

УДК 621.002.2

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТНЫХ ВАРИАНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЁТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТОРСКИХ ПАРАМЕТРОВ

В.Л. Кулыгин, И.А. Кулыгина

В статье рассматриваются теоретические и практические основы структурного подхода к анализу проектных решений эффективных технологий изготовления различных машиностроительных изделий для условий действующего производства в целях определения оптимального соотношения производительности труда и себестоимости выпускаемой продукции с учётом имеющихся технологических и конструкторских параметров.

Ключевые слова: технологический процесс, проектные решения, эффективные технологии.

В процессе проектирование современного, эффективного в управлении и конкурентоспособного производства в целях определения оптимального соотношения производительности труда и себестоимости выпускаемой продукции, разрабатывается нескольких возможных вариантов типовых технологических процессов обработки детали–представителя, которые пригодны для изготовления любой детали данной классификационной группы с небольшими технологическими изменениями по переходам или операциям.

Из всей номенклатуры деталей, планируемых к выпуску на производственном участке, выбирается деталь – представитель, которая наиболее полно конструктивно и технологически характеризует всю группу деталей.

В данном проектном решении такой деталью является «корпус–основание датчика давления» (рис. 1, 2).

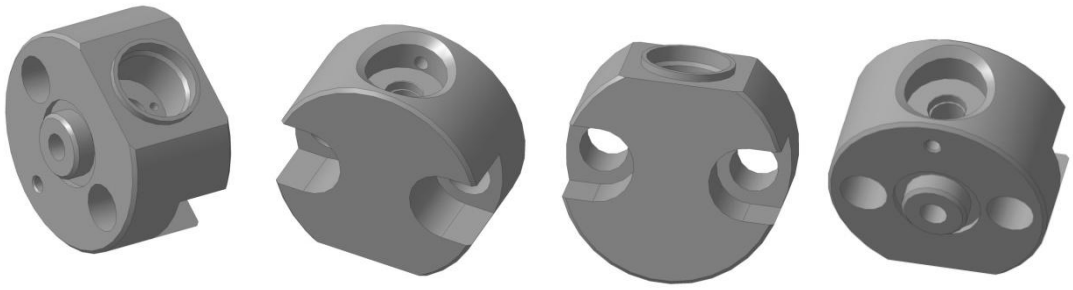


Рис. 1. Модель детали «корпус–основание датчика давления»

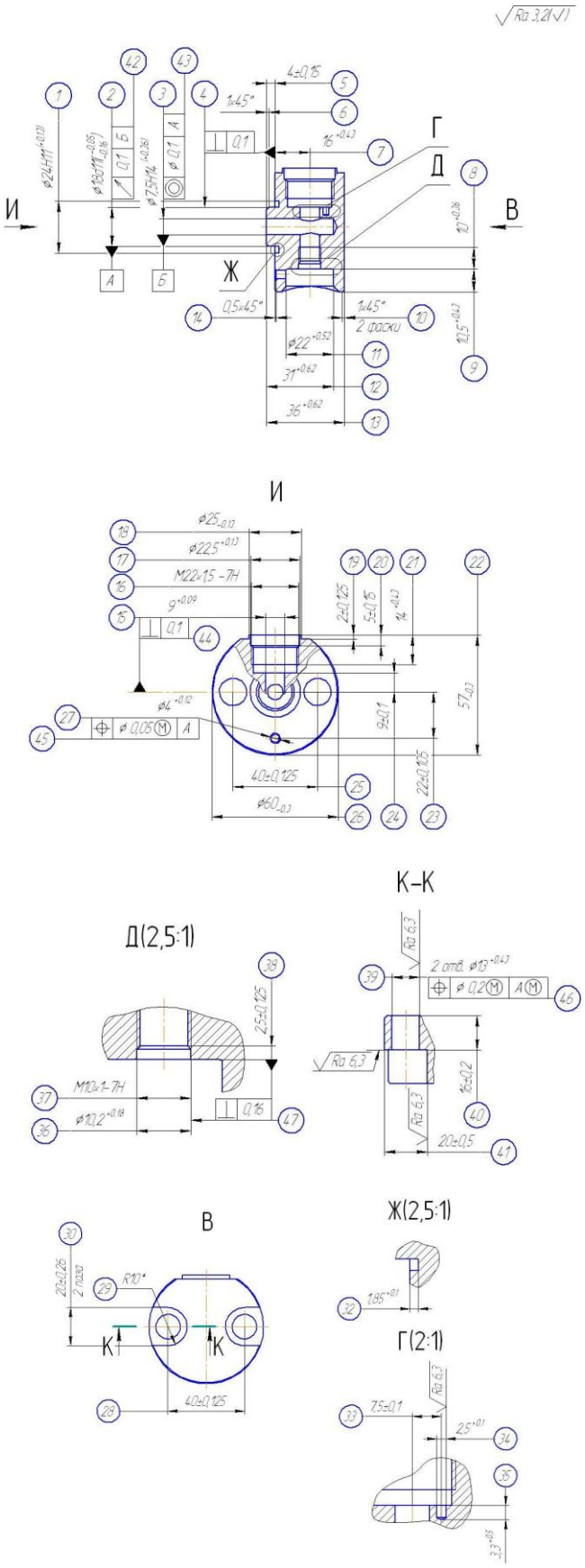
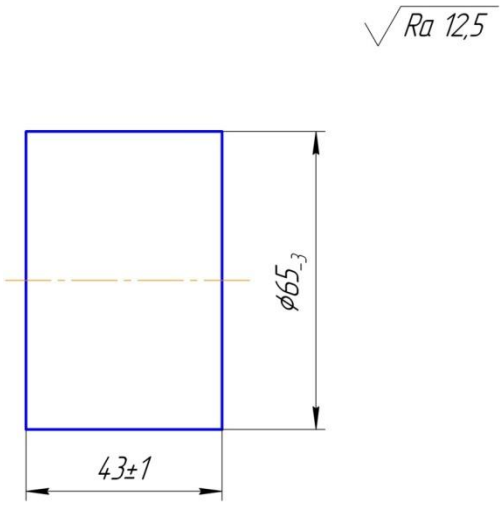


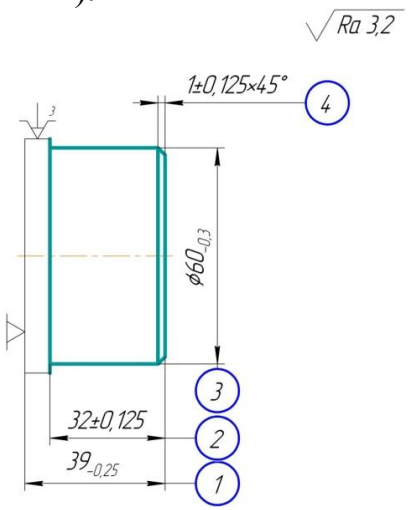
Рис. 2. Рабочий чертёж детали «корпус–основание датчика давления»

Типовой технологический процесс обработки детали типа «корпус» в виде операционных эскизов для проектного варианта № 1 выглядит следующим образом:

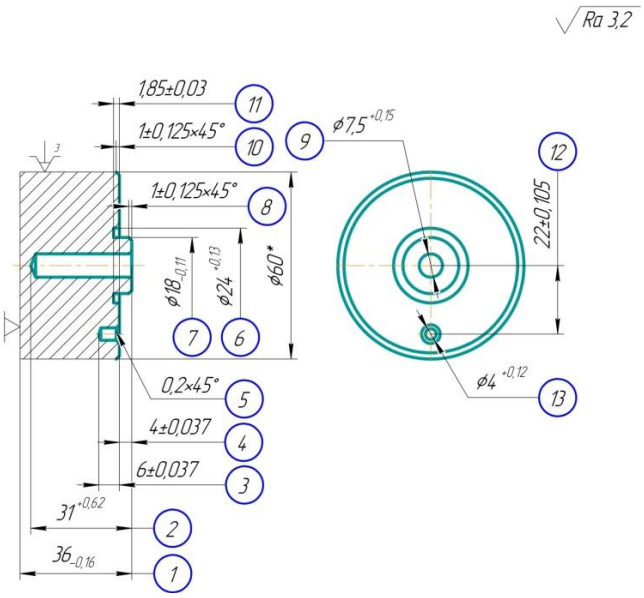
000 – заготовительная операция (на данной операции производится мерная нарезка заготовок из пруткового материала).



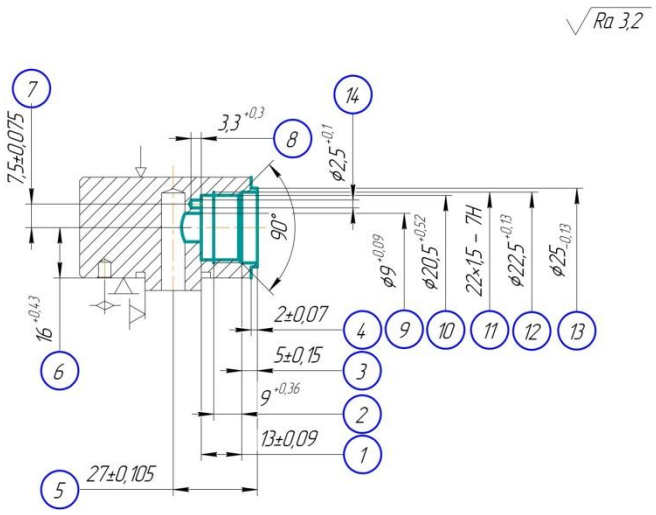
005 – токарная операция (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон с упором по торцу, обработка ведётся по переходам) в следующей последовательности: переход 1 – точить торец в размер «1»; переход 2 – точить поверхность и фаску, выдерживая размеры «2», «3» и «4»).



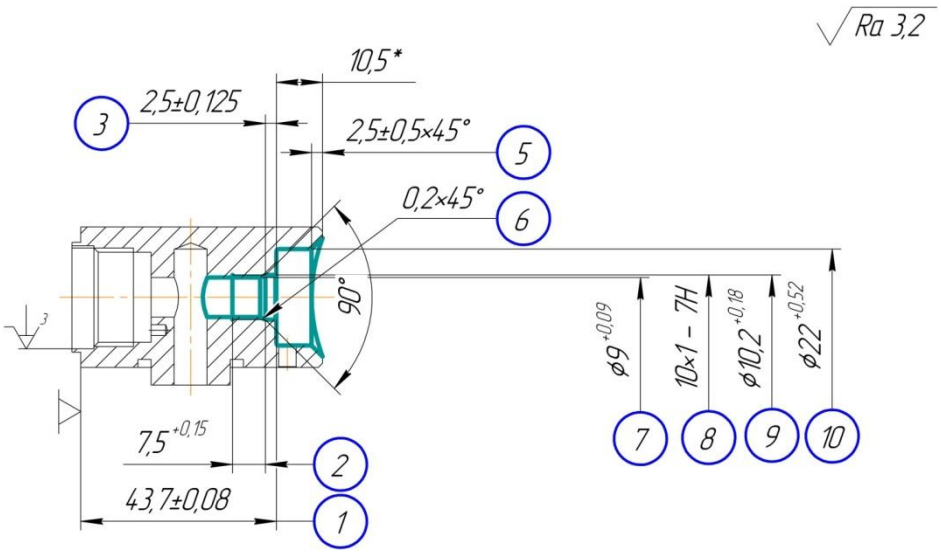
010 – токарная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон по ранее обработанной поверхности с упором по торцу, обработка ведётся по переходам: переход 1 – подрезать торец «1»; переход 2 – точить ∅ «6», выдерживая «4» и «12»; переход 3 – подрезать торец и фаски, выдерживая «4», «7» , «8» и «10»; переход 4 – точить поверхность паза, выдерживая «6», «7» и «11»; переход 5 – обработать отверстие, выдерживая «9» и «2»; переход 6 – обработать отверстие, выдерживая «13», «3» и «12»; переход 7 – зенковать фаску «5»).



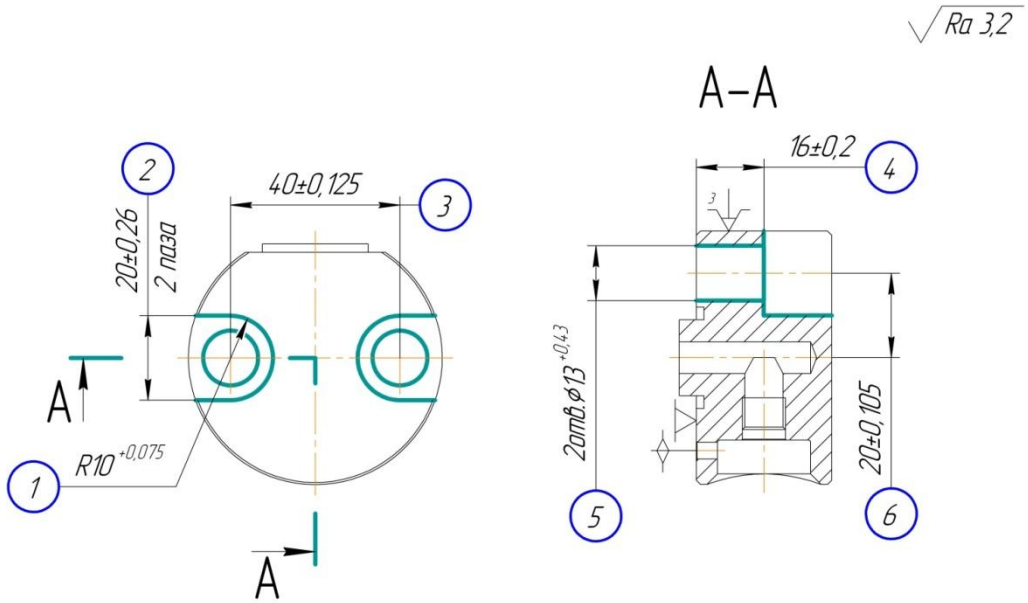
015 – комплексная операция (на данной операции установка заготовки осуществляется в специальное приспособление с базированием по наружной поверхности, торцу и с угловой координацией на срезанный палец, обработка ведётся по переходам: переход 1 – фрезеровать поверхности, выдерживая «4», «5», «6» и «13»; переход 2 – обработать отверстие, выдерживая «9» и «6»; переход 3 – расточить отверстие, выдерживая «3» и «12»; переход 4 – расточить отверстие, выдерживая «10» и «1»; переход 5 – фрезеровать фаску; переход 6 – нарезать резьбу, выдерживая «11» и «2»; переход 7 – обработать отверстие, выдерживая «14», «8» и «7»).



020 – токарная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в патроне с базированием по внутреннему отверстию, полученному на предыдущей операции и торцу, обработка ведётся по переходам: переход 1 – обработать отверстия и фаску, выдерживая «3», «7», «9» и «6»; переход 2 – расточить отверстие, выдерживая «10» и «1»; переход 3 – нарезать резьбу «8» на глубину «2»; переход 4 – фрезеровать фаску «5»).

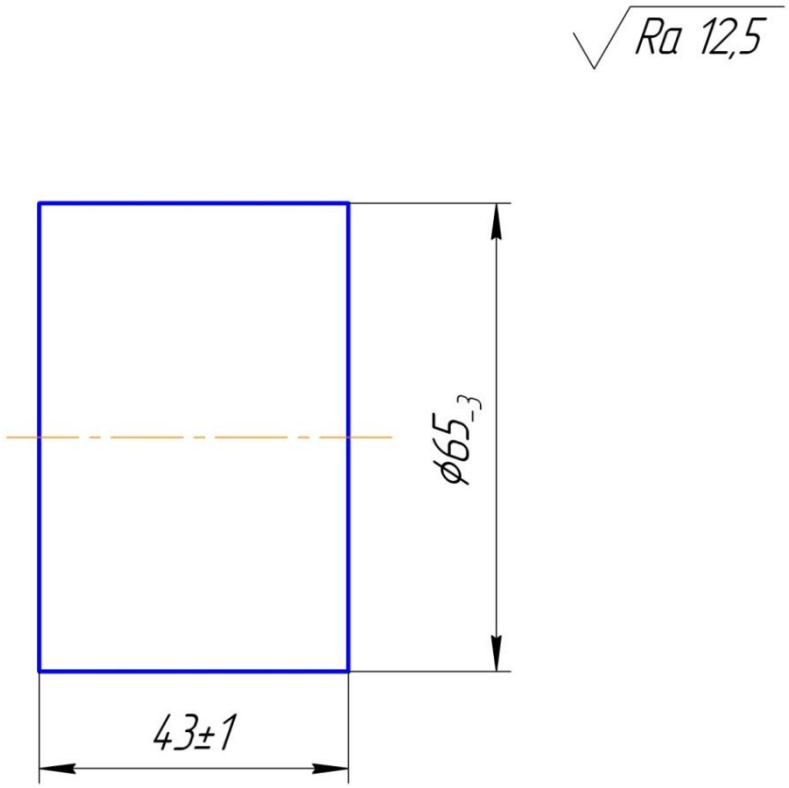


025 – токарная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон по ранее обработанной поверхности с упором по торцу и угловой координацией по отверстию на срезанный палец, обработка ведётся по переходам: переход 1 – фрезеровать два паза, выдерживая «1», «2», «3», «4» и «6»; переход 2 – обработать два отверстия, выдерживая «5», «3», и «6»).

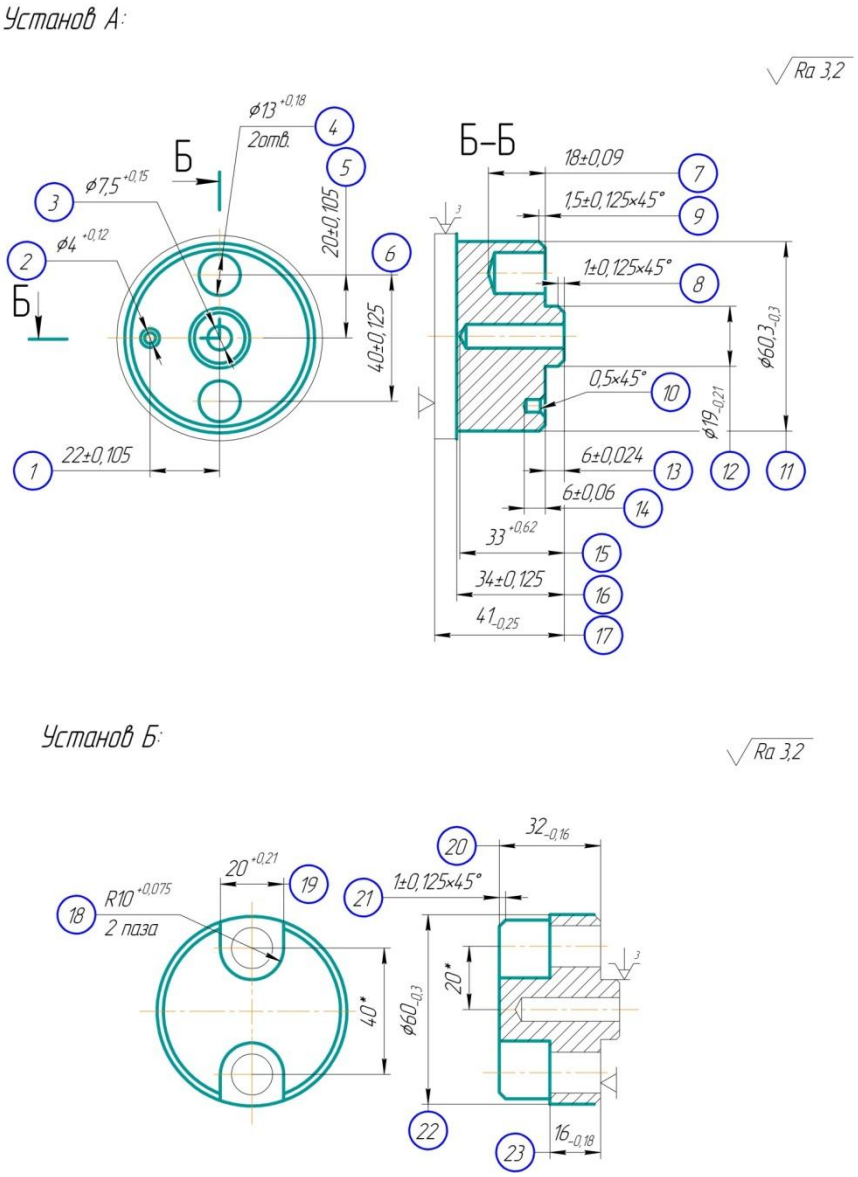


Типовой технологический процесс обработки детали типа «корпус» для проектного варианта № 2 выглядит следующим образом:

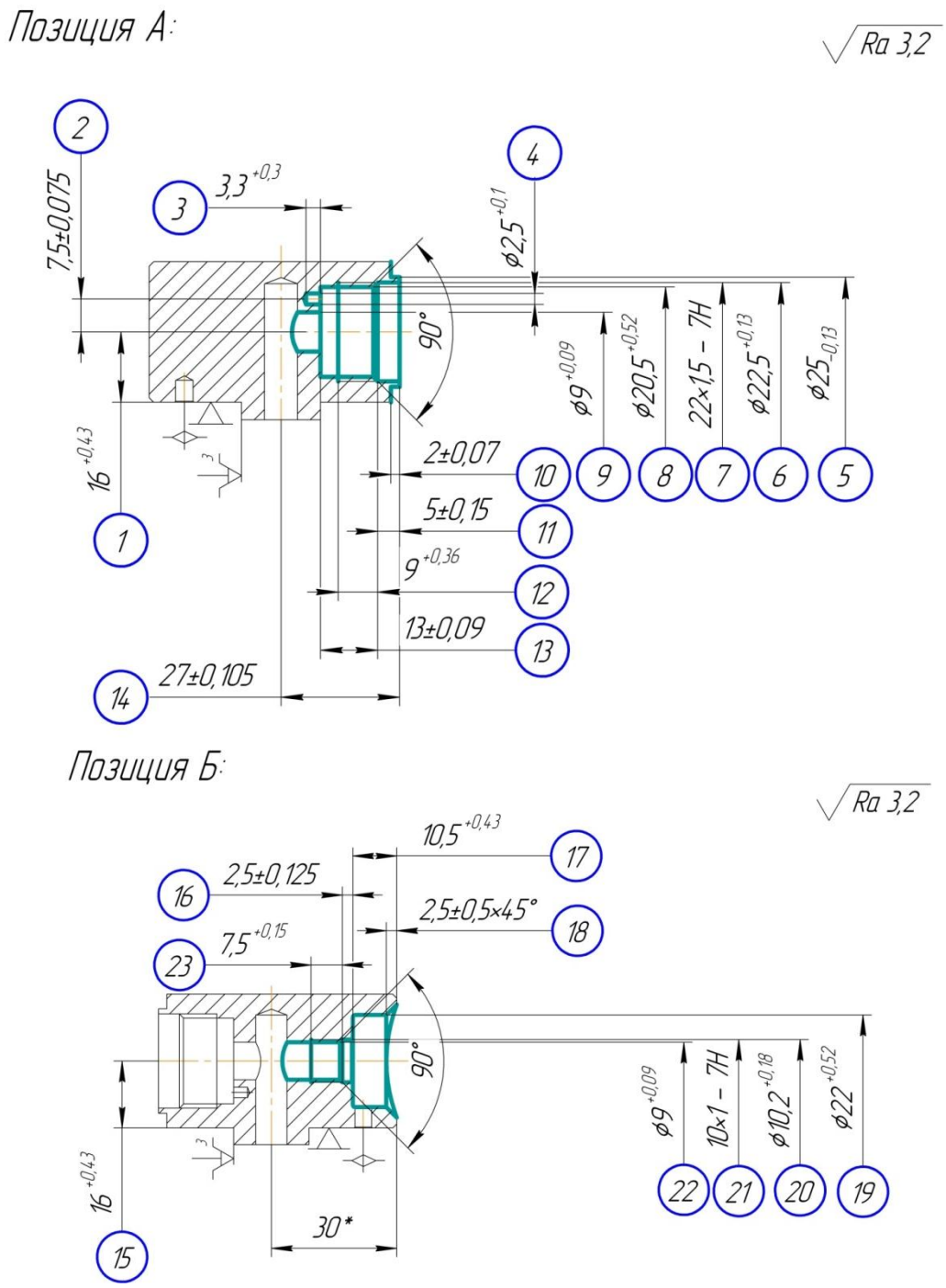
000 – заготовительная операция (на данной операции производится мерная нарезка заготовок из пруткового материала).



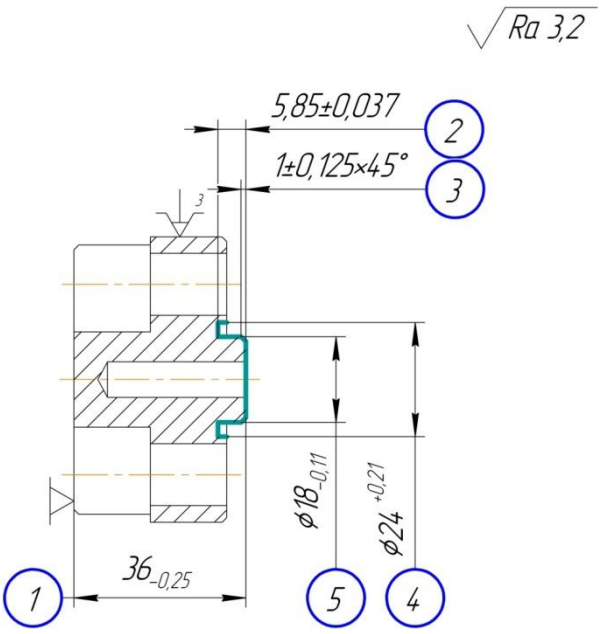
005 – комплексная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон с упором по торцу в два установа, обработка поверхностей ведётся по переходам: переход 1 – подрезать торец, выдерживая «17»; переход 2 – точить поверхность, выдерживая «11» и «16»; переход 3 – точить поверхности и фаски, выдерживая «8», «9», «12» и «13»; переход 4 – обработать отверстие, выдерживая «3» и «15»; переход 5 – обработать отверстие, выдерживая «2», «1», «10» и «14»; переход 6 – обработать отверстия, выдерживая «4», «5», «6» и «7»; переход 7 – переустановить заготовку; переход 8 – точить торец и фаску, выдерживая «20», «21», «22»; переход 9 – фрезеровать два паза, выдерживая «18», «19», «23»).



010 – комплексная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон по ранее обработанной поверхности с упором по торцу и угловой координацией по отверстию на срезанный палец в две позиции, обработка ведётся по переходам: переход 1 – фрезеровать поверхности, выдерживая «1», «5», «10» и «14»; переход 2 – обработать отверстие, выдерживая «1» и «9»; переход 3 – расточить поверхность, выдерживая «6», «1» и «11»; переход 4 – расточить поверхность, выдерживая «8», «1» и «13»; переход 5 – нарезать резьбу, выдерживая «7» и «12»;– переход 6 – обработать отверстие, выдерживая «4», «3» и «2»; переход 7 – повернуть деталь на 180˚; переход 8 – обработать отверстие, выдерживая «15», «16», «20» и «22»; переход 9 – расточить поверхность, выдерживая «19» и «17»; переход 10 – фрезеровать фаску, выдерживая «18»; переход 11 – нарезать резьбу, выдерживая «21» и «23»).



015 – токарная операция с ЧПУ (на данной операции установка заготовки осуществляется в трёхкулачковый патрон с упором по торцу, обработка поверхностей ведётся по переходам: переход 1 – подрезать торец, выдерживая «1»; переход 2 – точить поверхность паза в размеры «2», «3», «4» и «5»).



Анализ проектных решений по определению эффективных технологий изготовления различных машиностроительных изделий для условий действующего производства ведётся по нескольким направлениям, основными из которых являются:

1. В качестве исходной заготовки для данных технологических процессов применяется периодический прокат. Основным критерием для выбора данного способа получения заготовок является марка материала, из которого изготавливается корпус. Сталь 12Х18Н10Т-ВД по ГОСТ ТУ 14–1–3581–83 является нержавеющей, жаропрочной сталью с многокомпонентным легированием. Получение заготовок другими способами из данной марки материала экономически не целесообразно и не эффективно.

Применение заготовок из периодического проката позволяет обойтись без собственного заготовительного производства на предприятие, открывает возможности для автоматизации отдельных операций технологического процесса обработки квалификационной группы деталей.

2. Проектный вариант № 1 технологического процесса является наиболее дифференцированным. Для его обслуживания потребуется 5 рабочих станочников. Для реализации этого проектного варианта было выбрано наиболее простое технологическое оборудование соответственно с меньшей стоимостью. Но это повлекло за собой необходимость применения специальной технологической оснастки. Поэтому при смене выпускаемых изделий, может возникнуть необходимость проектирования и изготовления новых приспособлений, что приведёт к дополнительным материальным затратам. Применение специальных приспособлений также оказывает влияние и на технологическую гибкость производства, существенно её занижая.

Эффективность такого технологического процесса не является оптимальной для данного производства.

3. Проектный вариант № 2 технологического процесса более сгруппирован и технологически насыщен за счёт применением более современного и гибкого технологического оборудования. Для осуществления данного технологического процесса потребуется 3 рабочих станочника. Это позволяет сократить техническую норму времени на обработку за счет уменьшения вспомогательного времени связанного с межоперационной переустановкой деталей. Но применение такого оборудования связано с применением более современного, но и более дорогостоящего режущего инструмента, что влечёт за собой определённое увеличение материальных затрат. Зато в этом проектном варианте применяется стандартная технологическая оснастка, что позволяет избежать дополнительных затрат при смене выпускаемых изделий и повысить технологическую гибкость производства.

Поэтому проектный вариант № 2 технологического процесса по оптимальному соотношению производительности труда и себестоимости выпускаемой продукции с учётом имеющихся технологических и конструкторских параметров является более эффективным для данного производства.

К содержанию

УДК 658.512 + 378.016:621

КОМПЕТЕНТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ПРЕПОДАВАНИЮ ДИСЦИПЛИН ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ЦИКЛА НАПРАВЛЕНИЯ «КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ»

В.Л. Кулыгин, И.А. Кулыгина

Рассмотрены содержание и основные сущностные характеристики компетенций на примере профессиональной компетенции в области проектно-конструкторской деятельности, показана роль компетентностного подхода в освоении теоретических и практических основ конструкторско-технологического обеспечения машиностроительных производств.

Ключевые слова: профессиональная компетенция, проектно-конструкторская деятельность.

Основной особенностью Основных образовательных программ высшего образования третьего поколения является то, что впервые они формируются на основе ФГОС ВПО, в которых результаты освоения материала студентами заданы не в виде дидактических единиц, определяющих минимум содержания образования, а общекультурными и профессиональными компетенциями. Названные компетенции являются государственными требованиями, а следовательно, ООП ВПО и включенные в них рабочие про-

граммы дисциплин должны гарантировать достижение их обязательного минимума всеми выпускниками ООП. При этом допускается, что уровень полноты освоения компетенций студентами устанавливается вузом самостоятельно и должен быть отражен в ООП. Конкретная компетенция может формироваться не одной дисциплиной, а рядом дисциплин, объединенных в модули. Таким образом, ООП и учебные планы должны строиться по модульному принципу. Необходимый уровень освоения компетенций обеспечивается количеством зачетных единиц (кредитов) предусмотренных учебным планом для того модуля учебных дисциплин, изучение которого формирует компетенции.

Результатом образовательного процесса должна стать не сумма информации, освоенная студентом в процессе обучения, а уровень квалификации выпускника, его способность самостоятельно и эффективно действовать в различных ситуациях (рисунок).

Для этого каждая компетенция должна обладать следующими тремя основными составляющими – знаниевой, деятельностной, ценностной.

Знаниевая составляющая отражает способность выпускника знать и понимать, т. е. иметь теоретические знания в определенной области. Знаниевая составляющая выражается термином «обучающийся должен знать…».

Деятельностная составляющая отражает способность выпускника оперативно применять полученные знания в конкретных практических ситуациях. Деятельностная составляющая выражается термином «обучающийся должен уметь…».

Ценностная составляющая отражает способность выпускника обладать определенными жизненными ценностями, как способом восприятия и оценки. Ценностная составляющая выражается термином «обучающийся должен владеть…».

Обеспечивать компетентностный подход должны компетентностно-ориентированный учебный план и график учебного процесса, состав, содержание и логические связи учебных дисциплин и модулей, всех видов практик, НИР, комплекс текущих, промежуточных и итоговых испытаний на соответствие подготовки студентов и выпускников ожидаемым результатам образовательного процесса и требованиям ФГОС ВПО.

Рассмотрим содержание и основные сущностные характеристики компетенций на примере профессиональной компетенции в области проектно-конструкторской деятельности «Выпускник должен обладать способностью разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию машиностроительных производств, оформлять законченные проектно-конструкторские работы (ПК-14)».

Данная компетенция подразумевает готовность студента к участию в разработке и обосновании проектов технологических процессов изготовления различных машиностроительных изделий.

Профессиональный уровень специалиста

Компетенция играет важную роль в освоении теоретических и практических основ методики проектирования технологических процессов для различны машиностроительных производств, а также в приобретении навыков и умений практической деятельности в области разработки и реализации проектно-конструкторских работ в области технологического проектирования.

Компетенция (ПК-14) связана с другими значимыми компетенциями:

в области проектно-конструкторской деятельности:

– способностью использовать основные закономерности, действующие в процессе изготовления машиностроительной продукции для производства изделий требуемого качества, заданного количества при наименьших затратах общественного труда (ПК-1);

– способностью собирать и анализировать исходные информационные данные для проектирования технологических процессов изготовления машиностроительной продукции, средств технологического оснащения, автоматизации и управления (ПК-5);

в области производственно-технологическая деятельность:

– способностью осваивать на практике и совершенствовать технологии, системы и средства машиностроительных производств (ПК-20);

– способностью выполнять мероприятия по эффективному использованию материалов, оборудования, инструментов, технологической оснастки, средств автоматизации, алгоритмов и программ выбора и расчетов параметров технологических процессов (ПК-22);

– способностью принимать участие в оценке уровня брака машиностроительной продукции и анализе причин его возникновения, разработке мероприятий по его предупреждению и устранению (ПК-30);

Определим актуальную структуру компетенции с учетом ее основных составляющих:

Знаниевая составляющая – «студент должен знать»:

– классификацию изделий машиностроения, их служебное назначение и показатели качества, жизненный цикл; материалы, применяемые в машиностроении, способы обработки, содержание технологических процессов сборки, технологической подготовки производства, задачи проектирования технологических процессов, оборудования, инструментов и приспособлений, состав и содержание технологической документации, методы обеспечения технологичности и конкурентоспособности изделий машиностроения;

– основные положения и понятия технологии машиностроения, теорию базирования и теорию размерных цепей как средства обеспечения качества изделий машиностроения; закономерности и связи процессов проектирования и создания машин, метод разработки технологического процесса изготовления машин, принципы производственного процесса изготовления машин, технологию сборки, правила разработки технологического процесса изготовления машиностроительных изделий;

– принципы нормирования точности и обеспечения взаимозаменяемости деталей и сборочных единиц;

– методы проектно-конструкторской работы; подход к формированию множества решений проектной задачи на структурном и конструкторском уровнях; общие требования к автоматизированным системам проектирования;

– области применения различных современных материалов для изготовления продукции, их состав, структуру, свойства, способы обработки;

– технико-экономические показатели и критерии работоспособности оборудования машиностроительных производств, классификацию оборудования;

– методы и средства повышения безопасности, технологичности и устойчивости технических средств и технологических процессов;

– физическую сущность явлений, происходящих в материалах в условиях производства и эксплуатации изделий из них под воздействием внешних факторов (нагрева, охлаждения, давления и т.д.), их влияние на структуру, а структуры – на свойства современных металлических и неметаллических материалов.

Деятельностная составляющая – «студент должен уметь»:

– снимать эскизы, выполнять и читать чертежи и другую конструкторскую документацию;

– определять технологические режимы и показатели качества функционирования оборудования, рассчитывать основные характеристики и оптимальные режимы работы;

– разрабатывать технологические процессы изготовления деталей и схемы сборки машин;

– выявлять схемы базирования деталей в процессе их изготовления и в машине;

– выявлять и рассчитывать размерные цепи с использованием методов достижения точности;

– рассчитывать припуски и операционные размеры;

– определять структуру временных и стоимостных затрат на выполнение операций технологического процесса;

– выявлять основные причины формирования погрешности при выполнении операций и намечать пути их уменьшения;

– проектировать и конструировать типовые элементы машин, выполнять их оценку по прочности и жесткости и другим критериям работоспособности;

– пользоваться инструментальными программными средствами интерактивных графических систем, актуальных для современного производства;

– формулировать служебное назначение изделий машиностроения, определять требования к их качеству, выбирать материалы для их изготовления, способы получения заготовок, средства технологического оснащения при разных методах обработки, технологии обработки и сборки;

– выбирать материалы, оценивать и прогнозировать поведение материала и причин отказов продукции под воздействием на них различных эксплуатационных факторов; назначать соответствующую обработку для получения заданных структур и свойств, обеспечивающих надежность продукции;

– выбирать эффективные исполнительные механизмы, определять простейшие неисправности, составлять спецификации;

– выбирать рациональные технологические процессы изготовления продукции машиностроения, инструменты, эффективное оборудование;

– выполнять работы по проектированию системы организации и управления производством и организовывать работу производственных коллективов;

– составлять структурные схемы производства, их математические модели как объектов управления, определять критерии качества функционирования и цели управления;

– выбирать рациональные технологические процессы изготовления продукции машиностроения, инструменты, эффективное оборудование;

– определять технологические режимы и показатели качества функционирования оборудования, рассчитывать основные характеристики и оптимальные режимы работы.

Ценностная составляющая – «студент должен владеть»:

– навыками работы на компьютерной технике с графическими пакетами для получения конструкторских, технологических и других документов;

– навыками выбора аналогов и прототипа конструкций при их проектировании;

– навыками оформления проектной и конструкторской документации в соответствии с требованиями ЕСКД;

– навыками проектирования типовых технологических процессов изготовления машиностроительной продукции;

– навыками выбора оборудования, инструментов, средств технологического оснащения для реализации технологических процессов изготовления продукции;

– навыками в разработке мероприятий по повышению безопасности и экологичности производственной деятельности;

– навыками выполнения расчетов и обоснований при выборе форм и методов организации производства, выполнения плановых расчетов, организации управления;

– навыками по сбору и анализу исходной информации для выбора средств технологического оснащения;

– навыками измерения износа, твердости и шероховатости поверхностей;

– методиками расчета размерных цепей, припусков и межоперационных размеров;

– основными принципами проектирования технологических процессов изготовления деталей и сборки машин в машиностроительном производстве.

Анализ знаниевой, деятельностной и ценностной составляющих компетенуии позволяют определить перечень дисциплин минимально необходимых для ее формирования. Перечень дисциплин учебного плана подготовки бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», задействованных при формировании профессиональной компетенции в области проектно-конструкторской деятельности (ПК-14) приведен в таблице.

Таблица

№ пп	**Наименование дисциплины**	Общая трудоемкость дисциплины, в зачетных единицах	Общая трудоемкость дисциплины, в часах
	Дисциплины базовой части профессионального цикла		
1	Инженерная графика	4	144
2	Сопротивление материалов	6	2136
3	Детали машин и основы конструирования	5	180
4	Метрология, стандартизация и сертификация	5	180
5	Основы технологии машиностроения	5	180
6	Процессы и операции формообразования	4	144
7	Оборудование машиностроительных производств, металлорежущие станки	6	216
	Дисциплины вариативной части профессионального цикла		
8	Технология машиностроения	6	216
9	Автоматизация производственных процессов в машиностроении	4	144
10	Проектирование машиностроительного производства	3	108
11	Основы проектирования приспособлений	4	144
12	Режущий инструмент	5,5	198
13	Технология обработки деталей на станках с ЧПУ	4	144
	Дисциплины по выбору вариативной части профессионального цикла		
14.1	Размерно-точностное проектирование	3	108
14.2	Размерный анализ технологических процессов		
15.1	Расчет конструктивных параметров машиностроительных изделий	3	108
15.2	Квалиметрия		
16.1	Технологическая оснастка интегрированного машиностроительного производства	3	108
16.2	Технологические средства оснащения интегрированных машиностроительных производств		
17.1	Инновационные технологии в машиностроении	3	108
17.2	Технологии специализированных методов обработки		
	Практики		
18	Учебная практика	6	4 недели
19	Производственная практика	6	4 недели
20	Производственная практика	4,5	3 недели
	Итоговая государственная аттестация		
21	Государственный экзамен	1,5	1 неделя
22	Защита выпускной квалификационной работы	10,5	7 недель

Таким образом, при формировании компетенции (ПК-14) задействовано 22 составляющих учебного плана по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» подготовки бакалавров имеющих общую трудоемкость 102 зачетных единицы. Оценив долю затрат времени аудиторных занятий и самостоятельной работы студента на формирование конкретной компетенции по отдельным дисциплинам можно оценить общую трудоемкость формирования компетенции при освоении основной образовательной программы.

К содержанию

УДК 658.512–52 + 621.002.2 + 004.388

ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИЙ КАЛЬКУЛЯТОР МАШИНОСТРОИТЕЛЯ

А.А. Лошкин, В.Ю. Шамин

В машиностроении, оформляя документацию, конструктор или технолог оперирует размерами, которые чаще всего имею предельные значения. Рассчитывая проекции угловых размеров, им приходится учитывать колебания не только линейных размеров, но и угловых величин. В этих случаях определение тригонометрических функций требует получения многократных результатов для анализа участия в расчетах минимальных и максимальных углов и линейных размеров. В представленной работе предложен автоматизированный калькулятор для расчета тригонометрических функций с предельными углами и размерами.

Ключевые слова: тригонометрические функции; предельные значения; функция переменных; границы множества; веб-калькулятор.

Для полного размерного анализа изделия достаточно просчитать размерные цепи в двух или трёх взаимно перпендикулярных плоскостях. При этом в чертежах, порой, встречаются размеры, заданные под углом к основным расчётным проекциям. В таких случаях перед технологом встаёт задача учёта непараллельных звеньев.

Методика расчёта цепей с непараллельными звеньями широко известна [1–3]. Она заключается в том, что в основном уравнении цепи каждое звено сопровождается передаточным коэффициентом. Для параллельных звеньев этот коэффициент равен 1 или –1, в зависимости от того, является данное звено увеличивающим или уменьшающим, для непараллельных он равен значению соответствующей тригонометрической функции от угла наклона звена. Погрешность же угла предлагается учитывать либо введением дополнительного звена, либо просто отбросить (если ей можно пренебречь).

За последние 20–30 лет вычислительная техника и программное обеспечение шагнули далеко вперёд, что позволяет решать подобные задачи «в лоб» без введения вспомогательных сущностей, и на основе общей постановки.

Рассмотрим простую схему (рис. 1). Для размера A заданного под углом α требуется найти проекции:

$$B_h = A \cos \alpha;$$
$$B_v = A \sin \alpha,$$

где α также является размером со своими допуском и отклонениями.

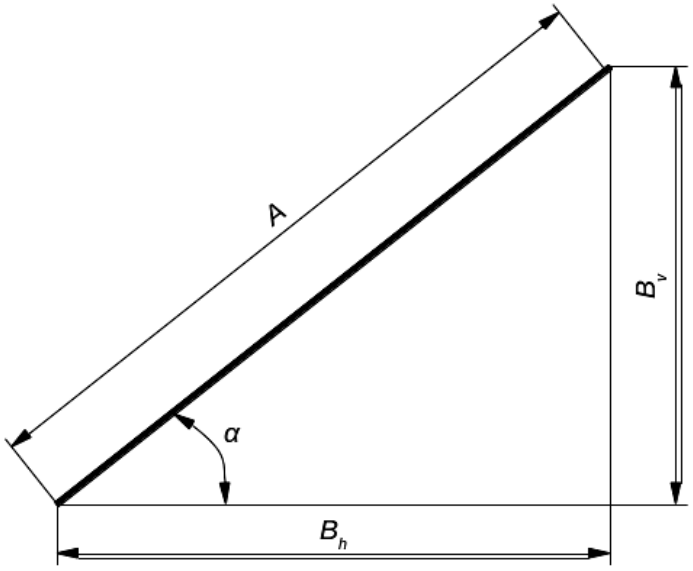


Рис. 1. Линейный размер и его проекции

В этом примере пока не определены функции вычисления синуса и косинуса от размера, а также умножения размера A на их результат.

Если рассмотреть поставленную задачу в более общем случае, то приходим к следующей постановке: над множеством размеров заданы функции, отображающие это множество в себя, и стоит вопрос об их вычислении. Изначально имеем функции типа f: $\mathbb{R}^m \mapsto \mathbb{R}$ (действительные функции от m действительных переменных). Таковыми в вышеприведённом примере являются тригонометрические функции ($m = 1$), а также умножение ($m = 2$).

Как же применить эти функции к размерам? Любой размер A можно рассматривать как отрезок на действительной прямой между его предельными значениями A_{min} и A_{max}:

$$A = \{\, a : \; A_{min} \le a \le A_{max} \,\}.$$

Применив функцию f к каждой точке a этого отрезка, получим множество точек–образов (рис. 2). Одноместной функцией f от размера A назовём отображение A в B:

$$B = f(A) \;\Leftrightarrow\; B = \{ f(a),\ a \in A \}.$$

Здесь имеет смысл потребовать от функции f быть ограниченной и непрерывной на исходном отрезке. Тогда точные верхняя и нижняя границы полученного множества будут являться предельными значениями искомого размера:

$$B_{min} = min\ f\ (A);$$
$$B_{max} = max\ f\ (A).$$

Если f – функция m переменных, то предельные значения получаются из выражений:

$$B_{min} = min\ f\ (A_1, ..., A_m);$$
$$B_{max} = max\ f\ (A_1, ..., A_m).$$

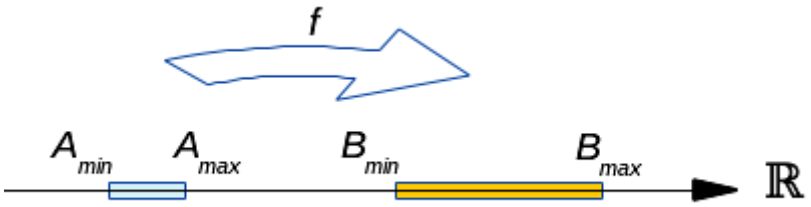


Рис. 2. Отображение размера A в B

Если функция f монотонна на рассматриваемом отрезке, то предельные значения легко находятся. Для возрастающей функции имеем:

$$B_{min} = f_{возр}\ (A_{min}),$$
$$B_{max} = f_{возр}\ (A_{max});$$

– для убывающей

$$B_{min} = f_{убыв}\ (A_{max}),$$
$$B_{max} = f_{убыв}\ (A_{min}).$$

В общем же случае придётся находить экстремумы f. Например, в случае вычисления синуса от размера 90° ± 1° (максимум достигается в середине отрезка 89...91, минимум – на концах). То же касается функций многих переменных.

Для примера рассчитаем проекцию B_h (см. рис. 1) для случая A = 20,1...20,2 и α = 45° ± 0,1°. Найдём сначала размер C = cos α, затем $B_h = A \cdot C$. Функция cos на отрезке 44,9...45,1 убывающая, поэтому:

$$C_{min} = cos\ \alpha_{max} = cos\ (45{,}1) \approx 0{,}70587;$$
$$C_{max} = cos\ \alpha_{min} = cos\ (44{,}9) \approx 0{,}70834.$$

Умножение рассматриваем как двухместную функцию. Она достигает минимума в точке (A_{min}, C_{min}) и максимума в точке (A_{max}, C_{max}), поэтому:

$$B_{h\,min} = A_{min} \cdot C_{min} = 20{,}1 \cdot 0{,}70587 = 14{,}188;$$
$$B_{h\,max} = A_{max} \cdot C_{max} = 20{,}2 \cdot 0{,}70834 = 14{,}308.$$

Результат: B_h = 14,188...14,308.

Рассмотрим теперь случай расчёта размерной цепи вероятностным методом. Поле допуска замыкающего звена определяется по формуле:

$$T_\Sigma = \frac{1}{\lambda_\Sigma}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i^2 T_i^2}$$

где λ_i – коэффициент относительного рассеяния соответствующего i-го составляющего звена. Его значение зависит от принятого закона распределения: 1/3 — для нормального закона, $1/\sqrt{(3)}$ – для закона равной вероятности, $1/\sqrt{(6)}$ – для закона треугольника.

Пусть в рассчитываемую вероятностным методом цепь входит звено, подвергнутое функциональному преобразованию f (например, в цепи участвует его проекция). Вид закона распределения преобразованного размера в общем случае будет отличаться от закона распределения исходного размера (хотя бы числовыми характеристиками). Каким тогда должно быть i-ое слагаемое в формуле (1)?

Формула (1) выражает теорему о дисперсии суммы независимых случайных величин. Для перехода к полям рассеяния и вводится коэффициент λ_i, который является относительным средним квадратичным отклонением:

$$\lambda_i = 2\sigma_i / T_i\ .$$

Теперь очевидно, что каждое слагаемое под корнем в (1) есть учетверённая дисперсия соответствующего звена. А дисперсия и математическое ожидание функции f случайного аргумента, как известно, находятся по формулам:

$$\sigma^2[B] = \int_{-\infty}^{\infty}(f(x) - M[B])^2\varphi(x)dx\ ,\quad M[B] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\varphi(x)dx\ ,$$

где $\varphi(x)$ – известная плотность распределения исходного размера.

То есть:

$$\lambda_i^2 T_i^2 = 4\int_{-\infty}^{\infty}(f(x) - M[B])^2\varphi(x)dx\ .$$

Описанный в статье подход для метода полной взаимозаменяемости реализован в виде веб-калькулятора, ознакомиться с которым может каждый в режиме он-лайн, перейдя по ссылке: http://northewind.github.io.

Калькулятор использует передовую технологию веб-компонентов Shadow DOM, которую на настоящий момент поддерживает только браузер Google Chrome (в том числе последние релизы мобильной версии).

На рис. 3. представлен вид графического интерфейса пользователя.

Калькулятор позволяет выполнять простейшие одно- и двуместные операции над размерами, достаточные для расчёта плоской размерной цепочки. Тригонометрические функции интерпретируют аргумент как градусы.

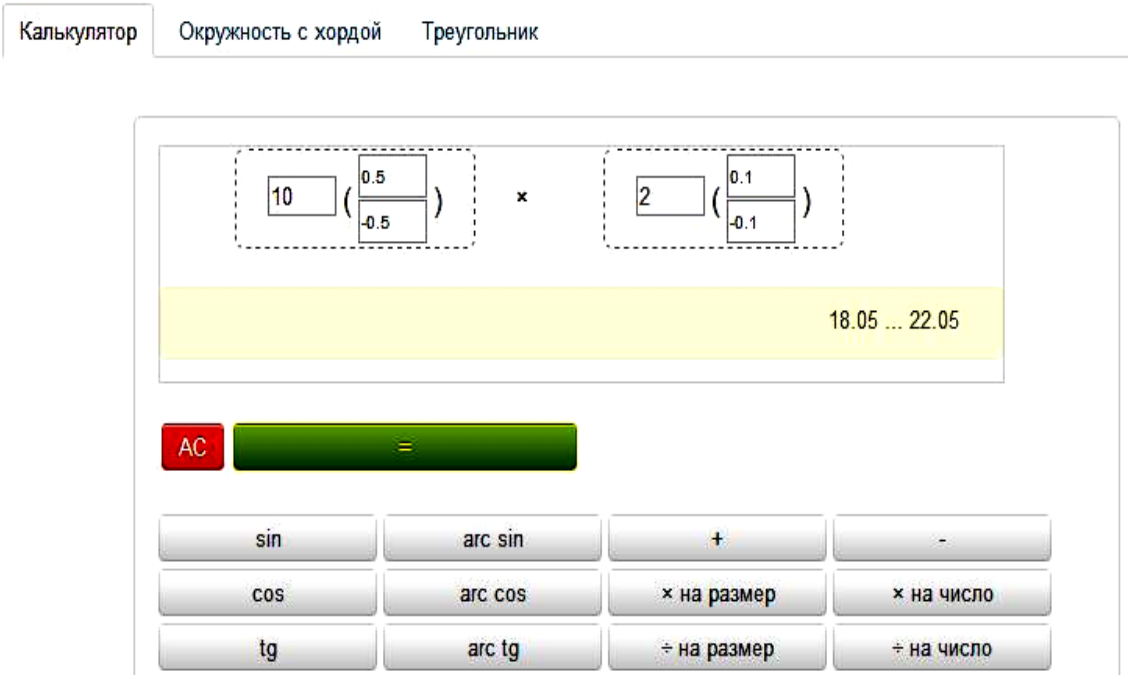


Рис. 3. Веб-интерфейс калькулятора

Классы модели MVC (шаблон model-view-controller) задействованы в нескольких прикладных задачах. Среди них часто встречающаяся задача расчёта треугольника (рис. 4). Здесь также все линейные и угловые величины могут быть рассчитаны с учётом заданных отклонений.

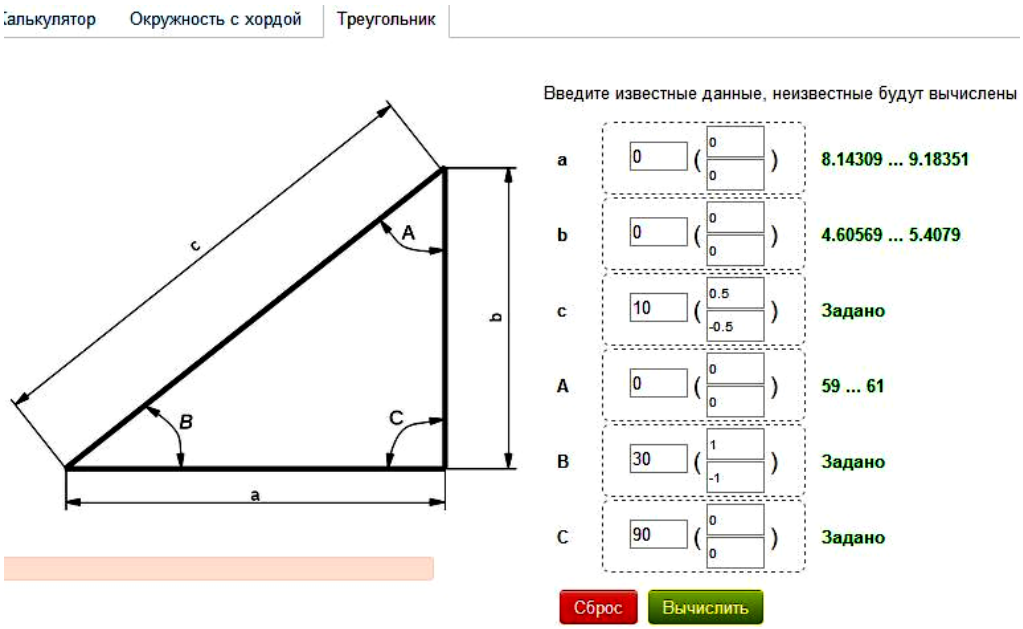


Рис. 4. Расчёт треугольника с допусками

Библиографический список

1. Допуски и посадки: справочник в 2-х ч. / В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1983. – Ч. 2. – 448 с.

2. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – 7-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.

3. Солонин, И.С. Расчёт сборочных и технологических размерных цепей / И.С. Солонин, С.И. Солонин. – М.: Машиностроение, 1980. – 110 с.

4. Анухин, В.И. Допуски и посадки: учебное пособие / В.И. Анухин. – 4-е изд. – СПб.: Питер, 2008. – 207 с.

К содержанию

УДК 621.951

МЕТОД СИСТЕМНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ НА ПРИМЕРАХ СТАНОЧНЫХ И КОНТРОЛЬНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ

Ю.И. Мясников

Метод системного проектирования технологической оснастки подробно рассмотрен в работах автора [1, 2 и 3]. В статье представлены особенности современных подходов к проектированию технологической оснастки металлорежущих станков на примере технологических станочных (СП) и контрольных (КП) приспособлений.

Ключевые слова: метод системного проектирования, технологическая оснастка, станочные приспособления, контрольные приспособления.

В структуре технологической оснастки (ТО), используемой при обработке деталей на металлорежущих станках, выделяется большая группа технологических приспособлений (рис. 1).

Рис. 1. Основные группы технологических приспособлений

Многообразие технологических приспособлений и особенности их конструктивного исполнения приводят к трудностям их выбора на стадии проектирования и внедрения технологических процессов в производство. В структуре технологических приспособлений наиболее сложными и самыми многочисленными являются технологические станочные (СП) и технологические контрольные (КП) приспособления. В связи с этим в статье рассматриваются особенности метода их системного проектирования.

В основе системного проектирования технологических станочных (СП) и контрольных (КП) приспособлений лежат два основных принципа: принцип единства структуры (рис. 2) и принцип единства методики проектирования (рис. 3).

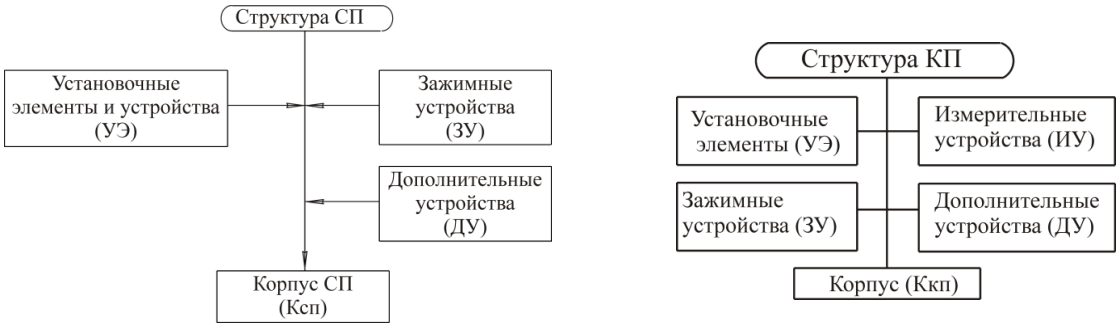


Рис. 2. Принципы единства структуры станочных (а) и контрольных (б) приспособлений

В основе принципа единства структуры технологических приспособлений (с позиций системного подхода) положена идея о том, что любая конструкция технологического приспособления, рассматриваемая как система, может быть представлена в виде подсистем, отличающихся по функциональным признакам (см. рис. 2).

Проектирование конструкций технологических станочных приспособлений (СП) достигается путем выполнения шести этапов (рис. 3, а).

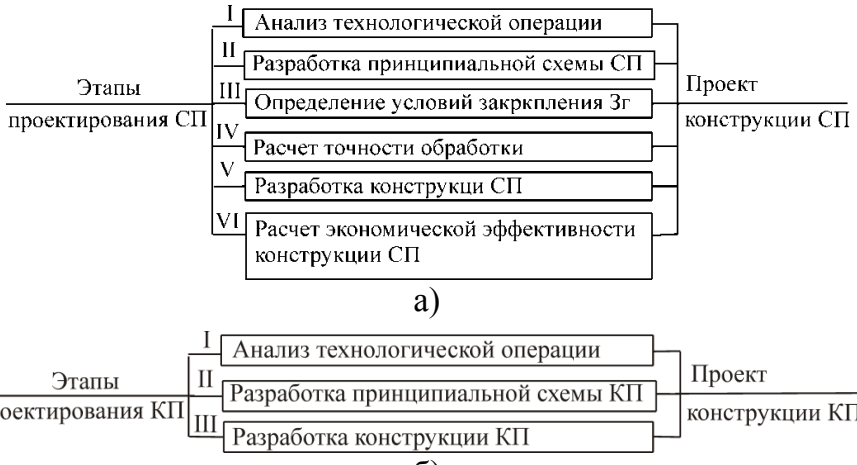


Рис. 3. Принципы единства структуры станочных (а) и контрольных (б) приспособлений

Проектирование конструкций технологических контрольных приспособлений (КП) достигается путем выполнения трех этапов (рис. 3, б).

В основе принципа единства методики проектирования технологических приспособлений (с позиций системного подхода) положена идея о том, что любая конструкция технологического приспособления, рассматриваемая как система, может быть представлена в виде подзадач системного проектирования различного уровня (этапов и стадий) (см. рис. 3).

Ниже приводятся примеры проектирования технологических станочных (СП) контрольных (КП) приспособлений.

Пример 1. Особенности проектирования станочного (СП) приспособления

Рассматривается пример разработки проекта конструкции СП для обработки детали «Фланец».

Этап I. Результаты анализа контрольной операции

Стадия 1. Результаты формирования задания на проектирование КП.

Задание. Разработать конструкцию СП для обработки детали «Фланец», фрагмент чертежа которого приведен на рис. 4, а операционный эскиз на рис. 5.

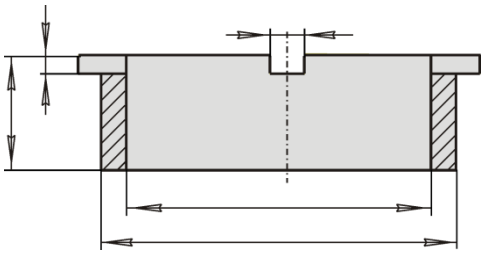


Рис. 4. Фрагмент чертежа детали (в упрощенном виде)

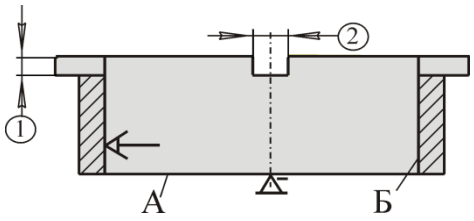


Рис. 5. Фрагмент операционного эскиза (в упрощенном виде)

Стадия 2. Результаты определения и уточнения общих сведений об операции. На этой проектной стадии начинается формирование и уточнение задания на проектирование СП путем выявления ограничений на его проектирование. Результаты определения и уточнения общих сведений (см. рис. 4 и рис. 5).

1. Количество одновременно контролируемых деталей – одна.

2. Обрабатываются четыре паза (выполняются операционные размеры 1 и 2).

3. Заготовка базируется по поверхности центрального отверстия Б и нижней плоскости А.

Стадия 3. Результаты разработки эскиза заготовки, поступающей на операцию (рис. 6).

Стадия 4. Результаты разработки упрощенного операционного эскиза (рис. 7).

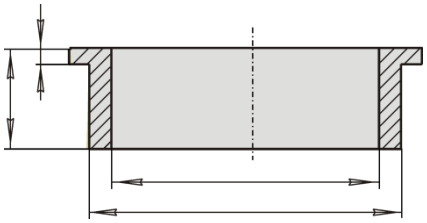


Рис. 6. Эскиз заготовки, поступающей на операцию

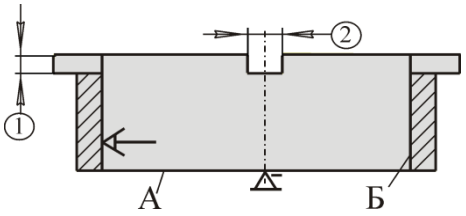


Рис. 7. Упрощенный операционный эскиз

Стадия 5. Результаты разработки возможной схемы обработки (рис. 8).

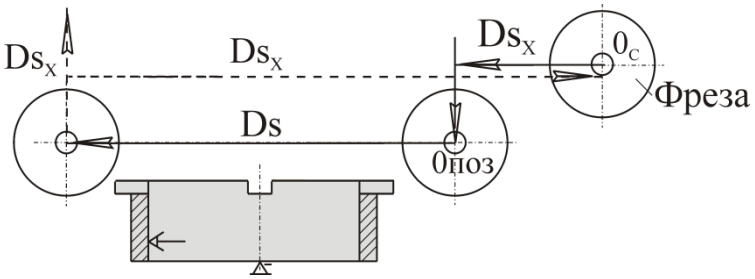


Рис. 8. Результаты разработки возможной схемы обработки

Стадия 6. Результаты уточнения задачи проектирования.

На выполняемой операции необходимо спроектировать СП с учетом результатов анализа, полученных на стадиях 1, 2, 3, 4 и 5.

Этап II. Результаты разработки принципиальной схемы КП

Стадия 1. Результаты разработки схемы установки. На этой стадии осуществляется переход от теоретической схемы базирования заготовки к схеме расположения установочных элементов (УЭ) в КП (на уровне принципиальных решений). Результаты разработки теоретической схемы установки представлены на рис. 9, а; результаты разработки теоретической схемы базирования – на рис. 9, б, а результаты разработки схемы установки – на рис. 10.

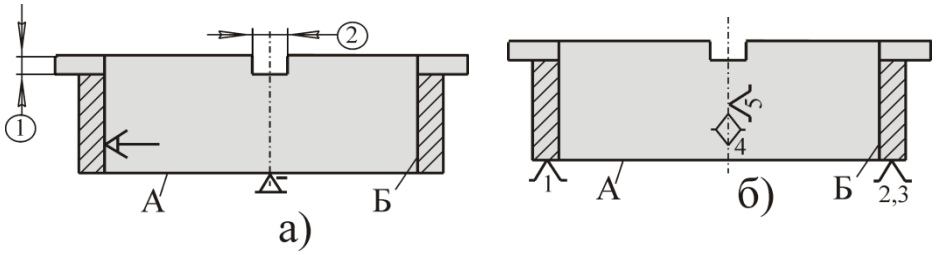


Рис. 9. Результаты разработки: а – теоретической схемы установки; б – теоретической схемы базирования

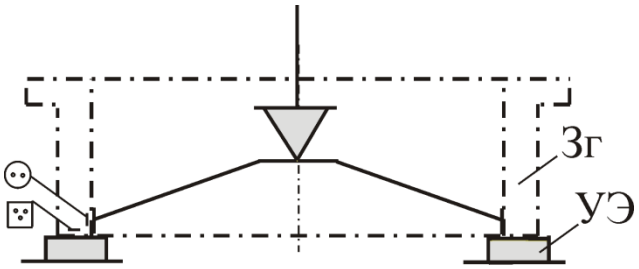


Рис. 10. Результаты разработки схемы установки

Стадия 2. Результаты разработки схемы закрепления. Результаты разработки схем представлены на рис. 11 и рис. 12.

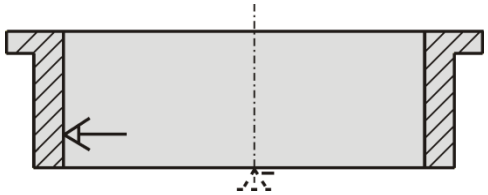


Рис. 11. Результаты разработки теоретической схемы закрепления

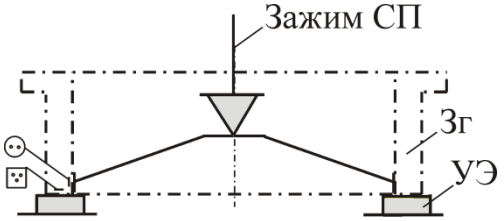


Рис. 12. Результаты разработки схемы закрепления

Стадия 3. Результаты разработки принципиальной схемы СП. На этой стадии формируется принципиальная схема с учетом результатов, полученных на стадиях 1 и 2 (на уровне принципиальных решений). Результаты разработки принципиальной схемы СП представлены на рис. 13.

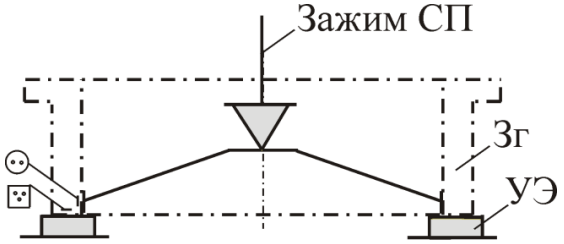


Рис. 13. Результаты разработки принципиальной схемы СП

Стадия 4. Результаты анализа принципиальной схемы СП. Результаты анализа показывают следующее.

1. В представленной схеме полностью реализованы ограничения, выявленные на стадии анализа технологической операции (этапе I).

2. Предусмотрены возможности для свободной установки и снятия заготовки при контроле.

3. Принципиальная схема (см. рис. 13) может быть принята за основу будущей конструкции СП.

Этап V. Результаты разработки конструкции СП

Стадия 1. Результаты разработки конструкции СП. При решении этой задачи разрабатывается конструкция СП с принятым выше решением (см. стадию 1 данного этапа). Результаты разработки модели представлены на рис. 14.

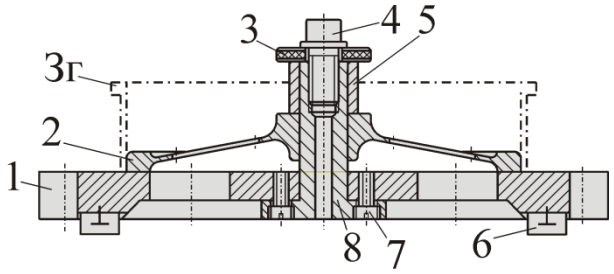


Рис. 14. Фрагмент конструкции СП: 1 – плита;
2 – кольцевая диафрагма; 3 – шайба быстросменная;
4 – болт; 5 – втулка; 6 – винт; 7 – втулка

Пример 2. Особенности проектирования контрольного (КП) приспособления

Пример разработки проекта конструкции КП для контроля параметров точности детали «Фланец» на рабочем участке.

Этап I. Результаты анализа контрольной операции

Стадия 1. Результаты формирования задания на проектирование КП. На этой проектной стадии разрабатывается и формулируется задание на проектирование КП с учетом особенностей выполняемой контрольной операции.

Задание. Разработать конструкцию технологического контрольного приспособления (КП) для контроля параметров точности детали «Фланец», фрагмент чертежа которого приведен на рис. 15, а операционный эскиз на рис. 16.

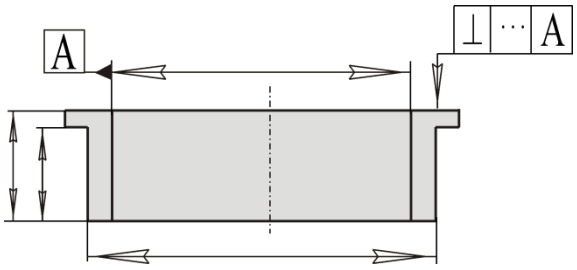


Рис. 15. Фрагмент чертежа детали
(в упрощенном виде)

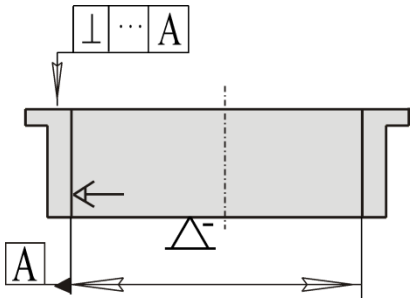


Рис. 16. Фрагмент операционного
эскиза

Стадия 2. Результаты определения и уточнения общих сведений об операции. Результаты определения и уточнения общих сведений:

1. Количество одновременно контролируемых деталей – одна.
2. Контролируется допуск параллельности верхней плоскости относительно нижней (базовой) плоскости.
3. Заготовка базируется по поверхности центрального отверстия и нижней плоскости.

Стадия 3. Результаты уточнения задачи проектирования КП. На выполняемой контрольной операции необходимо спроектировать технологическое контрольное приспособление (КП) с учетом результатов анализа, выполненных на стадии 1.

Этап II. Результаты разработки принципиальной схемы КП

Стадия 1. Результаты разработки схемы установки. Результаты разработки теоретической схемы базирования представлены на рис. 17, а; результаты разработки теоретической схемы базирования – на рис. 17, б, а результаты разработки схемы установки – на рис. 18.

Рис. 17. Результаты разработки схем: а – теоретической схемы установки; б – теоретической схемы базирования

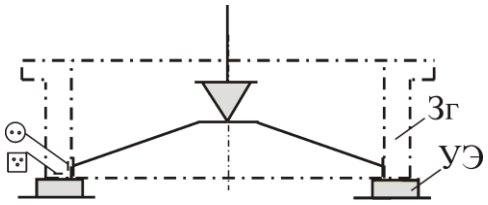


Рис. 18. Результаты разработки схемы установки

Стадия 2. Результаты разработки схемы закрепления. Результаты этой стадии проектирования приведены на рис. 19 и рис. 20.

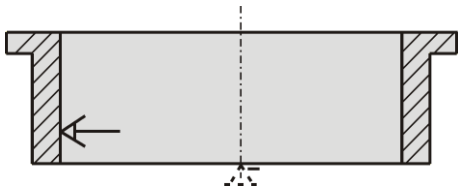


Рис. 19. Результаты разработки теоретической схемы закрепления

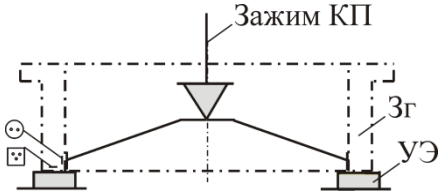


Рис. 20. Результаты разработки схемы закрепления

Стадия 3. Результаты разработки принципиальной схемы КП. Результаты разработки принципиальной схемы КП представлены на рис. 21.

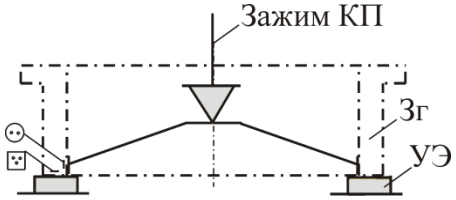


Рис. 21. Результаты разработки принципиальной схемы КП

Стадия 6. Результаты анализа принципиальной схемы КП. На этой стадии разработки принципиальной схемы производится ее анализ с целью принятия обоснованных решений по дальнейшему проектированию КП. Результаты анализа показывают следующее.

1. В представленной схеме полностью реализованы ограничения, выявленные на стадии анализа технологической операции (этапе I).

2. Предусмотрены возможности для свободной установки и снятия заготовки при контроле.

3. Принципиальная схема (см. рис. 21) может быть принята за основу будущей конструкции КП.

Этап V. Результаты разработки конструкции КП

Стадия 1. Результаты определения уровня разработки конструкции КП.

Для рассматриваемого в данном разделе примера – проектирование технологического контрольного приспособления (КП) для контроля допуска перпендикулярности наружной поверхности детали «Фланец» – принимается решение о разработке конструкции КП на уровне фрагмента чертежа.

Стадия 2. Результаты разработки конструкции КП. Результаты разработки модели представлены на рис. 22.

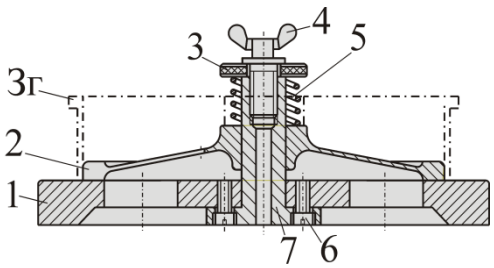


Рис. 22. Результаты разработки конструкции КП: 1 – плита;
2 – кольцевая диафрагма; 3 – шайба быстросменная;
4 – рукоятка звездообразная; 5 – пружина; 6 – винт; 7 – корпус

Библиографический список

1. Мясников, Ю.И. Станочные приспособления металлорежущих станков: справочник в 2 т. / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2010. – Т. 1. – 422 с.

2. Мясников, Ю.И. Системное проектирование станочных приспособлений: справочник в 2 т. / Ю.И. Мясников, В.Ю. Мясников; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2010. – Т. 2. – 330 с.

3. Мясников, Ю.И. Метод системного проектирования технологической оснастки: сб. науч. тр. I международной заочной научно-технической конференции / Ю.И. Мясников; под ред. В.И. Гузеева и А.А. Дьяконова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 133–138.

К содержанию

УДК 621.923.74

КЛАССИФИКАЦИЯ СХЕМ ГЛУБИННОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

А.А. Николаенко

Рассмотрен процесс глубинного профильного шлифования периферией круга. Произведена классификация схем шлифования. Выделены типовые схемы профильного шлифования. Для каждой схемы разработаны математические модели для расчета площади поперечного сечения, интенсивности съёма металла и площади контакта круга с заготовкой.

Ключевые слова: глубинное профильное шлифование, профильный шлифовальный круг, заготовка, типовые схемы профильного шлифования.

Глубинное профильное шлифование периферией круга (ГПШПК) отличается от традиционного плоского шлифования периферией круга значительным увеличение глубины резания за один рабочий ход с 0,1 мм до 5 мм и более. Такое увеличение глубины резания приводит к значительному росту площади контакта круга с заготовкой и, соответственно, составляющих силы резания. Поэтому операции ГПШПК выполняются на специальных шлифовальных станках с ЧПУ. Эти станки имеют повышенную жесткость (30…50 Н/мкм), высокий (В) класс точности и мощный главный привод (18,5–45 Квт). Станки оснащены механизмом автоматической правки шлифовального круга.

Цель исследования – произвести классификацию схем шлифования при глубинном профильном шлифовании периферией круга.

Задачи исследования: 1) выделить типовые схемы глубинного профильного шлифования периферией круга; 2) разработать математические модели для расчета площади поперечного сечения среза металла; 3) разработать математические модели для расчета интенсивности съёма металла шлифовальным кругом; 4) разработать математические модели для расчета площади контакта круга с заготовкой для каждой схемы.

В общем случае классификация – это осмысленное разделение вещей на разновидности согласно каким-либо важным признакам.

Все многообразие профилей встречающихся при ГПШПК можно разделить на ряд характерных участков разной формы. Формы участков влияют на разложение составляющих силы резания по разным направлениям.

По признаку отношения максимальной глубины резания t^{max} к глубине профиля шлифовального круга $t^{max}_{проф}$ можно выделить три варианта глубинного профильного шлифования:

1) глубина резания (при обработке плоской заготовки) равна глубине профиля круга, т.е. $t^{max} = t^{max}_{проф}$ (рис. 1);

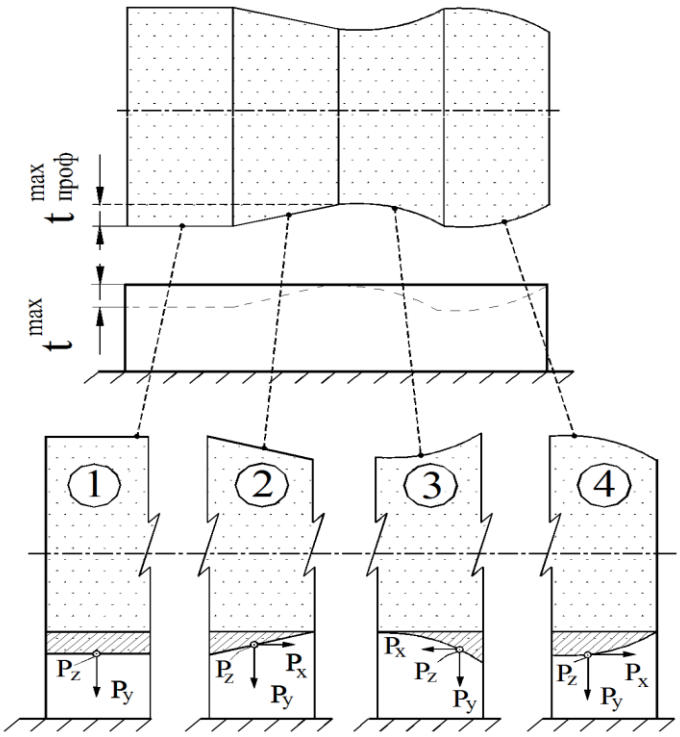


Рис. 1. Схема деления шлифовального круга
и плоской заготовки на участки с глубиной резания t^{max},
равной глубине профиля круга $t^{max}_{проф}$

2) глубина резания (при обработке плоской заготовки) превышает глубину профиля круга, т. е. $t^{max} > t^{max}_{проф}$ (рис. 2);

3) когда глубина резания (при обработке профилированной под деталь заготовки) может быть различной по абсолютной величине, но является постоянной по всей глубине профиля круга, т. е. $t^{max} = const$ (рис. 3).

Каждому из указанных вариантов шлифования соответствуют свои схемы шлифования.

Анализ участков шлифования позволил выделить 10 типовых схем для ГПШПК. Номера схем указаны на рисунках в кружках.

Каждой схеме, характеризуемой профилем шлифовального круга, профилем заготовки и глубиной резания, присущи свои площадь поперечного сечения срезаемого металла, интенсивность съёма металла и площадь контакта круга с заготовкой.

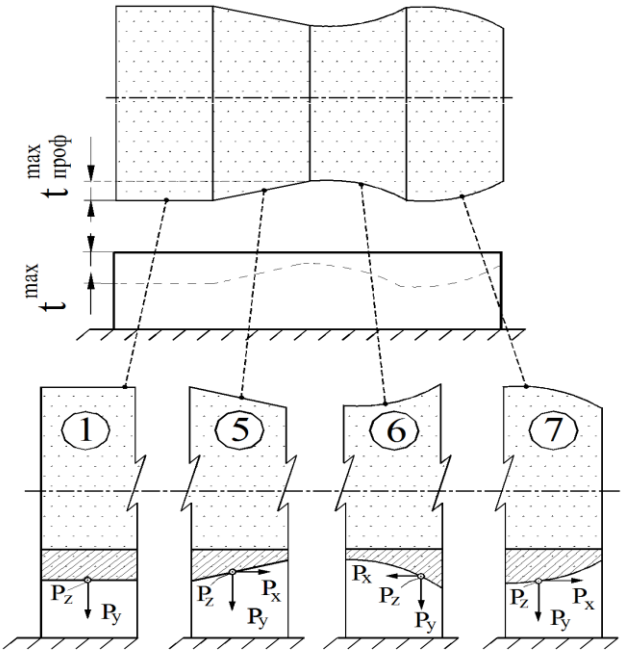


Рис. 2. Схема деления шлифовального круга
и плоской заготовки на участки с глубиной резания t^{max}
больше глубины профиля круга $t^{max}_{n\,проф}$

Для схемы 1 площадь поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\,i\,=\,1}$, представляющая собой прямоугольник, равна произведению глубины резания t_i на ширину шлифования S_x:

$$F_{c\,i\,=\,1} = t_{i=1} \cdot S_x. \qquad (1)$$

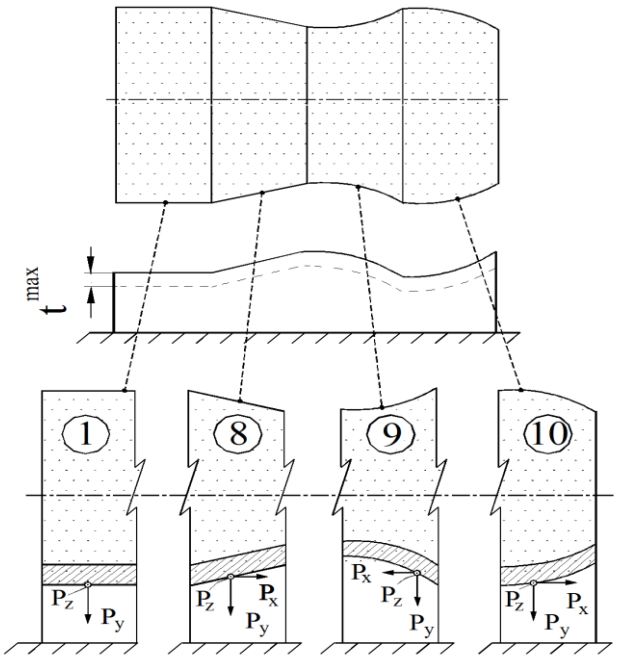


Рис. 3.Схема деления на участки шлифовального круга
и профилированной заготовки с постоянной глубиной резания t^{max}

Для схемы 1 интенсивность съема металла Q_1 равна произведению площади поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\ i=1}$ на скорость продольной подачи $V_{s\ np}$:

$$Q_1 = F_{c\ i=1} \cdot V_{s\ np}. \quad (2)$$

Для схемы 1 площадь контакта шлифовального круга с заготовкой $F_{к\ i=1}$, представляющая собой прямоугольник, равна произведению длины дуги контакта круга с заготовкой L_1 на ширину шлифования S_x:

$$F_{к\ i=1} = \sqrt{D_{i=1}^{max} \cdot t_{i=1}} \cdot S_x, \quad (3)$$

где $D_{i=1}^{max}$ – максимальный наружный диаметр шлифовального круга для 1-й схемы, мм; t_1 – глубина резания для 1-й схемы, мм.

Для схемы 2 площадь поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\ i=2}$, представляющая собой треугольник, равна половине произведения глубины резания $t_{i=2}^{max}$ на ширину шлифования S_x:

$$F_{c\ i=2} = 0{,}5 \cdot t_{i=2}^{max} \cdot Sx. \quad (4)$$

Для схемы 2 интенсивность съема металла Q_2 равна произведению площади поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\ i=2}$ на скорость продольной подачи $V_{s\ np}$:

$$Q_2 = F_{c\ i=2} \cdot V_{s\ np}. \quad (5)$$

Для схемы 2 площадь контакта шлифовального круга с заготовкой $F_{к\ i=2}$, представляющая собой прямоугольный треугольник, равна половине произведения длины дуги контакта круга с заготовкой $L_{i=2}^{max}$ на ширину шлифования S_x:

$$F_{к\ i=2} = 0{,}5 \cdot \sqrt{D_{i=2}^{max} \cdot t_{i=2}^{max}} \cdot S_x, \quad (6)$$

где D_2^{max} – максимальный наружный диаметр шлифовального круга для 2-й схемы, мм; $t_{i=2}^{max}$ – максимальная глубина резания для 2-й схемы, мм.

Схема 3 характеризуется тем, что образующая профиля круга вогнута в тело круга.

Для схемы 3 площадь поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\ i=3}$ равна:

$$F_{c\ i=3} = 0{,}5 \cdot \left(t_{i=3}^{max} \cdot S_x\right) - \frac{R^2}{2} \cdot \left(\psi_3 - \sin \psi_3\right), \quad (7)$$

где R_3 – радиус кругового сегмента, м; ψ_3 – центральный угол сегмента в радианах; $\sin \psi_3$ – синус центрального угла сегмента.

Для схемы 3 интенсивность съема металла Q_3 равна:

$$Q_3 = F_{c\ i=3} \cdot V_{s\ np}. \quad (8)$$

Для схемы 3 расчет площади контакта шлифовального круга с заготовкой $F_{к\ i=3}$ производится по формуле:

$$F_{к\ i=3} = 0{,}5 \cdot \sqrt{D_{i=3}^{max} \cdot t_{i=3}^{max}} \cdot S_x \cdot \frac{0{,}5 \cdot \left(t_{i=3}^{max} \cdot S_x\right) - \frac{R^2}{2} \cdot \left(\psi_3 - \sin \psi_3\right)}{0{,}5 \cdot \left(t_{i=3}^{max} \cdot S_x\right)}. \quad (9)$$

Схема 4 характеризуется тем, что образующая профиля круга выгнута из тела круга.

Для схемы 4 площадь поперечного сечения срезаемого металла $F_{c\ i=4}$ равна:

$$F_{c\ i=4} = 0{,}5 \cdot \left(t_{i=4}^{max} \cdot S_x\right) + \frac{R^2}{2} \cdot \left(\psi_4 - \sin \psi_4\right). \quad (10)$$

Для схемы 4 интенсивность съема металла Q_4 равна:

$$Q_4 = F_{c\ i=4} \cdot V_{s\ np}. \quad (11)$$

Для схемы 4 расчет площади контакта шлифовального круга с заготовкой $F_{к\ i=4}$ производится по формуле:

$$F_{к\ i=4} = 0{,}5 \cdot \sqrt{D_{i=4}^{max} \cdot t_{i=4}^{max}} \cdot S_x \cdot \frac{0{,}5 \cdot \left(t_{i=4}^{max} \cdot S_x\right) + \frac{R^2}{2} \cdot \left(\psi_4 - \sin \psi_4\right)}{0{,}5 \cdot \left(t_{i=4}^{max} \cdot S_x\right)}. \quad (12)$$

Аналогично произведены расчеты площадей поперечного сечения срезаемого металла, интенсивности съёма металла и площадей контакта шлифовального круга с заготовкой для схем 5–10.

Пример исходных данных и рассчитанные по ним численные значения для площадей поперечного сечения срезаемого металла, интенсивности съема металла и площадей контакта шлифовального круга с заготовкой для схем 1–10 представлены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1

Площадь поперечного сечения срезаемого металла, интенсивность съёма металла и площадь контакта шлифовального круга с заготовкой для схем 1–4

Номер схемы шлифования	1	2	3	4
Максимальный наружный диаметр круга $D_{i\ max}$, мм	500	500	500	500
Минимальный наружный диаметр круга $D_{i\ min}$, мм	490	490	490	490
Максимальная глубина резения $t_{i\ max}$, мм	5	5	5	5
Минимальная глубина резания $t_{i\ min}$, мм	0	0	0	0
Ширина шлифования T_i, мм	20	20	20	20
Радиус образующей профиля круга R_i, мм	115	115	115	115
Скорость продольной подачи $V_{snp\ i}$, мм/мин	100	100	100	100
Площадь поперечного сечения среза $F_{срез\ i}$, мм^2	100	50	44	56
Интенсивность съёма металла Q, мм^3/мин	10 000	5 000	4 370	5 630
Площадь контакта круга с заготовкой $F_{конт\ i}$, мм^2	1 000	515	450	580

Таблица 2

Площадь поперечного сечения срезаемого металла, интенсивность съёма металла и площадь контакта шлифовального круга с заготовкой для схем 5–7

Номер схемы шлифования	5	6	7
Максимальный наружный диаметр круга $D_{i\ max}$, мм	500	500	500
Минимальный наружный диаметр круга $D_{i\ min}$, мм	490	490	490
Максимальная глубина резения $t_{i\ max}$, мм	6	6	6
Минимальная глубина резания $t_{i\ min}$, мм	1	1	1
Ширина шлифования T_i, мм	20	20	20
Радиус образующей профиля круга R_i, мм	115	115	115
Скорость продольной подачи $V_{snp\ i}$, мм/мин	100	100	100
Площадь поперечного сечения среза $F_{срез\ i}$, мм^2	70	64	76
Интенсивность съёма металла Q, мм^3/мин	7 000	6 370	7 630
Площадь контакта круга с заготовкой $F_{конт\ i}$, мм^2	793	721	864

Таблица 3

Площадь поперечного сечения срезаемого металла, интенсивность съёма металла и площадь контакта шлифовального круга с заготовкой для схем 8–10

Номер схемы шлифования	8	9	10
Максимальный наружный диаметр круга $D_{i\ max}$, мм	500	500	500
Минимальный наружный диаметр круга $D_{i\ min}$, мм	490	490	490
Максимальная глубина резения $t_{i\ max}$, мм	5	5	5
Минимальная глубина резания $t_{i\ min}$, мм	0	0	0
Ширина шлифования T_i, мм	20	20	20
Радиус образующей профиля круга R_i, мм	115	115	115
Скорость продольной подачи $V_{snp\ i}$, мм/мин	100	100	100
Площадь поперечного сечения среза $F_{срез\ i}$, мм^2	100	105	105
Интенсивность съёма металла Q, мм^3/мин	10 000	10 546	10 546
Площадь контакта круга с заготовкой $F_{конт\ i}$, мм^2	1 026	962	1 092

К содержанию

УДК 621.924

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА

А.Х. Нуркенов

С целью анализа жесткости технологической системы круглошлифовального станка с ЧПУ разработана методика оценки данного параметра при помощи тестирования прибором активного контроля. Исследования произведены на базе лаборатории кафедры «Технология машиностроения» и НИЦ «Экспериментальная механика» ФГБОУ ВПО Южно-Уральского государственного университета. Проведенные исследования по определению жесткости ТС позволяют перейти к методике проектирования цикла врезного шлифования на основе фактического параметра жесткости технологической системы с учетом технологических возможностей оборудования и инструмента. Методика определения фактического параметра жесткости ТС позволит спроектировать условия обработки, обеспечивающие требования по точности и качеству изделия за минимальное время цикла.

Ключевые слова: шлифование, тестирование технологической системы, прибор активного контроля, жесткость технологической системы.

Процесс шлифования сопровождается упругими деформациями в технологической системе. Точность обработки и параметры проектирования цикла шлифования зависят от параметров технологической системы [1, 2].

Проектирование цикла врезного шлифования необходимо производить с учетом информации о погрешностях обработанных деталей и изменяющихся параметрах технологической системы. Одним из базовых параметров, требуемых для первоначального расчета проектного цикла шлифования является параметр жесткости системы, который возможно определить в результате испытаний или по нормативным данным, предоставляемым производителем станочного оборудования.

С целью анализа жесткости технологической системы (ТС) произведено исследование на базе лаборатории кафедры «Технология машиностроения» и НИЦ «Экспериментальная механика" ФГБОУ ВПО Южно-Уральского государственного университета.

Определение жесткости ТС шлифовального станка с ЧПУ

Для реализации данного эксперимента на кафедре технологии машиностроения был разработан контроллер, обрабатывающий сигнал с индуктивного датчика БВ-6067. Снимаемый сигнал фиксируется на персональном компьютере (рис. 1).

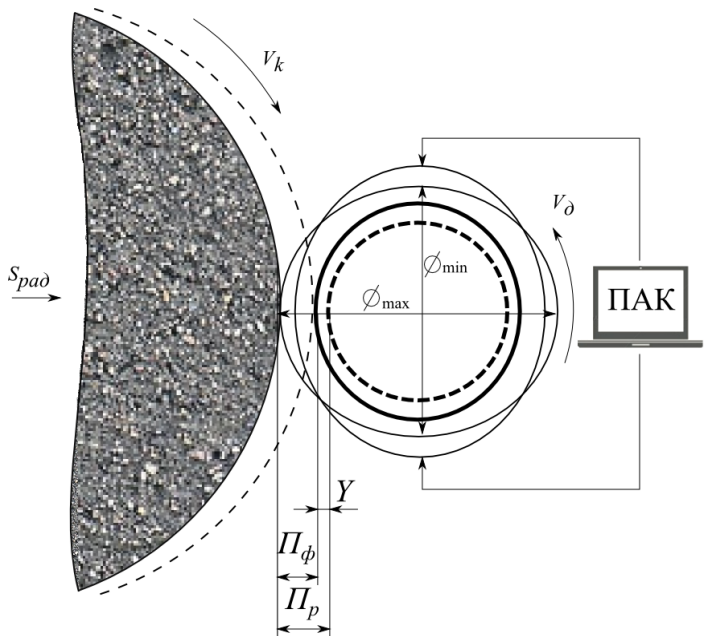


Рис. 1. Схема измерения прибором активного контроля

Шлифовальный круг диаметром D = 600 мм и скоростью резания V_k м/с перемещается с радиальной подачей $S_{рад}$, мм/об в зоне обработки. После касания заготовки с начальным максимальным $Ø_{max}$ и минимальным $Ø_{min}$ диаметром удаляется часть фактического припуска $П_ф$, фиксируемого прибором активного контроля (ПАК). Затем производится сравнение фактического и расчетного припуска $П_р$. Величина разности припусков формируется на основе динамических характеристик системы, и характеризует жесткость её узлов. Таким образом, определяются упругие деформации в ТС Y мм.

По известному выражению упругие деформации в ТС описываются следующим образом:

$$Y = Py/I, \quad (1)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания, Н; I – жесткость ТС, Н.

Значение радиальной составляющей силы резания определяется либо по тарированным индуктивным датчикам, смонтированным на приспособлении задней бабки, либо расчетным методом. Тогда, становится возможным определение жесткости ТС. Данный способ позволяет оценить искомый параметр в процессе обработки и при любых условиях обработки.

Для подтверждения достоверности методики оценки динамической жесткости ТС проведена дополнительная серия экспериментов с фиксацией вибраций на узлах станка, с последующим расчетом амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) системы.

Измерения параметров АЧХ производилось однокомпонентным датчиком СТС АС102-1А и трёхкомпонентными датчиками PCB Piezotronics (рис. 2).

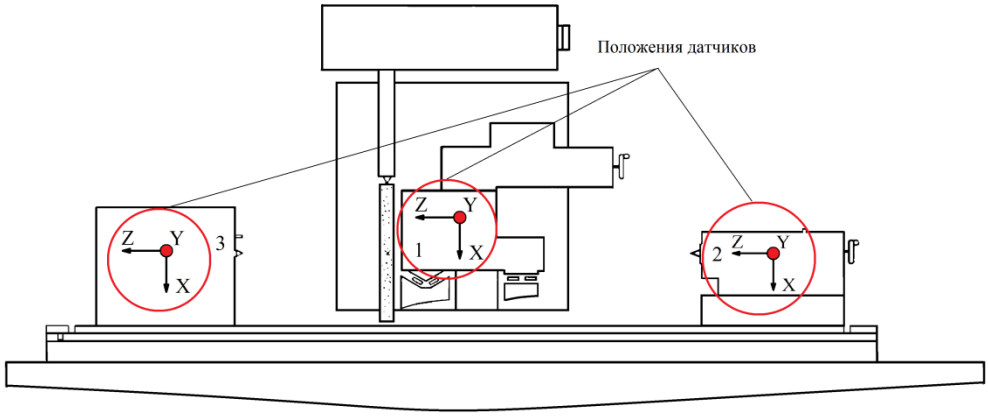


Рис. 2. Положения датчиков на узлах шлифовального станка

Результаты измерений представляют собой спектры микроперемещений и функции плотности виброускорений (рис. 3). В качестве цифровых преобразователей использовались системы ДИАМЕХ2000 и LMS Scadas Mobile.

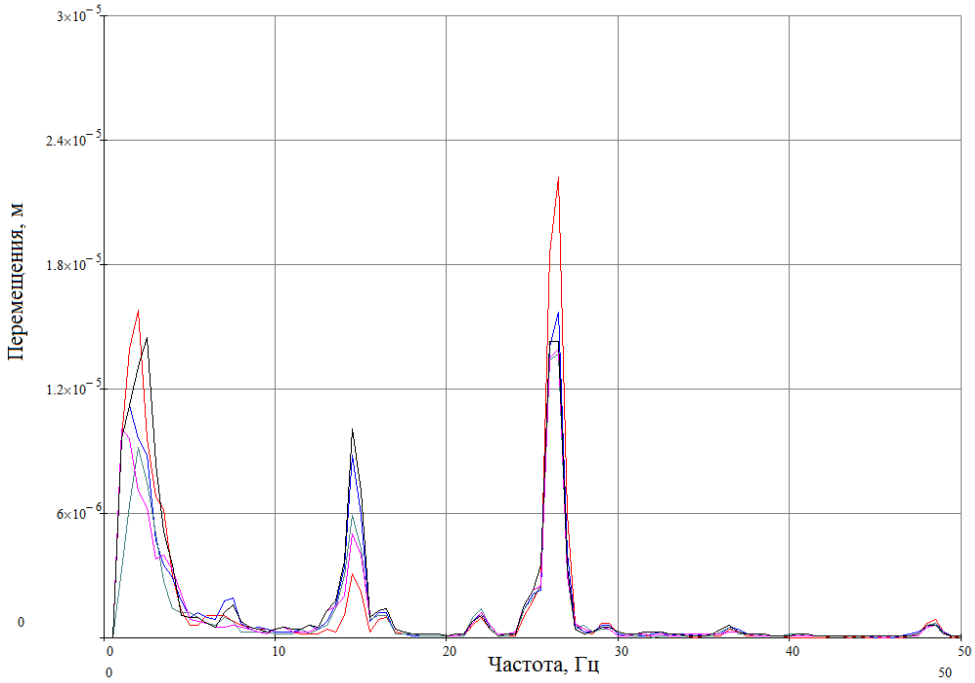


Рис. 3. Пример фиксации амплитудно-частотных характеристик ТС

Показания результатов экспериментов фиксируют сопоставимые пиковые амплитуды и после математической обработки в прикладном пакете MathCad V14 получены параметры жесткости узлов станка 3,226·106 Н/м 3,46·106 Н/м. Таким образом, данные серии экспериментов позволяет говорить о сходимости результатов, полученных со скобы активного контроля и датчиков виброанализаторов (погрешность в пределах ≈ 7 %).

Выводы

Проведенные исследования по определению жесткости ТС позволяют перейти к методике проектирования цикла врезного шлифования на основе фактического параметра жесткости технологической системы с учетом технологических возможностей оборудования и инструмента. Методика определения фактического параметра жесткости ТС позволит определить оптимальные условия обработки, обеспечивающие требования по точности и качеству изделия за минимальное время цикла.

Библиографический список

1. Лурье, Г.Б. Шлифование металлов / Г.Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.

2. Переверзев, П.П. Моделирование технологических ограничений при оптимизации автоматических циклов шлифования / П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 12. – Вып. 19. – С. 165–168.

К содержанию

УДК 621.923 + 621.92.06-529

ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ОБРАБОТКИ НА МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКАХ

П.П. Переверзев

Рассмотрены принципы проектирования управляющих программ с оптимальными режимными параметрами для операций механической обработки, выполняемых на металлорежущих станках с ЧПУ.

Ключевые слова: автоматический цикл, шлифование, управляющая программа, оптимизация, динамическое программирование.

Несмотря на длительную историю развития различных научных направлений в области технологии машиностроения, до сих пор отсутствуют отечественные информационно-управляющие и информационно-вычислительные технические системы, позволяющие производить проектирование оптимальных управляющих программ для станков с ЧПУ. В результате, парк металлорежущих станков с ЧПУ используется в машиностроении крайне неэффективно, т.к. управляющие программы для станков подбираются вручную или на основании набранной статистики, что ведет к существенному занижению режимных параметров, снижению производительности, увеличению брака и себестоимости обработки.

Кардинальная причина возникновения такой проблемы кроется в отсутствии теоретических разработок, позволяющих производить расчет оптимальных параметров управляющей программы для станка с ЧПУ для разных видов обработки. Подавляющее число исследователей изучают частные стороны проблемы проектирования оптимальных управляющих траекторий. Наибольшее внимание уделено моделированию силы резания и моделированию технологических ограничений (по точности, шероховатости, дефектному слою, износу и стойкости инструмента), влияющих на производительность операций. Итогом таких исследований являются частные рекомендации по режимам резания для ограниченного числа ограничений в узком диапазоне их варьирования. Очень мало имеется работ, направленных на развитие теории построения оптимальных управляющих программ для металлорежущих станков с ЧПУ, которые одновременно учитывают комплекс технологических ограничений (по параметрам заготовки, обрабатываемой поверхности, станка, режущего инструмента, системы управления станком, нестабильных условий организации производства и протекания процесса обработки) и позволяют рассчитывать следующие оптимальные параметры управляющей программы, по которой ведутся циклы обработки партии заготовок:

1. Оптимальное количество ступеней переключения каждой подачи цикла обработки (поперечной, продольной и др.). Количество ступеней в цикле определяется по количеству программных скоростей подач, изменяющихся в течение всего основного времени, при котором происходит процесс съема припуска под управлением прибора активного контроля.

2. Оптимальное сочетание значений снимаемого припуска на каждой ступени цикла со значениями скорости подачи. Если видов подач несколько, то рассчитываются оптимальные значения сочетаний одновременно по всем подачам.

3. Оптимальные значения частоты (или окружной скорости) вращения заготовки и режущего инструмента.

На кафедре «Технология машиностроения» ЮУрГУ разработана теория построения оптимальных циклов обработки для операций круглого врезного шлифования, в которой:

1. Оптимизация управляющих параметров цикла шлифования выполнена на основе метода динамического программирования. Каждый шаг вариантов расчета проверяется по четырем важнейшим ограничениям – точности, бесприжоговости, шероховатости и осыпаемости круга, обеспечивающим требуемое качество обработки, а также по основным механическим ограничениям технологической системы.

2. Моделирование производительности циклов шлифования в процессе оптимизации базируется на закономерностях изменения силовой нагрузки технологической системы и режимов резания при изменении требуемой

точности обработки, точности заготовок, шероховатости, температур в зоне шлифования (приводящим к прижогам), точности и жесткости элементов технологической системы и других факторов.

3. Моделирование сил шлифования выполнено на основе применения закономерностей механики пластических деформаций металлов в зоне резания и охватывает практически все технологические факторы, влияющие на изменение сил: фактические и программные скорости подач на каждой ступени цикла, скорость детали и круга, механические свойства шлифуемого металла (интенсивность напряжений), геометрические параметры зоны контакта круга и заготовки (диаметры заготовки и круга, ширина обрабатываемой поверхности заготовки), характеристику круга степень затупления зерен круга.

4. Результатом проектирования является управляющая программа циклом обработки, в которой проведено оптимальное разбиение припуска по всем ступеням цикла в сочетании с оптимальными значениями программной скорости подачи на каждой ступени цикла. Управляющая программа обеспечивает максимальную производительность операции круглого врезного шлифования и качество обрабатываемой поверхности для нестабильных условий обработки (колебание припуска, затупление зерен круга, размерный износ круга).

5. Система оптимизации нечувствительна к характеру (линейность, дифференцируемость) применяемых моделей целевой функции и ее ограничений и позволяет включать неограниченное количество ограничений.

Создание такой системы оптимизации стало возможным благодаря разработке следующих теоретических предпосылок к расчету наиболее производительных циклов шлифования.

При проектировании цикла шлифования, необходимо учитывать, что на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактической скорости подачи ограничивается комплексом технологических ограничений, включающим в себя такие основные ограничения, как требуемая точность получаемого размера, шероховатость, бесприжоговость шлифуемой поверхности, осыпаемость круга (рис. 1).

Границы областей этих ограничений для разных деталей с различными чертежными требованиями поверхности заготовки (по точности, исходному радиальному биению) и готовой детали (по точности диаметрального размера, бесприжоговости и шероховатости обрабатываемой поверхности), могут иметь самое разнообразное взаиморасположение, иметь разные очертания. Ограничивать максимальные значения фактической скорости подачи на пути снятия припуска могут разные ограничения. При этом каждое ограничение имеет свое допустимое значение фактической скорости подачи, и зона активного действия каждого ограничения проявляется на разных частях снимаемого припуска. Например, ограничение по осыпаемости круга работает на первой ступени цикла, ограничивая допустимую

наибольшую фактическую скорость подачи; ограничение по шероховатости – на последней ступени цикла, ограничивая величину конечной скорости подачи (выхаживание); ограничение по требуемой точности обработки работает на протяжении всех ступеней цикла, заставляя снижать фактическую скорость подачи до значений, при которых достигается требуемое уточнение заготовки.

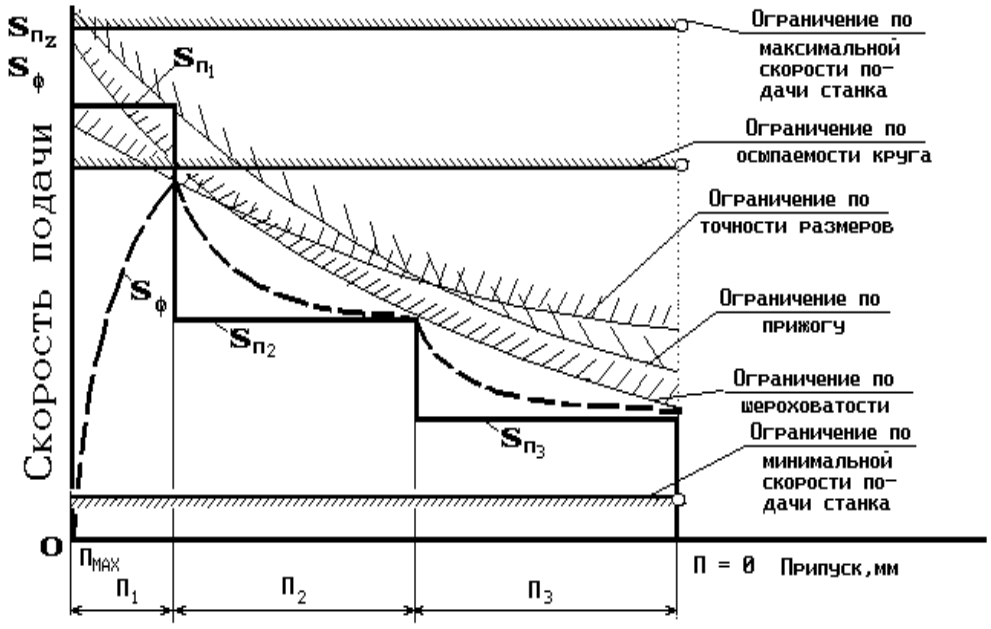


Рис. 1. Область допустимых значений фактических скоростей подач трехступенчатого цикла круглого врезного шлифования: $S_ф$ – фактическая скорость подачи; $S_п$ – программная скорость подачи; Z – номер ступени цикла

Для определения границ области допустимых значений фактической скорости подачи, необходимо установить расчетную взаимосвязь этих подач со всеми ограничениями. Контурная (активная) граница области допустимых значений состоит из кусков границ нескольких ограничений. Для построения этих границ по каждому ограничению, необходимо разработать методики их построения, учитывающие особенности их физической сущности и механизма влияния на величину допустимого значения фактической скорости подачи на протяжении всего цикла шлифования. Рассмотрим особенности методики построения границ отдельно по каждому ограничению.

Таким образом, ступенчатый график изменения программной скорости подачи в зависимости от оставшейся части припуска представляет собой управляющую программу, по которой настраивается станок на заданный цикл шлифования. Цикл шлифования начинается при максимальном значении снимаемого припуска $П_{max}$. Заканчивается цикл по команде ПАК, когда оставшаяся часть припуска равна нулю, т. е. после съема последней части припуска $П_3$.

При проектировании цикла шлифования, для обеспечения максимальной производительности операции необходимо стремиться к тому, чтобы на протяжении всего цикла шлифования текущее значение фактической скорости подачи было максимально допустимым, тем или иным ограничением, на протяжении всего пути снятия припуска.

Для этого надо как можно ближе приблизить фактическую скорость подачи к области ограничений. В этом случае фактическая подача будет наибольшей, а цикл производительней. Поскольку управление фактической скоростью подачи ведется через ступенчатое изменение программной скорости подачи, то чем больше ступеней, тем ближе можно приблизить фактическую подачу к области ограничений, и тем производительней будет цикл. В идеале, бесступенчатый цикл самый производительный, поскольку он заставит фактическую скорость подачи совпасть с областью ограничений. Отсюда следует, что бесступенчатые циклы, (т. е. циклы, с плавным изменением программной скорости подачи) потенциально могут обеспечить полное совпадение траектории фактической скорости подачи с границей области допустимых значений, и, тем самым достичь теоретического предела производительности цикла.

Таким образом, чем больше ступеней переключения программной скорости подачи, тем ближе фактическая скорость подачи приближается к области ее допустимых значений, тем больше среднее значение фактической скорости подачи за время цикла, и, следовательно, тем меньше основное время и больше производительность цикла.

Однако, как показывают расчеты, увеличение количества ступеней цикла целесообразно вести до определенного предела, т.к наблюдается не значительный прирост производительности цикла при слишком большом количестве ступеней цикла. Например, для операций круглого врезного шлифования, с каждой последующей ступенью, большей пятой ступени – прирост производительности цикла уменьшается и составляет доли процента, что не оправдывает усилий по наладке и управлению. Поэтому на практике применяют 3–5ступеней. Следовательно, при расчете оптимального цикла, оптимальное количество ступеней цикла надо определять из условия, что прирост производительности цикла при добавлении новой ступени составляет менее 5 %. Таким образом, если кто-то утверждает, что цикл обработки на станке с ЧПУ априорно должен быть, например, только 3-х ступенчатым, это значит, он не понимает принципа формирования высокопроизводительного цикла.

В настоящее время ведутся научные исследования по расширению возможностей системы оптимизации, позволяющей рассчитывать оптимальные циклы для нескольких подач и оптимальные характеристики режущего инструмента.

Библиографический список

1. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.
2. Лурье, Г.Б. Оптимизация цикла шлифования на основе адаптивного управления / Г.Б. Лурье // Машиностроитель. – 1979. – № 3. – С. 12–14.
3. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
4. Переверзев, П.П. Оптимизация автоматических циклов круглого врезного шлифования: дис. … д-ра техн. наук / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1985. – 302 с.
5. Николаенко А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга / А.А Николаенко // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 57–59.

К содержанию

УДК 621.9.02 + 621.914.025.7 + 621.9.01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ЧПУ МОДАЛЬНЫМ АНАЛИЗОМ

Д.Ю. Пименов

В данной работе при помощи модального анализа проведены экспериментальные исследования динамических характеристик деревообрабатывающего центра с ЧПУ. В качестве динамических характеристик исследованы амплитудо-частотные характеристики, резонансные частоты в различных направлениях, динамическая и статическая жесткости, степень затухания колебаний, коэффициент динамичности центра с ЧПУ.

Ключевые слова: модальный анализ, обрабатывающий центр, вибрация, амплитудо-частотные характеристики, фрезерование.

В процессе механической обработки на точность выполняемых размеров и шероховатость обработанной поверхности оказывают влияние большое количество факторов, доминирующим из которых является погрешность обработки [1].

Для разных видов обработки имеется ряд математических моделей погрешностей обработки [2–6].

Однако все вышеперечисленные погрешности основываются на статическом определении податливостей и жесткостей технологической системы [2–4]. Реально же процесс резания протекает в динамике [8–12]. В процессе резания возникают множества колебаний, вызванные наличием люф-

тов и зазоров станка, конструктивными особенностями, а также непосредственно процессом резания [8–12]. Точность размеров заготовки [13–15], также, сказывается на динамику процесса резания. Таким образом, при решении подобных задач необходимо рассматривать не только статические, но и динамические податливости и жесткости технологической системы. Для этого необходимо знать амплитудо-частотные характеристики технологического оборудования, то есть, то с какими амплитудами будут колебаться те или иные части станка под действием возбуждающих воздействий различной частоты колебаний. Здесь необходимо учитывать вибрации конкретной технологической системы, возникающие в процессе резания. А ведь каждый тип станков и даже каждый станок обладает определенными амплитудо-частотными характеристиками. При этом данные характеристики могут отличаться при нагружении технологической системы в различных осевых направлениях *x, y* и *z*. Таким образом, важно знать: каким образом ведет себя технологическая система при различных частотах возбуждающего воздействия со стороны внешнего источника.

Цель исследования: установить амплитудо-частотные характеристики технологической системы.

Для решения поставленной цели проведем исследование амплитудо-частотных характеристик деревообрабатывающего центра с ЧПУ. Наиболее эффективным средством для этого является модальный анализ [10, 16–18].

Экспериментальные исследования проведены в Институте металлорежущих станков и технологии машиностроения Брауншвейгского технического университета, Германии.

Основой анализа форм колебаний в модальном анализе являются передаточные функции, которые описывают статические и динамические характеристики нагрузок, ускорений и перемещений элементов технологической системы. Для линейных системных характеристик применяется ускоренное преобразование Фурье к входным и выходным сигналам, и получают спектры энергии. Передаточная функция системы имеет вид:

$$G(i\omega)=\frac{f\{\text{выходной сигнал}\}}{f\{\text{входной сигнал}\}}=\frac{f\{y(t)\}}{f\{x(t)\}}=\frac{\int\limits_{-\infty}^{+\infty}y(t)e^{-i\omega t}dt}{\int\limits_{-\infty}^{+\infty}x(t)e^{-i\omega t}dt}=\frac{E_y(i\omega)}{E_x(i\omega)},$$

где $E_y(i\omega)$ – комплексный энергоспектр выходного сигнала; $E_x(i\omega)$ – комплексный энергоспектр входного сигнала.

Экспериментальная установка для определения динамических характеристик станка модальным анализом состоит: из электромагнитного вибровозбудителя (Шейкера); пьезоэлектрического акселерометра для измерения перемещения, скорости или ускорения, который крепился при помощи магнита или воска; 4-канального FFT-анализатора (FFT = Fast-Fourier-

Transformation – анализатор ускоренного преобразования Фурье), усилителя мощности и компьютера для проведения модального анализа. В качестве пунктов структуры станка выбираются характерные точки (DOF's = Degree of Freedom – степень свободы), которые характеризуют поведение различных элементов станка, в которых проводятся измерения частотных характеристик. В соответствии с пунктами определяются координаты этих пунктов (X, Y, Z) и при помощи пакета прикладных программ STAR Modal построена каркасная модель [18] (рис. 1). Шейкером деревообрабатывающему центру сообщается возбуждающий сигнал частотой 1 Гц (Sweep Sinus) в точке контакта на концевой фрезе, установленной в шпиндель станка, обозначенной DOF 93 (Firma Brueel&Kjaer: Gen. Purpose Head Type 4812, ExciterBody Type 4801 [18]). Далее сигнал передается генератором анализатора FFT через усилитель мощности (FBrueel&Kjaer Type 2707 [18]). Колебания станка испытывают в диапазоне 0…1500 Гц, так как доминирующие частоты принимают значения меньше 1500 Гц.

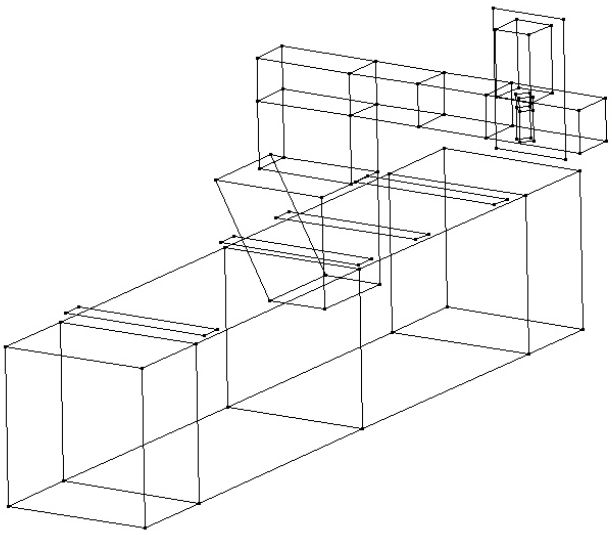


Рис. 1. Каркасная модель деревообрабатывающего центра

Выходной сигнал элементов технологической системы деревообрабатывающего станка IMA снимался пьезоэлектрическим акселерометром и передавался FFT-анализатором (4-х канальный анализатор фирмы Schlumberger).

Частотные характеристики измерялись в каждом пункте DOF и направлениях осей *x, y* и *z*. В результате получены амплитуды колебаний, частоты колебаний, а также резонансные частоты с помощью пакета прикладных программ NVGate. Частотная характеристика податливости DOF 93 (FRF-кривых: Frequence Response Function) избранная, так как здесь резонансные частоты хорошо выражены. На рис. 2 показаны в точке 93 амплитудо-частотная характеристика и фазо-частотная характеристика динамической податливости в интервале от 0 до 1500 Гц.

Результаты расчетов и анализ

Из рис. 2 видно, что амплитуда колебаний в направлении осей *x* и *y* достигает наибольших значений на частотах 250, 620 и 950 Гц, а при частотах 620 и 950 Гц – резонансных величин. Также получены различные формы мод станка (колебаний) для разных значений частот, в качестве примера показана форма моды при резонансной частоте f = 950 Гц и в направлении оси *z* (рис. 3).

Под действием возбуждающей нагрузки в направлении оси *z* элементы технологической системы деревообрабатывающего центра IMA ведут себя по-разному. Вертикальные перемещения в направлении оси *z* минимальны. При этом стол станка и шпиндель значительно колеблются в направлении оси *y*.

Используя рис. 3, определяем характеристику основной подсистемы «инструмент–шпиндельный узел» в пункте 93.

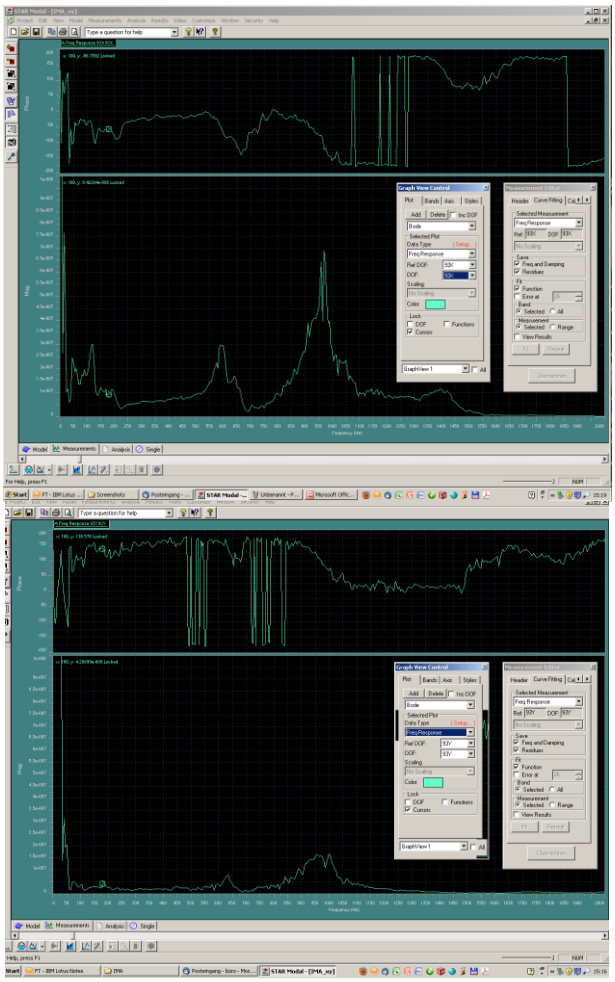


Рис. 2 Амплитудо-частотная и фазо-частотная характеристики динамической податливости деревообрабатывающего центра фирмы IMA в интервале 0…1500 Гц

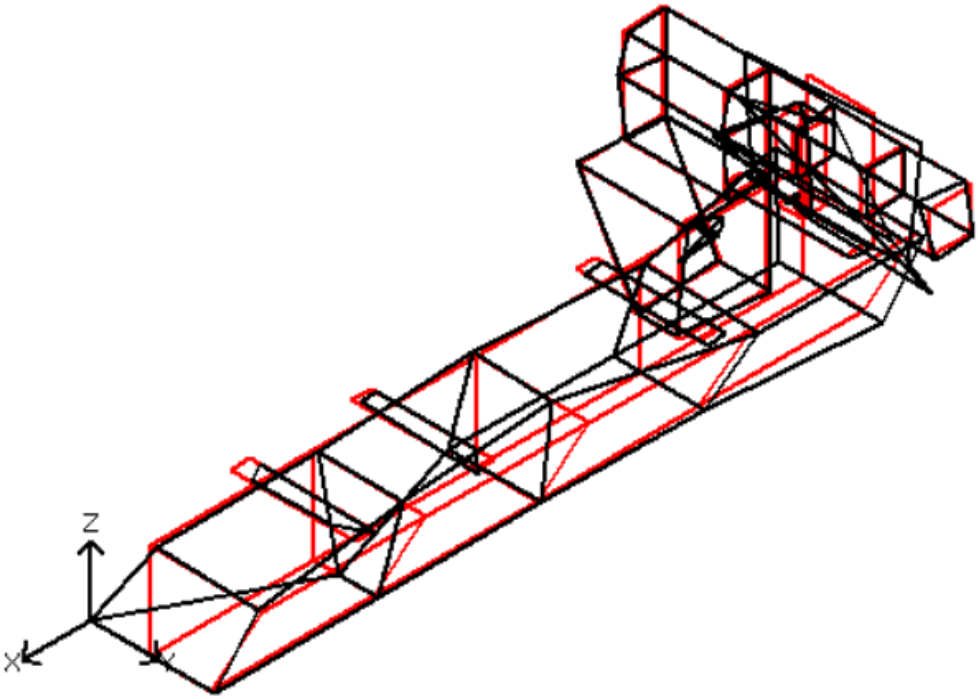


Рис. 3. Форма моды – форма колебаний деревообрабатывающего центра фирмы IMA в направлении оси *z* при резонансной частоте 950 Гц

Частота резонанса f_{r_1} подсистемы «инструмент–шпиндельный узел» и максимально динамическая ее податливость H_{max_1} непосредственно могут определяться по частотной характеристике:

$$f_{r_1} = 620 \text{ Гц};\ H_{max_1} = 300 \cdot 10^{-9} \text{ м/Н}.$$

Расчет демпфирования происходит по методике «$\sqrt{2}$» [16]. Ширина резонансной кривой определяется на участке, высота который равна $1/\sqrt{2}$ от максимального значения пика:

$$H_{max_1} \cdot 1/\sqrt{2} = 262{,}3 \cdot 10^{-9} \text{ м/Н}.$$

Соответствующие точки ширины резонансной кривой f_1 и f_2, находящиеся на высоте $H_{max_1} \cdot 1/\sqrt{2}$, на оси абсцисс принимают следующие значения:

$$f_1 = 590 \text{ Гц};\ f_2 = 620 \text{ Гц}; \Delta f = f_2 - f = 30 \text{ Гц}.$$

Ширины значения частоты Δf находится в тесной связи с коэффициентом затухания σ и степенью затухания D:

$$\Delta f \cdot 2 \cdot \pi = \Delta\omega = 2\sigma;\ D = \sigma/\omega = \Delta f / 2 \cdot f_r.$$

Степень затухания D_1 основной системы определяется следующей формулой:

$$D_1 = \Delta f / (2 \cdot f_{r_1}).$$

Далее определяем статическую жесткость основной системы:

$$K_{стат} = 1/(H_{max} \cdot 2 \cdot D) = 69{,}4\ Н/мкм.$$

Соответственно для следующих частот динамическая характеристика системы в разных направлениях определяется по выше проведенной методике, результаты которых приведены в таблице.

Таблица

Определение коэффициента динамичности
при различных частотах станка в направлении осей *x* и *y*

№	DOF	Направление	Резонансная частота, f, Гц	Степень затухания, D	Динамическая жесткость, $\cdot 10^{-6}$, Н/м	Статическая жесткость, $\cdot 10^{-6}$, Н/м	Коэффициент динамичности, $K_{дин}$
1	93	*x*	110	0,045	3,3	37	0,0891
2	93	*x*	620	0,024	3,3	69,4	0,0476
3	93	*y*	620	0,0161	12,5	388,2	0,0322
4	93	*x*	950	0,0105	1,35	64,3	0,021
5	93	*y*	950	0,316	5,6	87,9	0,0637
6	93	*x*	1400	0,025	9,09	181,8	0,05

Выводы

Проведенный эксперимент по исследованию АЧХ деревообрабатывающего центра IMA показал, что резонансная амплитуда колебаний соответствует частотам f = 620 и 950 Гц;

Таким образом, для данного станка работа на данных частотах будет приводить к большим амплитудам колебаний элементов технологической системы и, в свою очередь, оказывать негативное влияние на точность выполняемых размеров и шероховатость обработанной поверхности;

Наиболее слабым с точки зрения наибольших резонансных амплитуд колебаний станка IMA является направление оси *x*;

Для стабильного процесса резания следует исключать назначение режимов резания, вызывающих такие резонансные частоты;

Данная методика анализа амплитудно-частотных характеристик может быть применена для любых станков.

Библиографический список

1. Гузеев, В.И. Режимы резания для токарных и фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков; под ред. В.И. Гузеева. – М.: Машиностроение, 2005. – 368 с.

2. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С. Колев, Л.М. Горчаков. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.

3. Медведев, Д.Д. Точность обработки в мелкосерийном производстве / Д.Д. Медведев. – М.: Машиностроение, 1973. – 120 с.

4. Кошин, А.А. Теория точности и оптимизация многоинструментной токарной обработки: дис. … д-ра техн. наук / А.А. Кошин. – Челябинск, 1995. – 385 с.

5. Николаенко, А.А. Моделирование обеспечения точности обработки при плоском глубинном шлифовании периферией круга / А.А. Николаенко // Технология машиностроения. – 2011. – № 5. – С. 57–59.

6. Ардашев, Д.В. Основы групповой технологии шлифования / Д.В. Ардашев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 54–55.

7. Дьяконов, А.А. Имитационные алгоритмические модели в технологии машиностроения / А.А. Дьяконов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 2(298). – С. 35–40.

8. Кошин, А.А. Элементы матричной теории точности многоинструментной обработки в пространственных наладках / А.А. Кошин, Н.Д. Юсубов // Вестник машиностроения. – 2013. – № 9. – С. 13–17.

9. Григорьев, С.Н. Тенденции развития мирового станкостроения / С.Н. Григорьев, А.А. Грибков, Д.В. Захарченко // СТИН. – 2013. – № 1. – С. 1–4.

10. Юсубов, Н.Д. Определение динамической характеристики токарно-револьверного станка с помощью модального анализа / Н.Д. Юсубов // Известия Челябинского научного центра. – 2004. – № 2(23). – С. 112 – 117.

11. Мартынов, В.В. Статистическое исследование траекторий движения шпиндельных узлов станков / В.В. Мартынов, П.В. Мартынов // СТИН. – 2013. – № 9. – С. 9–13.

12. Тверской, М.М. Снижение усилий приводов при обработке на станках с параллельной кинематикой / М.М. Тверской, В.А. Смирнов, Ю.Л. Сюськина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 137–142.

13. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве / И.Н. Ердаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – № 39(298). – С. 139–141.

14. Ердаков, И.Н. Оценка влияния пористости на напряженно-деформационное состояние стальной плиты / И.Н. Ердаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 2. – № 2. – С. 125–132.

15. Салимов, Р.Д. К вопросу работоспособности углового сварного шва подкрановой балки / Р.Д. Салимов, М.А. Иванов, И.А. Щербаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 147–150.

16. Туромша, В.И. Модальный анализ портала тяжелого продольно-фрезерного станка типа «Гентри» / В.И. Туромша, Туми Эль-Мабрук Абужафер Али, И.Л. Ковалева, С.С. Довнар, И.И. Шумский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2013. – № 3. – С. 38–48.

17. Dossing, O. Strukturen pruefen. Teil 2: Modalanalyse und Simulation / O. Dossing. – Firma Bruel & Kjaer, 1989.

18. N. N. The STAR-System. Theory and applications. Structural Measurement Systems. Milpitas: USA, 1990.

19. N. N. Schwingungsmessung. Firma Brueel&Kjaer, 1986.

К содержанию

УДК 621.923.01

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЦИКЛОВ ОБРАБОТКИ НА ПРИМЕРЕ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ

А.В. Попова

Произведен анализ требований, предъявляемых к построению оптимальных циклов внутришлифовальной обработки в трехмерной системе координат управляющих параметров (скорость радиальной подачи, скорость осевой подачи и припуск).

Ключевые слова: оптимизация циклов обработки, внутреннее шлифование, динамическое моделирование, модели ограничения процесса обработки.

Внутреннее шлифование является одним из распространенных видов чистовой обработки отверстий. Охватывается все виды производства: от единичного (обработка цилиндрических, конических и фасонных отверстий в различных деталях машин и др.) до массового производства (обработка колец подшипников, гильз цилиндров двигателей и др.). Внутришлифовальная обработка применяется не только как окончательный этап, но и в качестве промежуточной ступени обработки с целью повысить точность размеров и формы отверстия.

На подавляющем большинстве машиностроительных предприятий России назначение режимов обработки осуществляется по справочникам 60-х, 70-х и 80-х годов, разработанных для универсальных станков и полуавтоматов [1, 2, 3, 4, 5 и др.]. Разработка данных справочников производилась на основании статических данных, полученных на советских заводах. В результате чего, большая часть данных по выбору режимов резания, величины припуска, параметров шлифовального инструмента зачастую противоречат друг другу, либо отсутствуют полностью (как например, геометрические параметры шлифовальной оправки). В табл. 1 приведено сравнение параметров режимов резания, назначенных на основании данных, представленных в различных справочниках.

Появлению современного оборудования, нового шлифовального инструмента, позволяющих производить обработку изделий на более высоких скоростях, делает данные справочники непригодными для применения в условиях современного производства. В результате, на предприятиях вынуждены подбирать режимы резания экспериментальным путем. Процесс подбора режимов резания имеет ряд значительных недостатков: значительная

затраты материальных средств, времени на подбор режимов; требуемые качества и точность изделия не всегда достигаются; потеря производительности процесса обработки (на первое место ставится качество и точность изделия); нерентабельность для серийного и мелкосерийного типа производства из-за ограниченности количества пробных заготовок и др. Покупка нормативно-справочной литературы за рубежом не всегда является возможной, т.к. данный продукт является стратегическим и не находится в свободном доступе для обычного потребителя.

На данный момент практически отсутствуют теоретические разработки, позволяющие разрабатывать оптимальные управляющие программы для станков с ЧПУ для различных видов обработки. Существующие разработки уделяют моделированию силы резания и технологических ограничений, оказывающих на производительность процесса обработки. Например, в работе [6], разработана методика совершенствования проектирования операций плоского шлифования. Данная методика является инженерным метод подбора режимов обработки, содержащих в себе ряд существенных недостатков: 1) отсутствуют модели точности формы и расположения поверхностей (невозможно производить ограничение скорости подачи по величине упругого отжатия); 2) отсутствует учет изменения условия обработки (степени затупления круга, исходного биения припуска заготовки, величины снимаемого припуска и др.); 3) не учитывается величина фактической скорости подач, из-за этого, неправильно рассчитывается количество ходов, необходимых для снятия заданной величины припуска на ступени; 4) формула времени рассчитывается без учета переходных процессов; 5) значительные затраты по времени на расчет для одной точки и т. д.

Рассмотрим некоторые особенности построения циклов внутришлифовальной обработки в трехмерной системе координат – величина снимаемого припуска ($П$, мм), скорость осевой подачи (V_{Soc}, мм/мин), скорость радиальной подачи, ($t_{\text{П}}$, мм/ход). Современные шлифовальные центры, позволяют производить управление параметрами обработки в зависимости от величины снимаемого припуска и в независимости друг от друга (рис. 1, а). Частный случай трехмерных циклов обработки (рис. 1, б) ставит изменения параметров управления в зависимость друг от друга, а также от величины снимаемого припуска.

На рис. 2 представлен пространственный 3-х ступенчатый цикл, соответствующий рис. 1, б. Рассмотрим по подробнее рис. 2: на нем можно увидеть изменения взаимосвязь всех управляемых параметров друг от друга – 1) программного значения скорости радиальной подачи в зависимости от величины снимаемого припуска $f(t_{\text{П}};П)$ (сплошная линия), 2) скорости осевой подачи в зависимости от величины снимаемого припуска $f(V_{\text{Soc}};П)$ (штриховая линия разделенная окружностями), 3) программного значения скорости радиальной подачи в зависимости от скорости осевой подачи $f(t_{\text{П}};V_{\text{Soc}})$ (штриховая линия разделенная квадратами). Совокупность взаи-

мосвязей всех управляющих параметров представляется в виде пространственной траектории управляющей программы (на рис. 2 ее область закрашена). Под влиянием упругих деформаций ^{y} фактическая величина скорости радиальной подачи t_{Φ} отличается от программной t_{Π}.

Таблица 1

Сравнение параметров режимов резания,
назначенных по справочникам [1, 2, 3, 4, 5]

Параметры режимов обработки	Заводские значения	Значения, назначенные по нормативно-справочной литературе			
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Материала детали трубка распределительная: Сталь 20ХГНМ ГОСТ 4543-71 Диаметр отверстия, мм: 24,7 H14; Длина обработки, мм: 150 Шероховатость: R_a 0,8; Величина припуска, мм: 2П = 0,2 Станок: внутришлифовальный универсальный высокой точности 3К227В					
Параметры режимов резания					
Число оборотов детали, об/мин	240	410	420	300	330
	0 %	↑ 71 %	↑ 75 %	↑ 25	↑ 38 %
Скорость осевой подачи, мм/мин	3000	6120	2650	4500	5000
	–	↑ 104 %	↓ 11 %	↑ 50 %	↓ 30 %
Радиальная подача, мм/дв.ход	0,004	0,003	0,004	0,003	0,006
	0 %	↓ 25 %	0 %	↓ 25 %	↓ 45 %
Время обработки, мин	4,37	2,81	5,7	4,4	2
	0 %	↓ 37 %	↑ 31	0 %	↓ 54 %

Примечание: в качестве базовых значений применялись заводские показатели режимов резания. В каждой строке указаны расхождения в процентах от заводского значения.

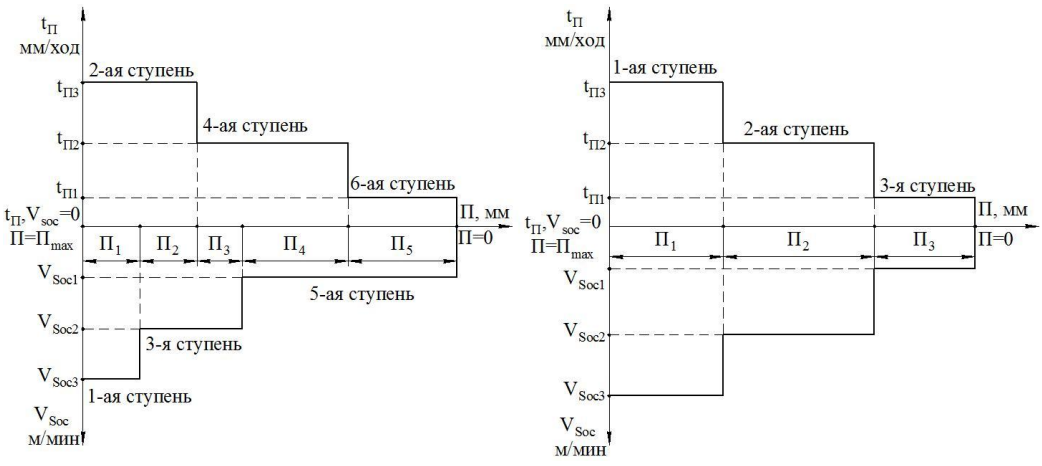


Рис. 1. Трехмерный циклы внутришлифовальной обработки:
а – общий случай; б – частный случай

Графическое представление изменения фактического значения скорости радиальной подачи представлено в координатных осях $t_{\text{П}}$ и $П$ (штриховая линия). Вследствие того что рассматриваемый цикл представлен в трехмерной системе координат фактическая скорость радиальной подачи по мимо размещения в двух координатах имеет пространственное представление, обозначенное на рис. 2 штрихпунктирной линией с точкой. В процессе проектирования оптимальных циклов необходимо учесть исходное биение заготовки и допуск на готовую деталь.

В 90-х годах в Челябинской школе шлифования разработана теория построения оптимальных циклов обработки для операций круглого врезного шлифования [7]. В основе данной теории находиться модель формирования фактического значения радиальной подачи в процессе обработки и модель сил резания, охватывающая практически все технологические факторы, оказывающие влияние на изменение величины сил резания (скорость детали и круга, механические геометрические параметры зоны контакта круга и заготовки, и др.).

В качестве метода оптимизации используется метод динамического программирования [8]. Главным достоинством данного метода является то, что он не требует построения заранее области допустимых значении управляющих параметров и является не чувствительным к характеру целевой функции и её ограничениям. Что в свою очередь позволяет, наложить на процесс ограничения, определение которых возможно только в конце цикла (ограничения по точности, шероховатости, безприжоговости). За критерий оптимальности выбрано время обработки. Каждый из возможных вариантов расчета проверяется по следующим ограничениям: допустимой погрешности размеров, по допустимой глубине прижога, по допустимой шероховатости, по осыпаемости круга, по степени затупления круга и др. Необходимо отметить, что в процессе расчета подбираются оптимальные сочетания значений программных скоростей подач и величин частей припуска, снимаемых на разных ступенях, обеспечивающих требуемые точности и качество обрабатываемой поверхности. Проектируемые циклы обработки для операций круглого врезного шлифования являются двухмерными, и отражают зависимость измерения скорости радиальной подачи от величины снимаемого припуска.

Однако автоматические циклы внутреннего шлифования по своей структуре и трудоемкости управления более сложные по сравнению с круглым наружным, т. к. необходимо управление не только радиальной подачей, но и осевой. Кроме того, необходимо для внутреннего шлифования необходимо назначать дополнительные режимные параметры. Поэтому методика оптимизации круглого врезного шлифования не может быть напрямую применена для проектирования оптимальных циклов внутреннего шлифования и требует дальнейшего развития.

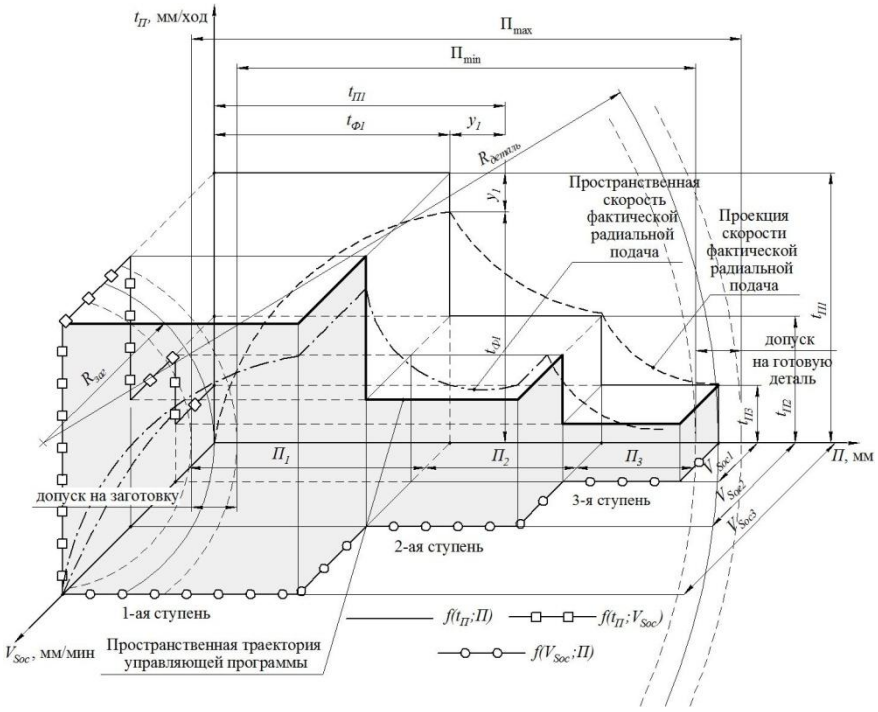


Рис. 2. График управляющей программы в 3-х мерном пространстве для 3-х ступенчатого цикла внутришлифовальной обработки

Поэтому, необходима разработка новой методики проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки, комплексно учитывающей все вышеперечисленные управляющие параметры при внутреннем шлифовании в трехмерной системе координат управляемых параметров на основе развития метода динамического программирования для многомерного пространства. Оптимизации также требуют следующие параметры процесса внутреннего шлифования: геометрические параметры круга (ширина и диаметр), частота оборотов заготовки, технологические условия обработки (вылет и конструкция шлифовальной оправки), величины перебега круга, характеристики шлифовального круга и др.

В качестве критерия оптимальности принято минимальное время обработки, но возможно применение и других критериев оптимальности – мощность резания, себестоимость оборудования или операции в целом и др. В качестве комплекса моделей ограниченней процесса внутришлифовальной обработки предлагается использовать ограничения: по допустимой погрешности размеров обрабатываемой поверхности; по осыпаемости круга; по допустимой глубине прижога; по допустимой шероховатости обрабатываемой поверхности; по мощности привода вращения круга и заготовки; по допустимому количеству ступеней переключения программной скорости подачи; по силе зажима заготовки в приспособлении; по типоразмерам круга; по характеристики круга (твердость, зернистость); по конструктивным параметрам шлифовального шпинделя; по величине перебега круга; по достижимой точности на станке и др.

Наложение ограничений для оптимального цикла в трехмерной системе координат носит более сложный характер. Та как требует построения областей ограничений в зависимости от трех управляемых параметров, оказывающих влияние друг на друга.

Разработанная на основе вышеприведенных подходов, разработана методика оптимизации цикла внутреннего шлифования, которая дает возможность заменить полный перебор вариантов циклов обработки, занявшего недопустимо большое количество времени (измеряемого годами), направленным перебором с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (длительных по времени) вариантов. Что в свою очередь в значительной мере снижает время, затрачиваемое на производстве на подбор оптимальных значений режимов обработки.

Библиографический список

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Часть 3. Протяжные, шлифовальные и доводочные станки. – Москва, 1978.

2. Барановский, Ю.В. Режимы резанья металлов: справочник / Ю.В. Барановский. – М.: Машиностроение, 1972. – 406 с.

3. Кащук, В.А. Справочник шлифовщика / В.А. Кащук, А.Б. Верешагин. – М.: Машиностроение, 1988. – 480 с.

4. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резанья металлов: справочник / под ред. В.И. Баранчикова. – М. Машиностроение, 1990. – 400 с.

5. Режимы резанья на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник. – Челябинск: Изд-во АТКОСО, 2007. – 384 с.

6. Шипулин, Л.В. Проектирование операций плоского шлифования периферий круга на базе комплексного имитационного моделирования: дис. … кан. тех. наук / Л.В. Шипулин. – Челябинск, 2013. – 187 с.

7. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. … д-ра техн. наук / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1999. – 293 с.

8. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во ин. лит., 1960. – 400 с.

К содержанию

УДК 621.924 + 621.922.025

ОСОБЕННОСТИ НАРЕЗАНИЯ РЕЗЬБЫ НА РЕЗЬБОШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКАХ

В.Н. Сафин, В.М. Нечаев

В статье рассмотрены особенности резьбошлифования, по сравнению с другими видами шлифования.

Ключевые слова: резьбошлифование, шлифовальный круг, профиль резьбы, впадина резьбы, износ круга.

При шлифовании резьб, применяется метод копирования профиля режущей поверхности шлифовального круга, при котором профиль образуемой поверхности должен совпадать с формой профиля круга, для этой цели круг специально профилируется алмазным инструментом. Это накладывает определенные трудности при выборе характеристик шлифовального круга: зернистости, степени твёрдости, материала связки, которые во многих случаях определяются радиусом закругления впадины резьбы, шагом резьбы. Профиль шлифовального круга должен соответствовать профилю резьбы, как известно шлифуют в основном резьбы калибров, метчиков, при этом не допускается выхода радиуса закругления впадины резьбы за допустимые отклонения, появления прижогов на боковой поверхности профиля или искажения правильной геометрической формы профиля резьбы. Под правильной геометрической формой профиля будем понимать прямолинейность боковых сторон профиля, при несоблюдении этого, появление криволинейного профиля боковой поверхности приводит к изменению величины шага по среднему диаметру резьбы. Шлифовальный круг изнашивается быстрее всего по вершине профиля, что влияет на величину радиуса впадины шлифуемой резьбы и на геометрию профиля резьбы. Лучшие результаты при шлифовании резьбы получают в том случае, если на участке профилирующем радиус впадины находится несколько зерен абразива (не менее трех) [1] , в этом случае они устойчиво удерживаются связкой круга. Большая размерная стойкость шлифовального круга достигается уменьшением зернистости, но при этом усиливается засаливаемость круга, т. е. заполнение поверхности между зернами шламом, что приводит к увеличению тепловыделения при шлифовании. Способность связки круга удерживать абразивные зерна характеризуется твердостью круга.

Для обеспечения самозатачивания круга твердые материалы с повышенными истирающими свойствами необходимо шлифовать мягкими кругами, а мягкие материалы – твёрдыми. Резьбу на заготовках из труднообрабатываемых материалов и твердых сплавов, как правило, шлифуют кругами М2–М3. В случае если круг выбран неправильно, то рабочая поверхность круга может осыпаться, профиль резьбы становиться не прямолинейным,

надробленным и шероховатым, процесс резания сопровождается специфическим дребезжанием. При засаливании круга поверхность витка резьбы, особенно верхняя часть профиля резьбы получает прижог, который выражается почернением и потерей механических свойств материала.

При резьбошлифовании между осевым и вращательным движениями заготовки должна быть жёсткая связь, которой нет при круглом и плоском шлифовании. Диапазон возможных скоростей вращения заготовки при резьбошлифовании значительно ниже, чем при круглом шлифовании. Однако, условия работы круга более тяжелые, любые температурные деформации, возникающие у детали, приводят к дополнительному съёму металла и соответственно, к искажению профиля резьбы. Эта деформация вызывает ответное увеличение силы действующей на круг, что приводит его к большему износу, особенно в области острия круга. Круг приходится часто править, чтобы получить необходимый профиль, особенно это актуально при небольшом шаге резьбы, когда размеры профиля соизмеримы с линейными размерами частиц круга и все дефекты проявляются более чётко. Как известно, для получения резьб с точными параметрами профиля резьбы, шага, среднего диаметра, шлифование профиля идёт с подачей в одну сторону, как правило, в сторону передней бабки, при этом давление на эту сторону больше, соответственно износ больше, что вызывает искажение профиля резьбы.

Для получения профиля резьбы необходимого качества необходимо длительное выхаживание с подачей 0,01÷0,02 мм. Необходимо учитывать степень износа узлов станка, т. е. как отрабатывает станок величин подачи, которую сообщили подвижной бабке, задав перемещение на лимбе 0,01 мм. Необходимо знать величину мертвого хода узлов станка.

Всё вышеприведённое отражает качественный характер взаимодействия систем станка, приспособления, инструмента, детали. Для качественной характеристики необходимы дальнейшие исследования и измерения соответствующих параметров круга, детали, станка с использованием современной измерительной базы.

Библиографический список

1. Мирнов, И.Я. Резьбошлифование и затылование резьбообразующих инструментов: учебное пособие по дисциплине «Технология и автоматизация инструментального производства» / И.Я. Мирнов, А.М. Сарайкин. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1998. – 123 с.

К содержанию

УДК 658.53

ЗАДАЧИ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО НОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Н.С. Сазонова

Обоснованы принципы разработки современной настраиваемой компьютерной системы автоматизированного нормирования технологических процессов: основной единицей проектирования в которой выступает технологический переход; система представляет собой программный комплекс, включающий локальные алгоритмы, решающие отдельные задачи, и инвариантный резидентный алгоритм, управляющий процессом отработки локальных алгоритмов; последовательность алгоритмов проектирования технологического перехода представлена в виде командной строки; а хранение всего комплекса данных осуществляется в едином структурированном поле данных.

Ключевые слова: система автоматизированного нормирования технологических процессов; алгоритмизация нормативной методики; командная строка; инвариантный резидентный алгоритм; единое поле данных.

Задача нормирования выступает в качестве ключевой в технологической подготовке производства, поскольку рассчитанные значения нормы времени являются базой для определения экономических показателей деятельности предприятия: загрузки оборудования, необходимой численности работников, и, в конечном итоге, себестоимости выпуска продукции.

Современное машиностроение характеризуется преобладанием мелкосерийного производства и очень широкой, постоянно изменяющейся номенклатурой выпускаемых изделий. В этих условиях запуск в производство новых изделий должен осуществляться в очень сжатые сроки; на технологическую подготовку производства и, в частности, на экспериментальный подбор режимов резания практически не остается времени. То есть, возникает проблема организации такой системы нормирования, которая бы обеспечивала назначение режимов обработки и определение составляющих нормы времени с достоверной точностью и в минимальные сроки. Наиболее предпочтительным способом решения этой проблемы является перенесение ее решения в область информационных компьютерных технологий – использование систем автоматизированного проектирования (САПР ТП) и нормирования технологических процессов (САН ТП).

К настоящему времени в нашей стране разработано и находятся в промышленной эксплуатации ряд наиболее известных САПР ТП. Среди них такие системы как: КОМПАС/Вертикаль, T-FLEX/Технология, ADEM,

СПРУТ, а также CADMECH/TECHCARD (г. Минск). Также стоит отметить появившиеся сравнительно недавно системы: САПР ТП TimeLine (ЗАО SDI Solution), САПР ТП Актив (г. Каменск-Уральский).

Все перечисленные системы позволяют на достаточно высоком уровне проектировать структуру технологического процесса, то есть в диалоговом режиме или путем проектирования по типовому техпроцессу сформировать последовательность выполнения технологических операций, выбрать оборудование, задать состав технологических переходов на каждой операции, с учетом используемой технологической оснастки: режущего, вспомогательного и мерительного инструмента. Однако, решение вопросов трудового нормирования в указанных системах, либо вообще отсутствует, либо выполнено на гораздо более низком уровне (не соответствует нормативной методике, заложенной в общемашиностроительных нормативах). Отдельные элементы нормативной методики реализованы в системах T-FLEX/Технология, ADEM, TECHCARD, СПРУТ, но комплексной реализации нормативной методики, в полном соответствии с общемашиностроительными нормативами, нет ни в одной из перечисленных систем. Многочисленные форумы инженеров-технологов в Интернете, которые обмениваются мнениями о своих бесплодных попытках найти адекватную систему автоматизированного нормирования, являются тому красноречивым подтверждением.

Стоит отдать должное разработчикам САПР ТП TimeLine, которые в своей системе предприняли попытку реализовать нормативную методику, заложенную в справочнике «Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с ЧПУ» под ред. В.И. Гузеева [1]. Однако в данном случае компьютерная система просто выполняет роль базы данных, содержащей большое количество нормативных таблиц, сам же выбор режимов резания и норм времени фактически отдан на откуп технологу, сидящему за компьютером, и полностью зависит от его опыта и квалификации. Поэтому термин «*автоматизированное* проектирование и нормирование» в данной ситуации вряд ли уместен.

Строго говоря, следует отметить, что опыт создания САН в четком соответствии с нормативной методикой имеется. В 80–90-х годах прошлого века на кафедре технологии машиностроения Челябинского политехнического института (ныне ЮУрГУ) были разработаны две системы автоматизированного нормирования. Это - «Общемашиностроительные нормативы времени на операции, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках, с применением автоматизированной системы технического нормирования. ППП ТАО» (1985 г.) [2] и «Общемашиностроительная система автоматизированного нормирования и проектирования операций, выполняемых на металлорежущих станках (ППП НОРМА)» (1988–90 гг.) [3]. ППП ТАО и НОРМА прошли апробацию и в течение ряда лет успешно эксплуа-

тировались на машиностроительных предприятиях страны. Эти системы базировались на общемашиностроительных нормативах, выпущенных в 70-х годах прошлого века (новых для своего времени) и позволяли производить полный расчет всех составляющих нормы времени для большинства видов обработки.

Анализ возможностей существующих современных САПР показывает, что по уровню заложенного в них методологического и алгоритмического обеспечения они пока еще очень далеки от систем ТАО и НОРМА, и фактически представляют собой красиво оформленные (в этом им стоит отдать должное) объемные хранилища данных (базы данных), помогающие технологу сравнительно быстро сформировать комплект технологических документов для сопровождения изготовления детали или изделия, но находящиеся в прямой зависимости от квалификации и опыта этого конкретного технолога.

Таким образом, в современных условиях актуальна проблема разработки САН, которая позволяла бы *автоматизировать* назначение режимов обработки и определение всех составляющих нормы времени в точном соответствии с нормативными методиками.

Простая реанимация, например, системы НОРМА на нынешнем этапе неприемлема, поскольку те инструментальные и программные средства, на которых она было построена, к настоящему времени устарели и уже не используются.

Современные же аппаратные средства, общесистемное и прикладное программное обеспечение компьютерных технологий представляют принципиально новые инструментальные возможности разработки и организации прикладных программ, поэтому возникает необходимость и возможность разработки новой, современной настраиваемой САН техпроцессов, которая бы позволяла, с одной стороны, назначать режимы обработки и определять все составляющие нормы времени согласно принятым нормативным методикам; а, с другой стороны, обеспечивала настраиваемость системы по набору проектируемых переходов.

В свое время, опыт эксплуатации ППП ТАО и НОРМА на предприятиях и выявил такой их недостаток, как трудности адаптации к условиям конкретного предприятия по возможности проектирования различных переходов.

Специфика обрабатывающих отраслей, и, в частности, современного машиностроения такова, что существует множество самых различных предприятий с различным охватом видов обработки, т. е. охват по необходимым алгоритмам проектирования на разных предприятиях будет очень сильно различаться.

Система автоматизированного нормирования, предназначенная для широкого внедрения должна обеспечивать возможность проектирования и нормирования любого технологического перехода, который может встре-

титься на предприятии. Конечно, можно пытаться создать всеобъемлющую САН, но такая система для каждого предприятия будет являться избыточной, поскольку большая часть переходов на каждом конкретном предприятии окажется невостребованной, причем невостребованными на разных предприятиях будут оказываться разные переходы

Поэтому актуальна задача разработки системы, настраиваемой как по информационному, так и по алгоритмическому обеспечению. Задача настраиваемости по информационному обеспечению фактически решена использованием СУБД (в реляционных базах данных). Настраиваемости по алгоритмическому обеспечению (по алгоритмам проектирования) в настоящее время нет ни в одной из существующих систем. Причем, речь идет о настраиваемости силами пользователей, а не разработчиков систем.

Основой любой системы нормирования является классификация основных единиц проектирования. В традиционных нормативах, в том числе и в общемашиностроительных нормативах времени и режимов резания за основную единицу нормирования принят вид обработки. Методика предусматривает комплект карт по назначению режимов резания и норм времени для базового варианта вида обработки. Другие варианты этого вида обработки, отличающиеся по технологическим или организационным факторам, учитываются при помощи поправочных коэффициентов. Но каждый вид обработки обычно охватывает целую группу различных технологических переходов, которые отличаются разными вариантами расположения обрабатываемой поверхности, наличием, либо отсутствием дополнительных поверхностей, направлениями подач и скоростей резания.

При разработке же техпроцесса основными единицами проектирования выступают технологический переход и технологическая операция. Соответственно на этапе нормирования основные элементы нормирования – также технологический переход, для которого назначаются режимы резания, основное и вспомогательное время и технологическая операция, для которой задаются штучное и подготовительно-заключительное время.

Системы автоматизированного проектирования техпроцессов, естественно, базируются на этой же иерархии основных единиц проектирования – технологических операциях и переходах. Поэтому в подсистемах нормирования, если САПР оснащена такой подсистемой, несоответствие между структурой нормативов и методологией компьютерного проектирования техпроцессов преодолевается комплексом специальных согласующих алгоритмов, устанавливающих соответствие между базовым вариантом рассматриваемого вида обработки и соответствующим технологическим переходом. Согласующие алгоритмы представляют собой цепочку логических условий выбора поправочных коэффициентов, на которые умножается нормативное значение искомого параметра базового варианта рассматриваемого вида обработки.

Такая организация алгоритмического и программного обеспечения САН приводит к тому, что отдельные характеристики технологических переходов оказываются заложенными непосредственно в текст программы. Следовательно, программное обеспечение системы, построенное по такому принципу, не является инвариантным относительно нормативной базы. Адаптация такой системы нормирования к условиям конкретного предприятия будет вызывать значительные сложности, так как добавление нового перехода, или удаление ненужного требует изменения текста программы.

Радикальным направлением устранения указанных недостатков является приведение структуры нормативной базы к виду, естественному для методологии компьютерного проектирования, т. е. нормативная база должна быть привязана не к виду обработки, а к технологическому переходу.

Поэтому, одной из основных задач создания современной Общемашиностроительной компьютерной системы нормирования техпроцессов, является задача алгоритмической структуризации общемашиностроительных нормативов времени и режимов резания, т. е. приведение их к виду, когда структурной единицей нормативной базы является комплект карт и рекомендаций по нормированию технологического перехода [4].

Итогом решения данной задачи явился выпущенный в 2012 году новый нормативный справочник для всех видов токарной обработки: «Токарная обработка: наладка, режимы резания», полностью основанный на принципе привязки к технологическому переходу [5].

Нормативная методика назначения режимов резания и определения нормы времени для любого вида обработки подразделяется на ряд этапов: назначение материала и определение геометрических параметров инструмента; определение длины рабочего хода; определение подачи; определение скорости резания; определение усилий и мощности резания; определение нормы времени. Каждый из этих этапов, в свою очередь, включает решение одной или ряда локальных задач. При разработке алгоритмического обеспечения САН ТП каждая из таких задач преобразуется в алгоритмический модуль. В итоге, получается комплекс алгоритмов, реализующих нормативную методику.

Описанная конфигурация САН предполагает минимизацию программного ядра системы – программное обеспечение представляет только логику перехода от одного локального алгоритма к другому, а сами локальные алгоритмы переводятся в состав информационного обеспечения. В этом случае настройка системы по набору технологических операций и переходов к условиям конкретного предприятия сведется к коррекции алгоритмической части её информационного обеспечения.

Для каждого технологического перехода логика последовательного выбора локальных алгоритмов задается жестко и представляет собой управляющий объект, получивший название **командная строка**. Командная

строка представляет собой, по сути, кортеж, в котором элементами упорядоченного набора значений атрибутов выступают метки команд – последовательность ссылок на локальные алгоритмы, по которым ведется проектирование данного перехода.

Структура командной строки состоит из ряда зон; каждая зона содержит одну или несколько ячеек. Каждая ячейка включает в себя один локальный алгоритм, реализующий решение одной элементарной задачи:

$$A_i\, B_j\, C_k\, D_l\, E_m\, F_n\, G_o\, \ldots\, ;$$

где *A, B, C, D, E …* – признаки алгоритмов, по которым ведется проектирование перехода; *i, j, k, l, m …* – порядковые номера вариантов алгоритма, зависящие от заданных условий.

То есть, в общем виде командную строку можно представить как: $\{K_j\}_i^l$;

(K_j – j-ый элемент командной строки, l – количество элементов в командной строке).

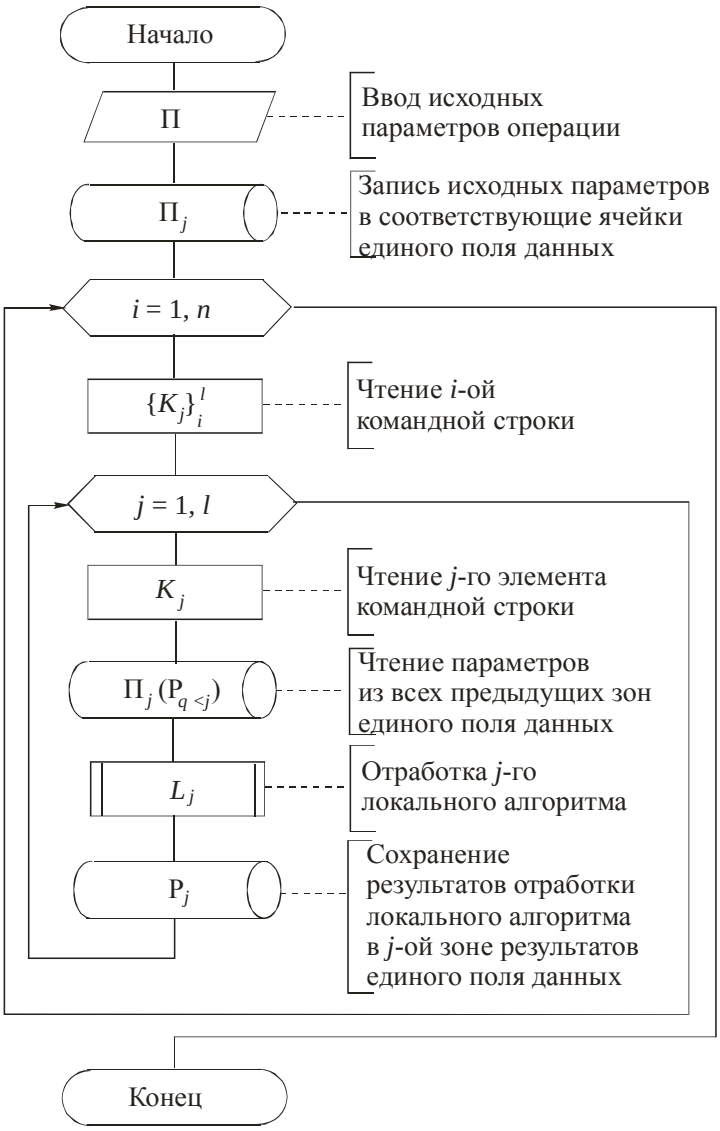
Для каждого вида обработки структура командной строки может иметь свои особенности, но общие принципы ее формирования остаются неизменными. Например, для переходов токарной обработки командные строки содержат три зоны: первая – выбор материала режущего инструмента и его характеристик; вторая – расчет режимов резания и коррекция их по станку; третья – расчет нормы времени.

Для управления процессом обращения к локальным алгоритмам и их отработки, в соответствие с командной строкой, разрабатывается **резидентный алгоритм**, который осуществляет выполнение цепочки проектных процедур (рисунок). Резидентный алгоритм является инвариантным относительно состава основных единиц проектирования – технологических переходов, что позволяет вносить новые переходы или удалять ненужные, то есть проводить настройку системы для условий конкретного предприятия.

Для корректной работы резидентного алгоритма формируется **единое поле данных** – основной информационный объект, объединяющий работу всех локальных алгоритмов. Поле данных представляет собой набор строк, каждая из которых предназначена для хранения всей информации о конкретном переходе.

Строка единого поля состоит из ряда зон, каждая из которых предназначена для записи и хранения определенной информации: адреса перехода, командной строки, параметров перехода (размеры, шероховатость и т. д.). Затем следуют зоны, куда записываются результаты отработки проектирующих алгоритмов: длины рабочих ходов, величины подач, скоростей, поправочных коэффициентов, времен. Работа всех проектирующих алгоритмов организуется через это поле данных. Для отработки каждого локального алгоритма берется необходимая исходная информация из соответствующей части строки поля данных, а результаты отработки алгоритма заносятся в предусмотренное место этой же строки поля данных.

После окончания отработки всех локальных алгоритмов командной строки, результаты, записанные в соответствующие места строки единого поля данных, могут быть сохранены в личном архиве технолога, или использованы для формирования выходных документов – маршрутных или операционных карт техпроцесса, нормировочных карт, ведомостей материалов, оснастки и др. [6].



Блок-схема резидентного алгоритма работы САН ТП

Таким образом, современная настраиваемая компьютерная система автоматизированного нормирования технологических процессов должна базироваться на следующих принципах: в основе ее нормативной базы лежит технологический переход; а сама система представляет собой программный комплекс, включающий локальные алгоритмы, решающие отдельные задачи, и инвариантный резидентный алгоритм, управляющий процессом

отработки локальных алгоритмов; последовательность алгоритмов проектирования технологического перехода представлена в форме командной строки, реализующей логику перехода от одного локального алгоритма к другому, что и обеспечивает настраиваемость САН по составу технологических операций и переходов; а хранение всего комплекса данных осуществляется в едином структурированном поле данных.

Библиографический список

1. Гузеев, В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: справочник / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков; под. ред. В.И. Гузеева. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 364 с.

2. Общемашиностроительные нормативы времени на операции, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках, с применением автоматизированной системы технического нормирования (ППП ТАО). (СМ ЭВМ). – М.: ЦБНТ, 1985. – 207 с.

3. Общемашиностроительная система автоматизированного нормирования и проектирования операций, выполняемых на металлорежущих станках (ППП «Норма 1»). Ч. 1. Руководство по эксплуатации. – М.: Экономика, 1990. – 61 с.

4. Сазонова, Н.С. Совершенствование методик нормирования технологических процессов машиностроения на основе системного подхода / Н.С. Сазонова // Сб. науч. трудов I заочн. науч.-техн. конф. «Технологическое обеспечение машиностроительных производств». – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2014. – С. 172–179.

5. Обработка на токарных станках: наладка, режимы резания: справочник / под общ. ред. А.А. Кошина. – Челябинск: Сити-Принт, 2012. – 744 с.

6. Сазонова, Н.С. Настраиваемые компьютерные системы нормирования технологических процессов / Н.С. Сазонова // «Наука ЮурГУ». Материалы 62 науч. конф. секции технич. наук.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т 2. – С. 91–96.

К содержанию

УДК 658.562 + 657.471

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЗАТРАТ НА КАЧЕСТВО ПО КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ

Н.В. Сырейщикова

Разработана комбинированная модель расчета затрат на качество на базе методов Activity Based Costing (ABC) и Life Cycle Costing (LCC), позволяющая учитывать затраты как по видам деятельности при производстве продукта, так и затраты на всех этапах жизненного цикла продукта: производственных, допроизводственных и послепроизводственных для условий завода.

Ключевые слова: модель; расчет затрат; качество; продукция.

Все оказывается дороже, чем планировалось.
Закон Мэрфи

Развитие методов управленческого учета происходит, в первую очередь, под воздействием все более возрастающих требований, предъявляемых к информации со стороны собственников и менеджеров компаний. Перед бухгалтерами–аналитиками все более остро стоят задачи по созданию таких методов управленческого учета, которые бы позволили менеджерам компаний наиболее полно и комплексно реализовать на практике идеи, заложенные в современных управленческих концепциях, стратегиях и теориях управления.

По поручению Президента РФ № ПР-622 п. 2 от 04.04.2000 и Правительства РФ № ИК-П8-18976 от 30.06.2000 Госстандартом России совместно с Минэкономразвития России и Минпромнауки России разработана Концепция национальной политики России в области качества продукции и услуг. Ее целью в экономической сфере является подъем качества отечественной продукции для достижения конкурентоспособности продукции, как на внутренних, так и на внешних рынках и обеспечения на этой основе устойчивого развития экономики страны и интеграции ее в мировую экономику. Учитывая важность задачи повышения качества продукции и необходимость лучшего ее решения, несомненно следует повышать роль расчета затрат на качество выпускаемой продукции.

На кафедре технологии машиностроения ЮУрГУ выполнен проект по разработке модели расчета затрат на качество для условий ОАО Челябинский завод «Теплоприбор» (ОАО «ЧТП»).

В отечественной и зарубежной практике наиболее распространены такие известные методы расчета затрат, как метод стандарт–кост; метод директ-костинг; метод Just-in-time (JIT); метод Activity Based Costing (ABC); метод Life Cycle Costing (LCC); метод функционально-стоимостного ана-

лиза (ФСА); метод Тагучи [1]. Проведенные анализ данных методов, рассмотрение их достоинств и недостатков с привязкой к состоянию дел на заводе, позволили сделать следующие выводы.

Метод «стандарт–кост» – это метод оценки издержек на производство изделия, опирающийся на нормативные издержки в дополнение или вместо регистрации фактических издержек. Достоинства метода заключаются в том, что: на основе установленных стандартов заранее определяется сумма ожидаемых затрат на производство и реализацию изделий; исчисляется себестоимость единицы изделия для определения цен; составляется отчет об ожидаемых доходах будущего года; информация об имеющихся отклонениях используется руководством для принятия им оперативных управленческих решений. Но недостатки значительнее, чем достоинства: метод зависим от внешних условий; метод невозможно применить на всех стадиях жизненного цикла продукции; метод не охватывает качественных показателей деятельности предприятия; отклонения от нормативных затрат, показывающие превышение фактических затрат над нормативными, как правило, слишком агрегированы, но не всегда привязаны к конкретным видам (партиям) продукции [1].

Суть метода «директ–костинг» – в разделении общепроизводственных затрат на переменные и постоянные. Достоинства метода заключаются в том, что он: позволяет устанавливать связи и пропорции между затратами и объемами производства; позволяет руководству заострить внимание на изменении маржинального дохода как по предприятию в целом, так и по различным изделия; обеспечивает возможность быстро переориентировать производство в ответ на меняющиеся условия рынка; изменяет прибыль вследствие изменения переменных расходов, цен реализации и структуры выпускаемой продукции. А недостатки метода в том, что: возникают трудности при разделении затрат на постоянные и переменные; требуется дополнительное распределения условно-постоянных расходов, когда необходимо знать полную себестоимость готовой продукции или незавершенного производства [1].

Метод Just-in-time (JIT) (точно в срок) – метод планирования и управления материально-техническим снабжением, предусматривающий полную его синхронизацию с производственными процессами. Преимуществ у метода значительное количество: упрощается осуществление связей поставщика и потребителя за счет устранения бумажного документооборота; исключается ряд операций из технологической цепи поставок; сокращаются текущие, страховые запасы и запасы в пути, уменьшаются капитальные затраты на содержание складских помещений для запасов материалов и готовой продукции; снижается риск морального устаревания запасов и мн. др. Недостатки метода JIT «точно в срок» количественно менее выражены, но их качественная сторона настолько значительна, что в экономических условиях производства завода их применение ставится под сомнение. В ча-

стности: высокие первоначальные инвестиции и затраты на реализацию метода JIT; возникновение взаимных компромиссов между поставщиком и потребителем по многочисленным аспектам: низкие запасы создают потенциальную возможность при наличии сбоев вызвать остановку всего процесса; не учитываются проблемы сезонности; требуются значительные изменения и владение работниками множеством навыков и мн. др. [2].

Метод ABC (Activity Based Costing) – особая форма функционального анализа затрат FCA (Function Cost Analysis), обеспечивающая современное понимание и более точное описание затрат и отображающая финансовое состояние организации лучше, чем традиционные методы бухгалтерского учета. Достоинством метода является то, что метод ABC позволяет разрабатывать эффективную стратегию выбора изделий и потребителей, а также стратегию совершенствования конструкции изделий и производственного процесса по сравнению с традиционными методами. Недостатки метода следующие: при рассмотрении и определении затрат по видам деятельности не подвергается сомнению необходимость этой деятельности; при использовании метода ABC превалирует платежный, а не стоимостный аспект [3].

Метод LCC (Life Cycle Costing) – управление затратами жизненного цикла. Преимущества метода состоят в следующем: позволяет определить затраты, понесенные при производстве конкретного вида продукции или осуществления вида деятельности на любой момент времени; позволяет более адекватно и обоснованно отразить затраты предприятия на производство нового вида продукции и осуществлять управление ими; предусматривает учет влияния инфляции и применение дисконтирования денежных потоков при принятии решений. Недостатки метода: требует обеспечения точности информации; отличается сложностями в сфере идентификации этапов жизненного цикла; страдает неопределенностью в учете накладных затрат: если их не учитывать [4].

Метод ФСА (функционально-стоимостного анализа) – метод технико-экономического исследования систем, направленный на оптимизацию соотношения между их потребительскими свойствами (качество функций) и затратами на достижения этих свойств. Преимущества метода заключаются в следующем: более точное знание стоимости продукции дает возможность принимать верные стратегические решения; большая ясность в отношении выполняемых функций, за счет которой компаниям удается: уделить больше внимания управленческим функциям и выявить и сократить объем операций, не добавляющих ценности продукции. Недостатки: процесс описания функций может оказаться излишне детализированным, а модель слишком сложна и ее трудно поддерживать; для качественной реализации требуются специальные программные средства; модель часто устаревает в связи с организационными изменениями; реализация часто рассматривается как ненужная «прихоть» финансового менеджмента, не достаточно поддерживается оперативным руководством. Метод наиболее применим для стадий НИР и НИОКР [5].

Метод Тагучи – это метод оценивания качества своей деятельности, основанный на робастном проектировании, на структурировании функции качества, на функции потерь качества (инженеринг качества), в основе которого лежит математическая статистика. В качестве достоинства данного метода можно назвать обеспечение конкурентных преимуществ за счет одновременного улучшения качества и снижения себестоимости продукции. Но, широкое применение метода Тагути в управлении процессами, на базе вероятностно-статистических методов, не всегда корректно в условиях высокой динамики требований к объектам оценивания и отсутствия аналогов [5].

Таким образом, из рассмотренных методов наиболее оптимальными для решения проблем предприятия ОАО «ЧТП», в том числе и организационного характера являются методы ABC (Activity Based Costing) и LCC (Life Cycle Costing). Метод LCC предпочтителен во-первых, потому, что стандартизован, что всегда облегчает освоение требований, тем более закрепленных в национальном стандарте (ГОСТ Р 52380.2. Ч.2), гармонизированным с международным стандартом (на основе стандарта Великобритании BS6143.2 Ч.2). Во-вторых, LCC-анализ позволяет определять затраты при производстве конкретного вида продукции на всех стадиях ее жизненного цикла и на любой момент времени. В-третьих, LCC-анализ в комбинации с перестроенной техникой учета затрат по методу ABC, точно отображающего финансовое состояние предприятия значительно эффективнее традиционных методов бухучета. Также LCC и ABC способствуют разработке функционирующей системы предложений, которые связаны с техникой сбора затрат на качество и с низким вовлечением персонала в данную работу предприятия.

Для реализации цели проекта в условиях ОАО «ЧТП» предложено и принято решение о создании комбинированной модели расчета затрат на качество на основе преобразованных LCC и ABC методов [6]. Суть предложенного и разработанного метода – определение затрат применительно не к деятельности предприятия за ряд периодов, а на производство и продажу конкретного продукта в течение всего его жизненного цикла и в дальнейшем сопоставление с соответствующими доходами; определение плановых затрат по каждой стадии жизненного цикла продукта. Кроме того, для выявления результатов разработки и выведения нового продукта на рынок затраты по этапам жизненного цикла аккумулируются нарастающим итогом. Последовательности процесса учета затрат на качество по разработанной модели, совмещенная с матрицей распределения ответственности по процессу, представлена в табл. 1.

В предлагаемом расчете выделяется три типа работ по способу их участия в выпуске продукции: Unit Level (штучная работа), Batch Level (пакетная работа) и Product Level (продуктовая работа) [7]. Такая классификация затрат (работ) основана на зависимости между поведением затрат и различными производственными событиями: выпуском единицы продукции, выпуском заказа (пакета), производством продукта как такового.

Структура процесса ЖЦП по разработанной модели расчета затрат на качество дана на рис. 1. При этом в предложенной модели включена еще одна важная категория затрат, которая не зависит от производственных событий – затраты – Facility Level (общехозяйственные работы).

Таблица 1

Матрица распределения ответственности на процесс учета затрат на качество

Действие	**О**	**И**	**У**
1	2	3	4
2. Классификация статей затрат и их согласование	ФД	**ЭО**	ОУК
3 Согласование состава затрат на качество с подразделениями участниками	ОУК	**ЭО**	РП
4. Разработка форм, вида и периодичности отчетности подразделений по видам затрат	ОУК	ЭО	РП
5. Рассмотрение состава затрат на качество на Совете по качеству (СК)	СК	ОУК	РП
6. Сбор информации по затратам на качество	ОУК	ЭО	РП
7. Первичный анализ полученных результатов	ОУК	ЭО	
8. Принятие решения о правильности выбранной информации по затратам на качество	ОУК	ЭО	ГД
9. Пересмотр классификации статей затрат на качество и выбор др. (при необходимости)	ФД	ЭО	ОУК
10. Корректировка	ОУК	ЭО	РП
11. Организация внедрения расчета затрат на качество	ОУК	ЭО	РП
12. Проведение анализа затрат на качество	ФД	ОУК	ЭО
13. Упорядочивание и оформление результатов работ	ОУК	ЭО	РП
14. Разработка программы (плана) мероприятий по улучшению качества	ФД	ОУК	ЭО РП
15. Принятие управленческих решений	ГД	ОУК	РП

ГД – генеральный директор;
И – исполняет;
О – ответственный;
ОУК – отдел управления качеством;
РП – руководитель подразделений;
У – участвует;
ФД – финансовый директор;
ЭО – экономический отдел.

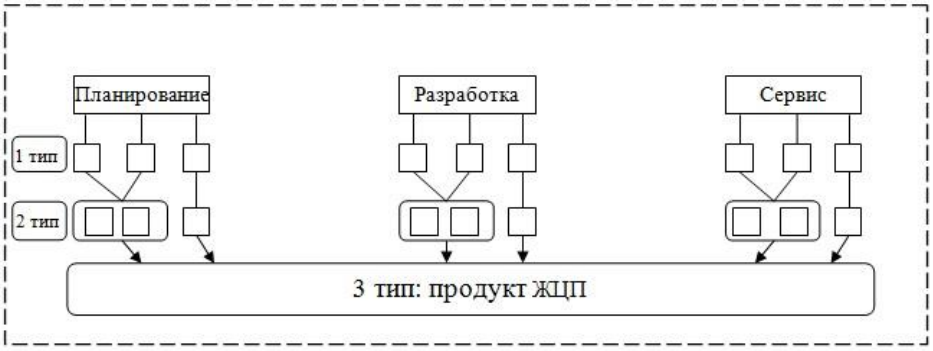


Рис. 1. Структура процесса ЖЦП по комбинированной модели расчета затрат на качество

Первые три категории работ, а, точнее, затраты по ним могут быть прямо отнесены на конкретный продукт. Результаты общехозяйственных работ нельзя точно присвоить тому или иному продукту – это затраты обеспечивающие функционирование предприятия в целом. Расчет затрат по разработанному методу осуществляется по каждой стадии жизненного цикла продукции, и при новых заказах предприятия, может применяться как для единичного производства, так и для серийного, а также применим непосредственно к самому продукту (изделию), затраты которого будет составлять общехозяйственные расходы. Разработанная модель расчета затрат на качество для ЧТП дана на рис. 2. В комбинированной модели расчета затрат на качество структура процесса ЖЦП рассматривается как набор рабочих операций. Работы определяют специфику предприятия. Работы потребляют ресурсы (материалы, информацию, оборудование) и имеют какой-либо результат. Соответственно, и начальной стадией применения данной модели является определение перечня и последовательности работ на предприятии. Это проводится путем разложения сложных рабочих операций на простейшие составляющие, параллельно с расчетом потребления ими ресурсов. Затраты на качество на предприятии ЧТП определялись по стадиям процесса, как они и возникают: при планировании, разработке, производстве и сбыте продукции. В разработанной модели установлено пять групп затрат на качество: затраты на процессы жизненного цикла продукции; затраты на штучный выпуск продукции (единичное производство); затраты на пакетный выпуск продукции (серийное производство); затраты на продукт в целом; затраты на общехозяйственные работы (на функционирование предприятия в целом) [8].

Разработаны следующие показатели оценки процесса расчета затрат на качество. Показатель определения годовых затрат в области качества ($T_{Дост}$), определяемый по формуле 1:

$$T_{Дост} = \frac{П_{выяв}}{П_{общ}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $П_{выяв}$ – число выявленных затрат; $П_{общ}$ – общее число структурных подразделений.

Показатель определения затрат на качество в установленный срок ($T_{срок}$), определяемый по формуле 2:

$$T_{срок} = \frac{N_{вып}}{N_{общ}} \times 100\%, \quad (2)$$

где $N_{вып}$ – число затрат, выявленных в срок; $N_{общ}$ – общее число затрат.

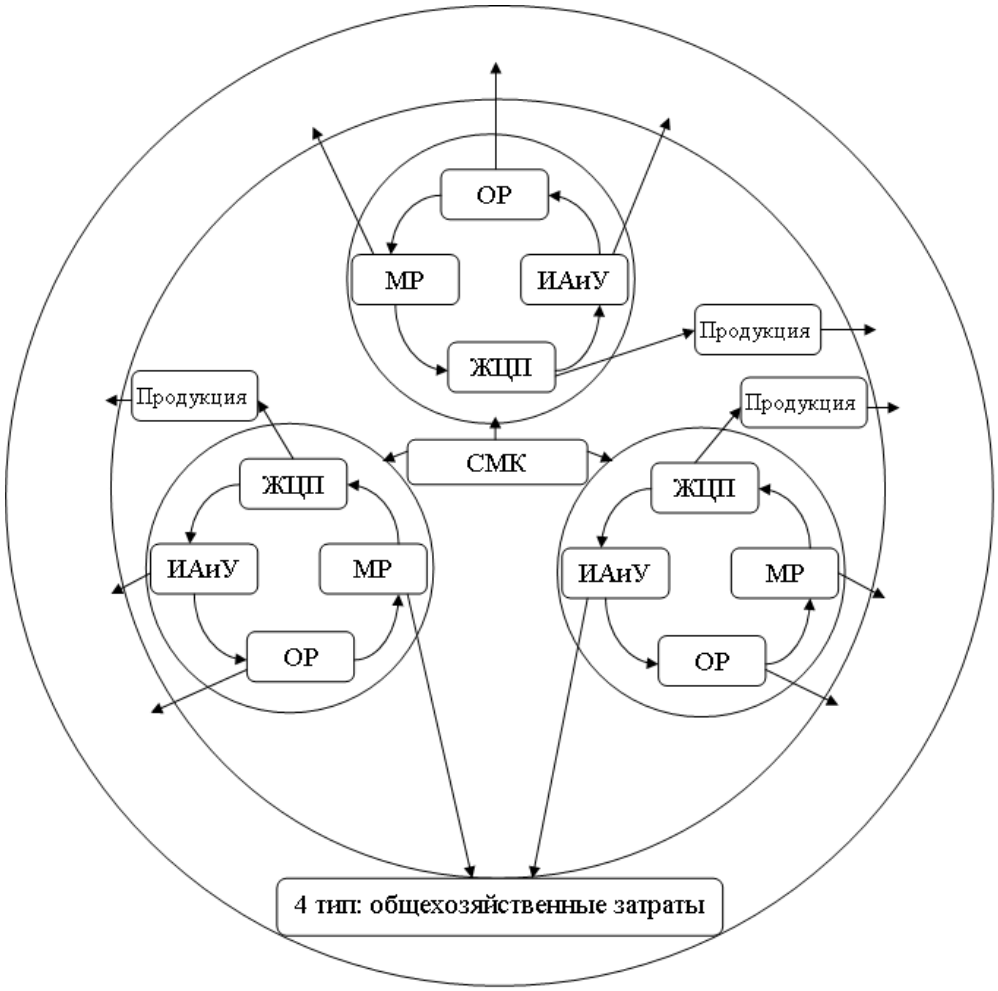


Рис. 2. Схема комбинированной модели расчета затрат на качество

Показатель соблюдения сроков сдачи отчетов структурными подразделениями ($K_{срок}$)., определяемый по формуле 3:

$$K_{срок} = \frac{K_{вып}}{K_{общ}} \times 100\%, \quad (3)$$

где $K_{вып}$ – число отчетов, сданных в срок; $K_{общ}$ – общее число отчетов.

Затраты на качество являются ориентиром для любого предприятия. Для ЧТП они определяют желаемые результаты и способствуют использованию необходимых ресурсов для достижения этих результатов. Освоение результатов проекта позволило повысить стабильность производственных процессов (например, процесса «Закупки» на 7–10 %, значительно уменьшить затраты и рационализировать использование ресурсов на большую часть процессов предприятия, что даст заводу экономический эффект в объеме 250847,46 тыс. руб. за первый год освоения и 1029990,07 тыс. руб. – за шесть лет со сроком окупаемости 4 месяца.

Библиографический список

1. Максимов, Ю.Ю. Многофакторная модель стоимости для учета качества / Ю.Ю. Максимов // Стандарты и качество. – 2009. – № 11. – С. 44–45.

2. Сырейщикова, Н.В. Внедрение системы «JIT» как одного из элементов концепции «Бережливое производство» / Н.В. Сырейщикова, Т.Н. Мерзлова // Научное творчество молодежи – России: сб. науч. тр. VI всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УЛГТУ, 2010. – Ч. 2. – С. 224–227.

3. Сырейщикова, Н.В. Метод АВС для снижения издержек предприятия / Н.В. Сырейщикова, Ю.Ф. Май // Научное творчество молодежи – России: сб. науч. тр. VIII всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УЛГТУ, 2012. – Ч. 2. – С. 108–111.

4. ГОСТ Р 52380.1–2005. Руководство по экономике качества. Ч. 1. Модель затрат на процесс. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2005. – 24 с.

5. Сырейщикова, Н.В. Программа реализации проекта «Освоение функционально-стоимостного анализа (ФСА) в условиях системы менеджмента ОАО «ЧЭРЗ» / Н.В. Сырейщикова, К.Е. Рыжкова // XXXVI11 Гагаринские чтения: сб. науч. тр. междун. молодежн. науч. конф. – М: Изд-во МАТИ, 2012. – Т. 6. – С. 109–110.

6. Сырейщикова, Н.В. Повышение эффективности системы менеджмента качества организации путем применения экономической модели процесса / Н.В. Сырейщикова, А.С. Лукьянчиков // XXXVI1 Гагаринские чтения: сб. науч. тр. междун. молодежн. науч. конф. – М: Изд-во МАТИ, 2011. – Т. 6. – С. 129–132.

7. Сырейщикова, Н.В. Модель расчета затрат на качество / Н.В. Сырейщикова, Д.А. Филина // Научное творчество молодежи – России: сб. науч. тр. VIII всерос. науч.-техн. конф. – Екатеринбург: Изд-во УЛГТУ, 2012. – Ч. 2. – С. 156–159.

8. Сырейщикова, Н.В. Расчет затрат на качество для совершенствования системы менеджмента предприятия / Н.В. Сырейщикова, Д.С. Благинин, О.В. Ковалерова // Тинчуринские чтения: сб. науч. тр. VIII междун. молодежн. науч. конф. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2013. – С. 4–5.

К содержанию

УДК 338.465.2 + 658.64

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ SERVQUAL ДЛЯ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЯ, ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА ПОТРЕБИТЕЛЯ

Н.В. Сырейщикова

По результатам анализа деятельности предприятия и проведенных исследований усовершенствован процесс оказания жилищно-коммунальных услуг в ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ» путем освоения методики SERVQUAL, разработаны оценочные показатели процесса, их аналитические модели и критерии результативности, разработан стандарт организации «Оценка удовлетворенности потребителей», достигнута экономия за счет уменьшения доли должников по оплате предоставленных услуг, привлечения новых клиентов, исключения случаев перехода клиентов к конкурентам.

Ключевые слова: адаптивная система; методика servqual; процесс; удовлетворенность потребителей.

Прибыль компании строго пропорциональна уровню удовлетворенности потребителя.
Филипп Кросби

Жилищно-коммунальное хозяйство (ЖКХ) является важнейшей сферой социально-экономической структуры общества. Качество ее функционирования на базе равноправного существования в данной сфере всех форм собственности позволяет создать поле качества экономических отношений собственников услуг ЖКХ. А качество в любой организации, оказывающей услуги, начинается с услаждения потребителя. Термин «услаждение» как нельзя точно оценивает то состояние потребителя, к которому надо стремиться. Деминг Генри Нива писал: «Потребитель должен получить то, что он хочет, когда он этого хочет и в той форме, в какой он этого хочет. Компания должна стремиться не только удовлетворить ожидания потребителя – это самое малое, что ей необходимо сделать – компания должна стремиться к тому, чтобы заставить потребителя восторгаться, предоставляя ему даже больше того, что он мог ожидать» [1].

Все большая унификация услуг привела к тому, что индивидуальный подход к потребителю выступил как инструмент выделения среди массы конкурентов, а его удовлетворенность стала условием успешной деятельности организаций, специализирующихся на оказании услуг. Степень изученности проблемы оценки уровня удовлетворенности потребителя высока, но она в недостаточной степени проработана в отношении управляющих компаний отрасли ЖКХ. Повысить эффективность работы предприятий ЖКХ возможно через повышение уровня удовлетворенности потребителей качеством предоставляемых услуг, т. е. через выстраивание менеджмента предприятия по типу адаптивной системы.

Предприятие с адаптивной системой менеджмента – это предприятие, устроенное в соответствии со спросом, «управляется потребителями», поскольку учет их нужд и потребностей занимает в ней центральное место. Управление подобным предприятие осуществляется с точки зрения клиентов. Взаимоотношения с ними занимают центральное место во всех операциях. Непрерывное изучение природы и характера потребительского спроса определяет способы управления предприятием и анализа его деятельности. Система менеджмента адаптивного предприятия, ориентированная на потребителей обладает следующими характеристиками:

– ясные цели, пронизывающие все предприятие, формулируемые с точки зрения потребителей, известные и понятные каждому сотруднику, а применяемые показатели и методы усиливают это понимание, которое служит универсальным средством осмысления всех принимаемых решений и задач и нацеливает людей на поиск наилучших способов достижения целей компании;

– наличие взаимосвязанных и поддерживающих друг друга стратегических и оперативных планов; преобладающей чертой поведения персонала становится не поддержание собственного статуса, а стремление выстраивать отношения с потребителями; превращение компании в обучающуюся, ориентированную на потребителя систему, которая требует свободы и отказа от командного стиля руководства [2].

Актуальность НИР, выполненной на кафедре технологии машиностроения ЮУрГУ обусловлена тем, что проблема состояния и развития ЖКХ является одной из наиболее острых проблем нашего общества. Клиенты управляющих компаний абсолютно не удовлетворены качеством жилищно-коммунальных услуг. НИР выполнена для ООО управляющей компании (УК) «СОЗВЕЗДИЕ», которая на сегодняшний день работает в условиях конкуренции, поэтому, для удержания клиентов и привлечения новых, организации необходимо провести оценку удовлетворенности потребителей, последующий анализ и предпринять корректирующие и предупреждающие действия.

Под оценкой удовлетворенности потребителей в НИР понималась степень расхождения между ожиданиями потребителей и их восприятием услуг. Удовлетворенность потребителей – это их сознание, которое может подтверждаться или не подтверждаться реальной ситуацией, причем известно, что формируются установки (отношение) у людей быстро, а меняются медленно. Анализ удовлетворенности потребителей – это оценка того, как потребители воспринимают деятельность исполнителя услуг. Измерение удовлетворенности потребителей позволит предприятию: точно оп-ределить требования потребителей и их относительную важность; понять, как потребители воспринимают предприятие–исполнитель и соответствует ли её деятельность их требованиям; определить приоритеты для

улучшения – те области, в которых улучшение характеристик услуг даст наиболь-шее увеличение удовлетворенности потребителей; добиться роста прибыли за счет лояльности потребителей [3].

Для определения степени проблемности сферы жилищно-коммунального управления (ЖКУ) проведен опрос клиентов ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ». Анализ, выполненный по оценкам респондентов, позволил выявить наиболее благополучную сфера ЖКУ – это газоснабжение. Из анализа оценок клиентов установлено, что у 68 % респондентов перебоев с газом нет совсем, у 14 % опрошенных перебои с газом бывают 1–2 раза за год, у 3 % – почти каждый месяц и у 1 % – чаще. Значительно хуже обстоят дела с электроснабжением: у 39 % опрошенных отсутствуют перебои, у 38 % перебои случаются 1–2 раза в год; у 16 % – почти каждый месяц, у 5 % – чаще. Выявлена самая проблемная сфера – это водоснабжение: не сталкивались с перебоями воды только 28 % опрошенных, 38 % испытывают трудности 1–2 раза в год, 19 % – почти каждый месяц, 10 % – чаще. Данные показатели представлены на рис. 1.

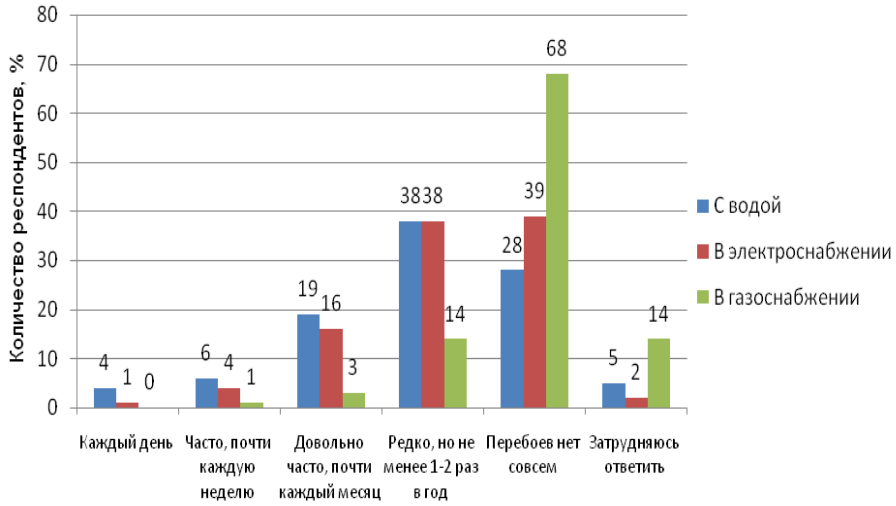


Рис. 1. Частота возникновения перебоев водоснабжения, электроснабжения, газоснабжения

Анализ, выполненный по опросам респондентов, позволил также выяснить, что быстрее всего устраняются перебои с электричеством, а именно, 88 % тех, кому приходилось сталкиваться с такими проблемами, отмечают, что на их ликвидацию уходит не более суток. Перебои с газоснабжением за столь короткий срок устраняются в домах пострадавших, составляющих несколько меньшую долю – 80 %. Больше всего времени занимает ликвидация проблем с водоснабжением: перебои с водой устраняются за сутки и менее того в домах 65-ти процентов опрошенных, сталкивавшихся с этими проблемами. Соответственно, более одного дня проблемы с электричеством устраняются в 12 % случаев, с газом – в 20 %, с водой – в 36 % случаев (рис. 2).

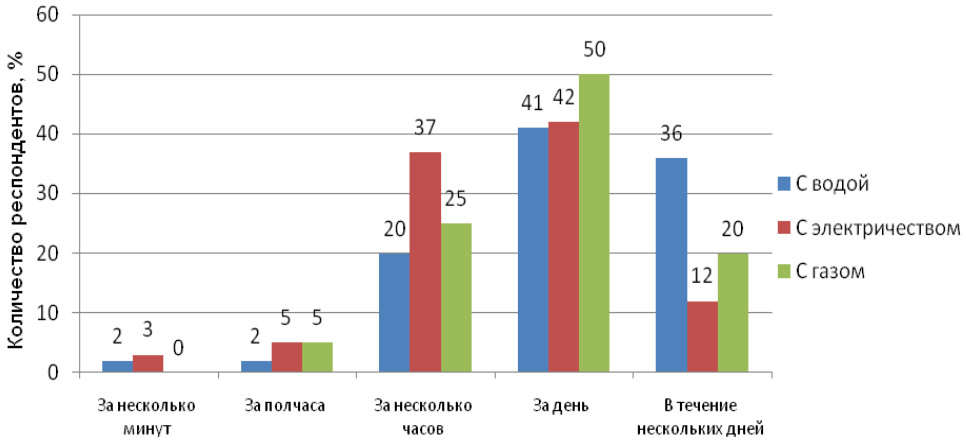


Рис. 2. Мнение населения по поводу быстроты решения проблем

Результаты анализа состояния дел в ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ», а также вышеприведенного исследования мнений клиентов позволили выявить следующие проблемы предприятия: непонимание сотрудниками управляющей компании значимости созданной на предприятии системы менеджмента качества (СМК); высокий уровень дебиторской задолженности; большой процент повторных заявок (жалоб) и, как следствие, – затраты на исправление ошибок; большая доля жилого фонда управляющей компании (60 %) – это старые дома, требующие наиболее затратных и частых капитальных ремонтов; большая текучесть кадров, особенно в обслуживающих организациях управляющей компании из-за низкой заработной платы и тяжелых условий труда (большого количества стрессовых ситуаций при выполнении работ); низкий уровень удовлетворенности клиентов ЖКУ по показателям: качество обслуживания, оперативность выполнения заявок, вежливость обслуживающего персонала; цены на платные услуги. Было установлено, что самой существенной (и наиболее актуальной) является последняя проблема, связанная с низким уровнем удовлетворенности клиентов организации. Для решения данной проблемы необходима оценка удовлетворенности потребителей и определения основных критериев оказания услуг с последующим фокусированием усилий на наиболее важных факторах, определяющих уровень удовлетворенности.

Проведенный анализ отечественных и зарубежных технологий и решений в области оценки удовлетворенности потребителей (рис. 3) [3] и нижеприведенных, таких как:

– концепции создания привлекательного качества, по методике которой выявляются характеристики товара / услуги, разделяемые на «должные», «одномерные» и «привлекательные», соответствующие потребностям по классификации Кано: «ожидаемые», «желаемые» и «восхищающие»;

– индексов удовлетворенности потребителей ACSI и EPSI для выявления характеристик товара / услуги, создающих восхищение потребителя и

для получения количественной информации об уровне удовлетворенности клиентов, выраженной в баллах и процентах, по сведениям, полученным непосредственно от клиента;

– конджойнт-анализа – статистического метода, применяемого для исследования предпочтений потребителей, определяющего наилучшую конфигурацию новых или уже существующих продуктов, критерии услуг;

– методики Райхельда, основанной на постановке клиенту одного вопроса «По шкале от нуля до 10 какова вероятность того что Вы порекомендуете нас другу или коллеге?» и позволяющей предсказать возможность как повторной покупки, так и рекомендаций;

– шкалы Лайкерта – инструмента для абстрактной оценки удовлетворенности потребителей путем присвоения оценки или назначения веса каждой строке в матрице, для получения суммарной оценки для каждого из респондентов;

– модели GAP – метода стратегического анализа, с помощью которого измеряется удовлетворенность потребителей сервисом путем анализа разрывов между ожиданиями и фактически оказанным уровнем услуг, выделяются возможные несоответствия при предоставлении услуги, осуществляется поиск шагов для достижения заданной цели;

– зоны толерантности – инструмента для определения минимально приемлемого для потребителя качества услуги, используемого в комплексе с методикой SERVQUAL;

– методики SERVQUAL – оценки удовлетворенности путем непрерывного измерения и улучшения качества услуг с помощью индекса качества SQI, отражающего соотношение воспринятого и ожидаемого качества услуги [4] позволил установить следующее.

Рис. 3. Классификация методов анализа удовлетворенности потребителей

Для ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ» наиболее приемлема последняя методика, т. к. позволяет решить проблему низкой удовлетворенности потребителей, уменьшить количество жалоб, путем выявления наиболее важных для клиентов параметров услуги и фокусирования на них усилий сотрудников компании, а также требует наименьших временных затрат на внедрение. Для внедрения результатов выполненной НИР на ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ» разработан стандарт организации «Оценка удовлетворенности потребителей», в соответствии с которым все показатели качества услуги разделяются на показатели материальности, надежности, отзывчивости, компетентности и эмпатии (табл. 1).

Таблица 1

Критерии оценки воспринимаемого качества услуги

Параметр качества	Используемые критерии оценки
Материальность, осязаемость	Имеются современные инструменты, оборудование и оргтехника; интерьеры помещений находятся в отличном состоянии; работники приятной наружности и опрятны
Ответственность, надежность	Выполняются обещания оказать услугу к назначенному времени; если у клиентов случаются проблемы, то искренне пытаются их решить; надежная репутация; услуги предоставляются клиентам аккуратно и в срок; сотрудники дисциплинированны и избегают ошибок и неточностей в своих операциях
Отзывчивость	Сотрудники оказывают услуги быстро и оперативно, всегда помогают клиентам в решении их проблем, быстро реагируют на просьбы клиентов; между клиентами и сотрудниками существует атмосфера доверия и взаимопонимания
Компетентность, убедительность	Клиенты чувствуют себя безопасно; сотрудники вежливы в отношениях с клиентами; руководство оказывает всяческую поддержку сотрудникам для эффективного обслуживания клиентов
Эмпатия, сопереживание	Компания проявляет индивидуальный подход к своим клиентам; сотрудники компании проявляют личное участие в решении проблем клиентов; сотрудники компании знают потребности своих клиентов; сотрудники компании ориентируются на проблемы клиентов; часы работы компании удобны для всех клиентов

Для оценки удовлетворенности применен метод анкетирования, причем форма анкеты позволяет определить не только удовлетворенность по определенным показателям качества, но и важность каждого показателя для потребителя. Анкеты помещаются на сайте организации, а также распределяются в обслуживающие организации в бумажном виде. Разработанный

процесс «Оценка удовлетворенности потребителей» визуализирован диаграммой последовательности (рис. 4) и описан паспортом с определение основных элементов: владельцев, поставщиков, потребителей, входов, выходов, ресурсов, управления, контролируемых параметров и их количественных критериев, методов оценки показателей. Разработаны следующие оценочные показатели процесса и их критерии (табл. 2): показатель воспринимаемого качества параметра услуги (Q_i) , позволяющий оценить качество отдельно по стимулам и в общем по всем критериям – не менее 0 (если показатель равен нулю, то важность параметра качества услуги равна удовлетворенности); средняя взвешенная оценка (C_O) позволяющая оценить удовлетворенность по каждому критерию – не менее 0,4; уровень удовлетворенности (U) по важным критериям – не менее 50 %; доля важных критериев (K_N) – не менее 60. Даны аналитические модели разработанных показателей, отраженные в табл. 2. Пример сравнения оценки важности и удовлетворенности потребителя в виде лепестковой диаграммы представлен на рис. 5 [5].

В результате внедрения результатов НИР ожидается достижение следующих факторов экономии: привлечения новых клиентов посредством хорошей репутации; уменьшения доли должников по оплате за предостав ленные жилищно-коммунальные услуги; исключения случаев перехода клиентов к конкурентам; выявление особо важных параметров услуг для клиентов и фокусирование внимания работников на качестве этих параметров. Срок окупаемости НИР составит 10 месяцев. Результаты проекта имеют практическую ценность, апробированы и внедрены на ООО УК «СОЗВЕЗДИЕ».

Таблица 2

Показатели и критерии процесса
«Оценка удовлетворенности потребителей»

Контролируемые параметры процесса	**Показатель**	**Критерий**
Качество услуги	$Q_i = \sum_i^k (P_i - E_i)$	Не менее 0
Средняя взвешенная оценка удовлетворенности	$CBB = \sum_{i=1}^{n} \frac{OУ_i \cdot BK_i}{N}$	Не менее 0,5
Уровень удовлетворенности по важным (от 4 баллов) критериям	$U = \frac{CBO_V}{N_V} \cdot 100\%$	Не менее 60%
Доля важных критериев	$K_N = \frac{N_V}{N} \cdot 100\%$	Не менее 60%

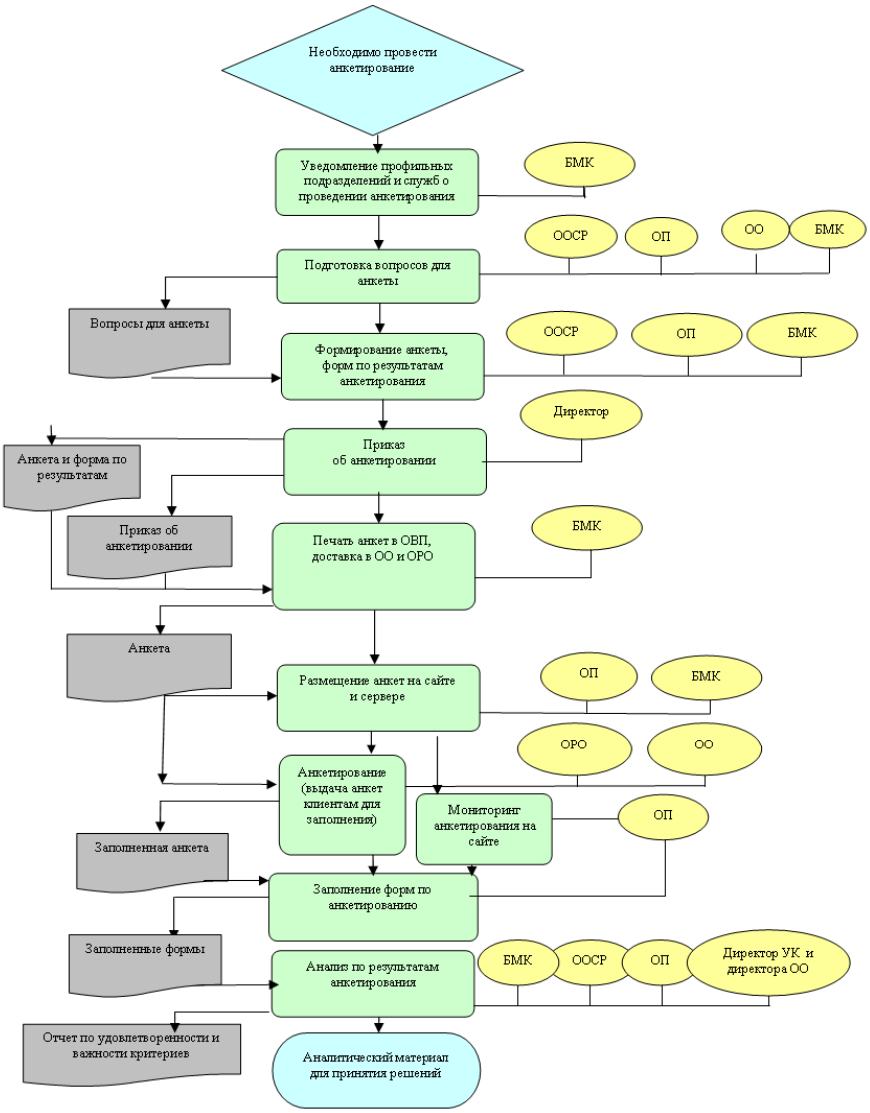


Рис. 4. Блок-схема процесса «Оценка удовлетворенности потребителей»

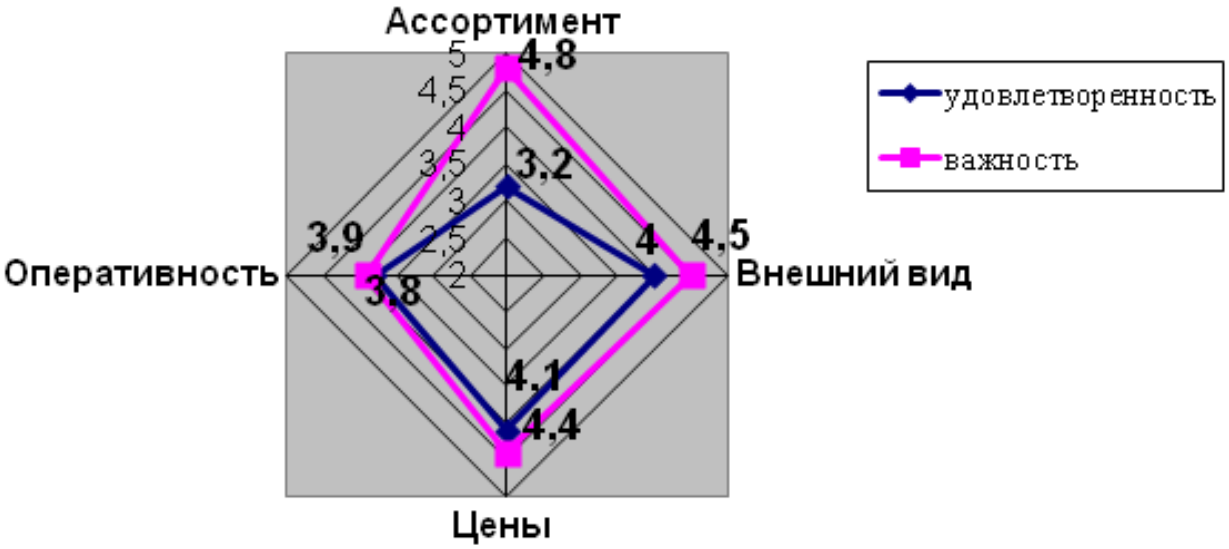


Рис. 5. Сравнение индексов критериев важности и удовлетворенности

Библиографический список

1. Седлон, Дж. Свобода от приказов и контроля. Путь к эффективному сервису / Дж. Седлон; пер. с англ. А.Л. Раскина, под науч. ред. Ю.П. Адлера. – М. РИА «Стандарты и качество», 2009. – 232 с.
2. Чумакова, М. Методика измерения качества услуг SERVQUAL / М. Чумакова // Менеджмент в России и за рубежом. – 2009. – № 10. – С. 24–27.
3. Дубровская, Е.С. Методы оценки удовлетворенности потребителей / Е.С. Дубровская // Методы менеджмента качества. – 2006. – № 4. – С. 26–30.
4. Беседина, Е.И. Оценка удовлетворенности потребителей деревообрабатывающего комбината / Е.И. Беседина, Н.В. Сырейщикова // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России: матер. VIII Всерос. науч.-техн. конф. УГЛТУ. – Екатеринбург, 2012. – Ч. 2. – С. 20–23.
5. Сырейщикова, Н.В. Оценка удовлетворенности потребителей по методике SERVQUAL / Н.В. Сырейщикова // Управление качеством: сб. науч. тр. 13-ой междун. науч.-практ. конф. – М.: ПРОБЕЛ-2000, МАТИ, 2014. – С. 254–257.

К содержанию

УДК 621.914.1.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ СТРУЖКИ ПРИ РОТАЦИОННОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

С.Д. Сметанин, В.Г. Шаламов, О.К. Нургужин

Выполнено моделирование элементной стружки, формируемой зубчатым режущим элементом ротационной фрезы. Адекватность математической модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Модель образования элемента стружки дает возможность прогнозирования и управления размерами и формой получаемых частиц.

Ключевые слова: ротационное фрезерование, элементная стружка, моделирование, системный подход.

Распространенные в настоящее время промышленные методы измельчения металлов резанием позволяют получать относительно крупные частицы, которые непригодны для процессов порошковой металлургии и подлежат дальнейшему измельчению. Поэтому большинство механических методов получают стружку требуемых размеров в несколько стадий. Кроме того, данными методами невозможно получать порошки труднообрабатываемых и легковоспламеняющихся металлов. В то же время механические способы позволяют обеспечить химическую чистоту материала, отсутствие окисных и других пленок на продуктах измельчения.

Одним из высокоэффективных методов обработки материалов можно считать ротационное резание [1]. Отличительной особенностью ротационного резания по сравнению с традиционным является использование специального инструмента, режущий элемент которого в процессе обработки вращается вокруг своей оси. На рис. 1 показан режущий блок ротационной фрезы, который устанавливается на корпус. В процессе работы помимо вращения корпуса совместно со шпинделем станка, режущие элементы вращаются вокруг оси режущего блока.

Исследование механизма формообразования элементной стружки при ротационном резании предполагает создание в рамках системного подхода эмерджентной модели данного процесса и его теоретическое и экспериментальное изучение. Наибольший практический интерес представляет решение контрольной задачи [2], т. е. определение формы и размеров получаемой стружки в зависимости от конструктивно-геометрических параметров режущего инструмента, его установки относительно обрабатываемой заготовки и элементов режима резания.

Теоретически задача получения требуемой формы и размеров элементной стружки (для непосредственного использования или как полуфабриката) различных конструкционных материалов решается на основе математического моделирования процесса формообразования. Моделирование широко применяется в технике и при обработке резанием в частности [3]. Подход к определению размеров получаемой стружки на основании моделирования траектории перемещения режущей кромки инструмента, применительно к ротационному резанию был сделан для точения и фрезерования [4–6]. В результате обоснован механизм формирования элемента стружки и определены математические зависимости для определения его размеров. Для подтверждения адекватности полученных зависимостей проводились экспериментальные исследования процесса стружкообразования на специальном материале заготовки (изотактический полипропилен, обладающий хорошей обрабатываемостью и малой деформацией срезаемого слоя). Проводилась мгновенная остановка процесса резания и полученный элемент стружки сопоставлялся с его компьютерной имитацией (рис. 1). Модель дает возможность прогнозирования и управления размерами и формой частиц элементной стружки.

Существуют разные подходы к оценке размеров стружки. Так, в соответствии с [7], выделяют: сечение срезаемого слоя (фигура, образованная при рассечении слоя материала заготовки, отделяемого лезвием за один цикл главного движения резания основной плоскостью), толщина срезаемого слоя (длина нормали к поверхности резания, проведенной через рассматриваемую точку режущей кромки, ограниченная сечением срезаемого слоя) и ширина срезаемого слоя (длина стороны сечения срезаемого слоя, образованной поверхностью резания). Однако данные параметры не в полной мере учитывают характер формообразования стружки при ротационном резании.

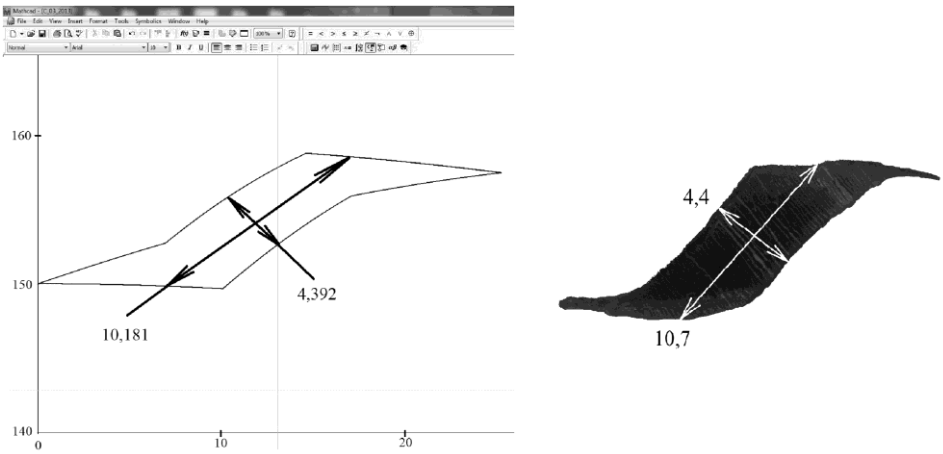


Рис. 1. Модель элемента стружки (слева)
и экспериментально полученный элемент (справа)

Теоретическая форма срезаемого элемента стружки в двух проекциях при ротационном фрезеровании имеет вид, представленный на рис. 2. Можно выделить шесть размеров, определяющих форму стружки: *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*. Можно предположить, что существенное влияние на размеры получаемой стружки оказывают: угол наклона главной режущей кромки λ, глубина резания *t* и расположение заготовки относительно оси вращения фрезы, характеризуемое боковым смещением торца заготовки относительно оси вращения фрезы. Рассмотрим влияние данных параметров в следующем диапазоне изменения: угол λ от 20 до 70°, глубина t от 0,5 до 5 мм, боковое смешение от 25 до 125 мм. Графики изменения размеров представлены на рис. 3.

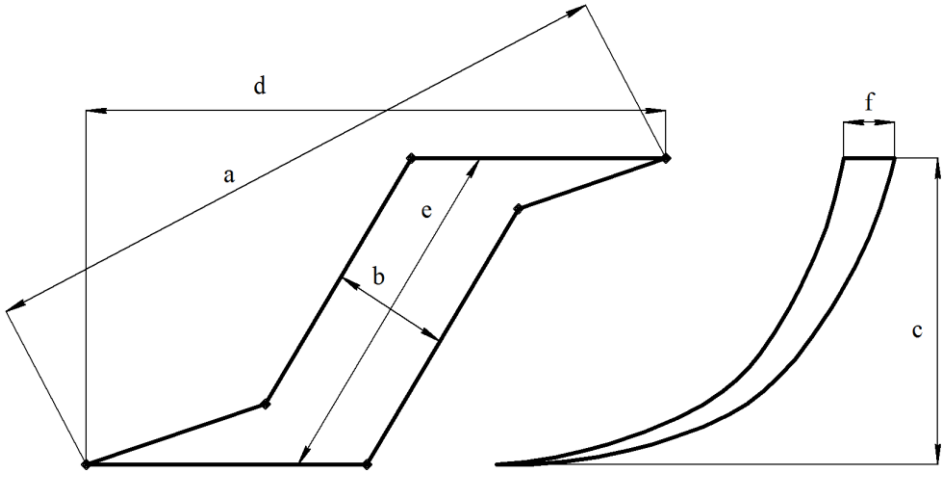


Рис. 2. Теоретическая форма элемента стружки

Влияние изменяемых параметров на размеры элемента стружки существенно различается. Как видно из графиков, характер влияния λ и *t* на изменение размеров одинаков: почти линейно возрастают *a*, *c*, *d*, *e* и практически не изменяются *b* и *f*. Интенсивно изменяются размеры *a* и *e*,

причем изменение глубины резания влияет более существенно. Влияние бокового смещения на размеры *a* и *e* не выявлено, а изменение размеров *c* и *d* носит экстремальный характер.

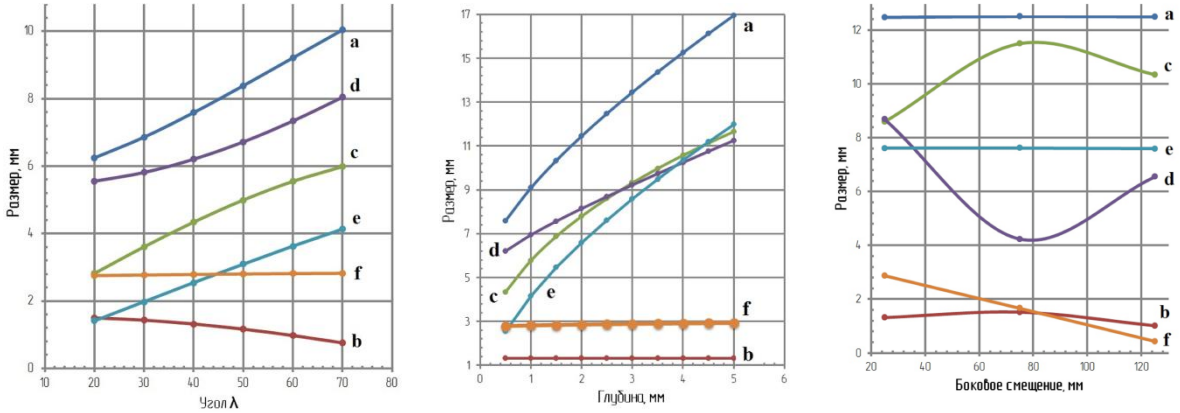


Рис. 3. Графики изменения размеров стружки при различном угле λ, глубине *t* и боковом смещении

Таким образом, разработанная математическая модель образования элемента стружки дает возможность прогнозирования и управления размерами и формой получаемых частиц.

Библиографический список

1. Коновалов, Е.Г. Прогрессивные схемы ротационного резания металлов / Е.Г. Коновалов, В.А. Сидоренко, А.В. Соусь. – Мн.: Изд-во Наука и техника, 1972. – 272 с.

2. Шаламов, В.Г. Системный подход к ротационному резанию при получении порошковых материалов / В.Г. Шаламов, С.Д. Сметанин // Металлообработка. – 2013. – № 2. – С. 23–26.

3. Силич, А.А. Геометрические параметры и модель разрушений режущего лезвия инструмента / А.А. Силич и др. // Известия вузов. Нефть и газ. – 2012. – № 2. – С. 108–113.

4. Шаламов, В.Г. Получение порошковых материалов ротационным резанием / В.Г. Шаламов, Д.А. Савельев, С.Д. Сметанин // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 56–58.

5. Shalamov, V.G. Producing powder by rotary grinding / V.G. Shalamov, S.D. Smetanin, D.A. Savel’ev // Russian Engineering Research. – 2013. – Т. 33. – № 3. – С. 133–135.

6. Сметанин, С.Д. Оптимизация процесса получения порошковых материалов ротационным фрезерованием / С.Д. Сметанин, В.Г. Шаламов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 12. – С. 4–11.

7. ГОСТ 25762–83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий.

К содержанию

УДК 621.833:004.4 + 621.9.02:621.833

РАЗРАБОТКА ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС И ЗУБОРЕЗНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ

И.В. Сурков

Приведено описание разработанного оборудования, методического и программного обеспечения для координатных измерений геометрических параметров зубчатых колес и зуборезных инструментов. Рассмотрены вопросы практического применения методики объемной калибровки координатно-измерительных машин, приборов и систем с последующей программной компенсацией выявленных систематических погрешностей, а так же особенности размерно-точностного анализа результатов координатных измерений.

Ключевые слова: координатно-измерительные машины и системы, программное обеспечение для координатных измерений, контроль зубчатых колес и зуборезных инструментов.

1. Введение

В большинстве современных изделий, выпускаемых предприятиями машиностроения и приборостроения, используются зубчатые передачи, которые в конструктивном, технологическом и метрологическом отношении являются одними из наиболее сложных элементов машин и механизмов. Рост требований к качеству зубчатых колес и передач приводит к непрерывному совершенствованию и усложнению методов их проектирования, технологий изготовления, средств и методов контроля.

При контроле зубчатых колес помимо универсальных и специальных средств измерения типовых геометрических параметров (размеров элементов: диаметра и отклонения от цилиндричности базового отверстия, шеек под подшипники вала–шестерни; расстояний между торцами; отклонений от перпендикулярности или параллельности и т. д.) применяют большое число специализированных приборов контроля параметров, характеризующих эксплуатационные показатели зубчатого колеса или зацепления [1].

На российских предприятиях машиностроения и приборостроения сегодня применяется широкая номенклатура средств измерения геометрических параметров зубчатых колес. Это в основном ручные не автоматизированные приборы традиционной конструкции, выпущенные советскими инструментальными заводами (в т. ч. Челябинским инструментальным заводом (ЧИЗ)) в 60–80-х годах прошлого века. Эти приборы морально устарели и в результате длительной эксплуатации потеряли свои точностные характеристики. Учитывая некоторый здоровый «консерватизм» присущий

большинству работников метрологических и технологических подразделений предприятий ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») продолжает выпускать большинство моделей зубоизмерительных приборов традиционной номенклатуры ЧИЗ (биениемер Б-10М, межцентромеры МЦ-160, МЦ-400, кинематомер 5094). Но большой проблемой является низкий уровень автоматизации и узкая специализация этих приборов, т. е. для каждого контролируемого параметра необходимо применять свое средство измерения [2]. Это неудобно и потребителю (необходимо иметь полный комплект разнообразных приборов) и производителю (широкая номенклатура конструкций приборов, выпускаемых неритмично и единичными экземплярами).

Анализ современных тенденций развития машиностроительного комплекса показал, что обеспечение качества выпускаемой продукции в современном многономенклатурном производстве невозможно без гибких систем автоматизированного контроля. На российских предприятиях необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные машины (КИМ), приборы и системы (КИС) различных компоновок и типоразмеров. Положенный в основу работу КИМ и КИС координатный метод измерения является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе зубчатых колёс различного профиля).

2. Принципы координатных измерений

Принципиальная основа координатного метода измерения заключается в том, что любую поверхность или профиль можно представить состоящей из бесконечного числа отдельных точек и если известно положение в пространстве какого-то ограниченного числа этих точек (массив точек), т. е. определены их координаты, то по соответствующим формулам (алгоритмам) можно рассчитать размеры этих поверхностей (профилей) и отклонения формы, а также определить расположение поверхностей (профилей) в пространстве и между собой (координатные размеры и отклонения расположения) [3].

Можно выделить два взаимосвязанных технических комплекса, необходимых для выполнения координатных измерений и оказывающих влияние на их точность:

1. Аппаратная часть – это комплекс из оборудования, на основе интегрированных мехатронных модулей (механические узлы, электронные компоненты, программное обеспечение низшего уровня), измерительных устройств, калибровочной и вспомогательной оснастки, которые обеспечивают получение массивов значений координат отдельных точек, принадлежащих контролируемым поверхностям детали. В машиностроении широко

используют КИМ и КИС различных типов с контактными и/или оптическими головками, а также контактные и лазерные измерительные головки для решения технологических задач при обработке на станках с ЧПУ. Качество проектных решений, точность изготовления и сборки измерительного оборудования напрямую влияет на величину погрешности определения координат измеряемых точек.

2. Программно-методическая часть – это, прежде всего, базовый комплекс информационно-методических материалов (стандарты, технические условия, эксплуатационная документация, методики выполнения измерений), интеллектуальных ресурсов (уровень подготовки, практический опыт и навыки инженеров-метрологов и операторов КИМ и КИС), математических моделей и алгоритмов для управления измерительным оборудованием, анализа измеренных данных и расчета заданных линейно-угловых параметров. Для эффективной реализации каждой составляющей базовой части комплекса применяют специализированное метрологическое программное обеспечение (ПО) для координатных измерений.

3. Разработка и производство оборудования для координатных измерений

В соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерений в машиностроении» (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») выполняется разработка новой серии многофункциональных измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями, по сути специализированных КИС. На стадиях проектирования, изготовления и испытаний новых приборов проводятся исследовательские работы и выполняются мероприятия для снижения нормируемой погрешности координатных измерений (рис. 1).

Для проведения предварительного анализа кинематики приборов, особенностей закрепления различных конструкций и типоразмеров измеряемых деталей специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» выполняют компьютерное моделирование новых вариантов структур и компоновок измерительных систем. Широко используются принципы сквозного компьютерного проектирования (CALS технологии). Сокращение времени разработки и снижение себестоимости изготовления новых измерительных приборов достигается за счет обеспечения модульности конструкций механических узлов, электронных блоков и программного обеспечения. Унификация модулей позволяет получить широкую гамму измерительных приборов и систем различного назначения и компоновки из ограниченного числа функциональных модулей и узлов. Используются модули и узлы собственной разработки, комплектующие ведущих мировых производителей (Renishaw, Siemens, INA и др.), а также модернизированные узлы существующих кон-

струкций приборов. Замена механических модулей мехатронными позволяет значительно сократить длину кинематических, функциональных и размерных цепей, повысить точность и степень автоматизации процессов контроля.

Часть традиционных зубоизмерительных приборов за счет установки мехатронных модулей, применения систем компьютерного управления и специализированного метрологического программного обеспечения (ПО) преобразована в современные информационно-измерительные комплексы и системы.

В 2008 г. изготовлена и внесена в Госреестр средств измерения трехкоординатная многофункциональная измерительная система НИИК-484 (для контроля параметров зубчатых колес, червячных фрез, долбяков). Управление системой, перемещение узлов осуществляет оператор, съём измерительной информации, расчеты, оформление протоколов автоматизированы за счет использования ПО «ТЕХНОкоорд».

Для реализации полностью автоматизированного цикла координатных измерений высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями в 2008–2013 гг. выполнен большой объём НИОКР, изготовлены и испытаны несколько прототипов новой четырехкоординатной измерительной системы с компьютерным управлением НИИК-483. КИС НИИК-483 (рис. 2) является многофункциональной и гибкой базовой платформой для создания целого комплекса координатно-измерительных приборов, машин и систем. Например, по заказу ОАО «НИИизмерения» были разработаны и изготовлены механические части КИС для контроля червячных фрез (БВ-5139) и долбяков (БВ-5140). Результаты испытаний учтены в новой усовершенствованной серии КИС НИИК-485. В зависимости от требований заказчиков для сборки готовой системы используются типовые функциональные модули, узлы и электронные блоки собственной разработки, комплектующие ведущих мировых производителей (энкодеры и измерительные головки Renishaw, привода и контроллеры Siemens, Bosch Rexroth , линейные направляющие и подшипники INA и др.). Разработанное ПО «ТЕХНОкоорд-4К» с дополнительными программными модулями обеспечивает выполнение автоматизированных циклов контроля геометрических параметров насадных и валковых зубчатых колес (рис. 3), резьбовых калибров, червячных фрез и других высокоточных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями.

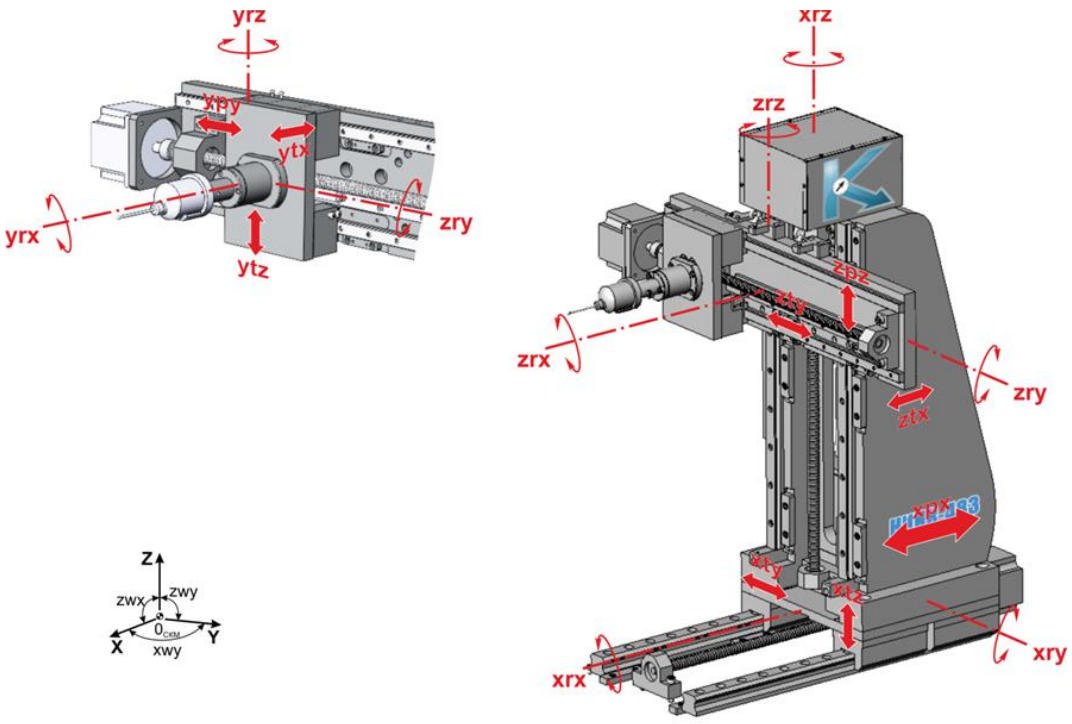


Рис. 1. Расчетная схема калибровки геометрических погрешностей специализированной КИС НИИК-483

4. Разработка программного обеспечения для координатных измерений

Новые и модернизированные приборы оснащаются специализированным метрологическим ПО собственной разработки, которое включает в себя не только модули для получения, обработки и анализа измерительной информации, но и удобные графические интерфейсы пользователя, настраиваемые на конкретную операцию измерения, а также средства для формирования подробных отчетов, для статистической обработки результатов измерения. Разработанное программистами института ПО для КИМ «ТЕХНОкоорд» (Технология Координатных Измерений) обеспечивает работу с трехмерными моделями измеряемых деталей в соответствии со стандартами CALS-технологий. В зависимости от функционального назначения КИМ или КИС в базовое ПО «ТЕХНОкоорд» включаются дополнительные программные модули: «ТЕХНОкоорд-ОптИС» (работа с «системой технического зрения»), «ТЕХНОкоорд-Эвольвента» (измерение зубчатых колес), «ТЕХНОкоорд-4К» (управление четырехкоординатными измерительными системами с поворотным столом (типа НИИК-483)) и др.

В ПО «ТЕХНОкоорд» разработанные математические модели и расчетные алгоритмы реализованы в виде модуля размерно-точностного анализа результатов координатных измерений [4].

Рис. 2. Четырехкоординатная измерительная система НИИК-483

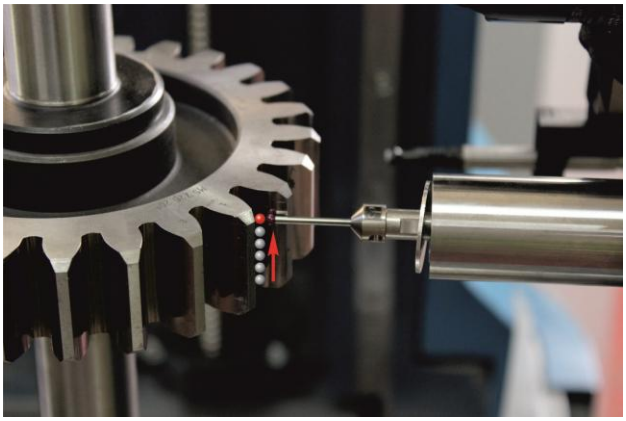


Рис. 3. Контроль зубчатого колеса на КИС НИИК-483

По координатам измеренных точек, принадлежащих реальным геометрическим элементам детали (первичная информация о реальной геометрии), рассчитывается ассоциированная (числовая) модель детали в виде комплекта заменяющих элементов, упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат. Для анализа действительных размеров, отклонений формы и расположения элементов контролируемой детали разработаны комплекты типовых размерно-точностных моделей. Наглядные трехмерные структурно-геометрические схемы облегчают выбор адекватной модели и снижают вероятность ошибок.

ПО «ТЕХНОкоорд» дает возможность пользователю создавать нестандартные размерно-точностные модели, например, применять для расчета параметров заменяющей поверхности другие критерии аппроксимации или использовать для одной поверхности несколько критериев одновременно.

Для комплексного анализа контролируемой детали из набора упорядоченно расположенных в обобщенной системе координат стандартных и пользовательских структурно-геометрических схем создается размерно-точностная модель детали. Кроме простейших функций технического контроля (разбраковка или сортировка по группам), эта модель может эффективно применяться для целей управления технологическими операциями обработки деталей или сборки изделий, например, для анализа операционных размеров и припусков, сборочных размеров, расчета фактических натягов и зазоров.

5. Обеспечение точности координатных измерений

Повышение точности и достоверности координатных измерений заданных размеров, отклонений формы и расположения поверхностей контролируемых деталей и инструментов в основном обеспечивается за счет использования КИМ и КИС с минимально возможной нормируемой погрешностью определения координат измеряемых точек, а также за счет правильного выбора стратегии измерений (количество точек и их расположение на измеряемой поверхности), адекватности применяемых математических моделей и точности расчетных алгоритмов.

Обеспечение необходимой точности аппаратной части выпускаемых приборов и измерительных систем достигается как за счет качества изготовления и сборки, так и с помощью разработанных процедур объёмной калибровки рабочего пространства [5]. С помощью лазерного интерферометра Renishaw ML10 для каждого узла линейных координатных перемещений определяются систематические погрешности позиционирования и остаточная криволинейность направляющих (см. рис. 1). Отклонения от перпендикулярности осей рассчитываются при выполнении «диагонального» теста или при калибровке с помощью специальной наладки для лазерного интерферометра. Для калибровки узлов угловых координатных перемещений (поворотные столы, делительные головки) также применяется специальная наладка для лазерного интерферометра. Хорошие результаты калибровки (при значительно меньшей стоимости) обеспечивают аттестованные эталоны, разработанные и изготовленные специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Полученные значения систематической погрешности в исследованных точках рабочего пространства при линейных и угловых движениях узлов прибора интерполируются на весь диапазон перемещений и используются для внесения поправок в величину измеренных координат точек.

В ПО «ТЕХНОкоорд» интегрированы модули для выполнения процессов калибровки аппаратной части, учета результатов калибровки при определении и коррекции координат измеренных точек.

Кроме того, для уменьшения влияния методических и расчетных погрешностей на точность координатных измерений проводятся исследова-

ния, разрабатываются новые алгоритмы и программные модули для ПО «ТЕХНОкоорд», обеспечивающие проектирование оптимальных стратегий измерения и расчет геометрических (линейно-угловых) параметров типовых деталей и инструментов (в т. ч. с поверхностями сложного профиля).

Библиографический список

1. Тайц, Б.А. Точность и контроль зубчатых колес / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 369 с.

2. Сурков, И.В. Метрологическое обеспечение процесса контроля зубчатых колес / И.В. Сурков, Н.В. Сырейщикова // Измерения: состояние, перспективы развития // Тезисы докладов международной научно-практической конференции. Т. 1. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 225–227.

3. Surkov, I.V. Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / I.V. Surkov // Measurement Techniques: Volume 54, Issue 7 (2011), Page 758–763.

4. Сурков, И.В. Разработка математического обеспечения для размерно-точностного анализа результатов координатных измерений / И.В. Сурков, А.И. Буртовая // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – С. 101–104.

5. Сурков, И.В. Разработка методики объемной калибровки координатно-измерительных машин, приборов и систем / И.В. Сурков, А.С. Курочкин, В.А. Плюснин // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 187–190.

К содержанию

УДК 621.992

ГЕОМЕТРИЯ И ПРОЧНОСТЬ ОТВЕРСТИЙ ПОД РЕЗЬБУ, ОБРАЗОВАННЫХ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПУАНСОНОМ, В ТОНКОЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВКАХ

П.В. Шаламов

Рассмотрен способ формообразования отверстий под резьбу в тонколистовых заготовках толщиной менее 2 мм вращающимся пуансоном. Определены основные входные и выходные параметры операции, определён коэффициент трения и разработана методика по использованию данного способа в производстве.

Ключевые слова: тонколистовая заготовка, пуансон, прочность, коэффициент трения, параметры операции.

В машиностроении широко применяются изделия из тонколистовых заготовок, предусматривающие резьбовое крепление к ним различных комплектующих деталей. Для обеспечения работоспособности резьбового соединения необходима длина свинчивания, достаточная для образования не менее трёх витков резьбы. Существуют различные методы для повышения длины свинчивания. Такие, как гибка листа, приварка втулок, метод пластического деформирования в закрытых штампах и другие. Однако, большинство существующих методов недостаточно технологичны. Требуют применения специального оборудования и приспособлений. Наиболее рациональным представляется метод пластического деформирования заготовок вращающимся пуансоном. Процесс проходит при нагреве заготовки за счёт сил трения между инструментом и заготовкой. Весь деформируемый металл идёт на образование верхней и нижней отбортовки отверстия, тем самым обеспечивая необходимую длину свинчивания и безотходность процесса [1]. Для определения основных параметров процесса (осевой силы, температуры, времени протекания процесса) и геометрических размеров образуемых отбортовок отверстий была разработана экспериментальная установка [2] на базе вертикально-сверлильного станка с рычажной системой, обеспечивающей осевое перемещение инструмента под заданной нагрузкой и плавное регулирование осевой силы в широком диапазоне. По характеру образования отверстия и изменению осевой силы установлены 4 стадии протекания процесса (рис. 1).

На первой стадии происходит нагрев заготовки за счёт сил трения, внедрение пуансона в заготовку, пластическое течение металла в верхнюю и нижнюю части заготовки с началом образования отбортовок отверстия. На второй стадии процесса происходит колебание осевой силы вследствие разрушения нижней плоскости заготовки. На третьей стадии осевая сила несколько снижается, что связано с изменением момента рычажной системы. На четвёртой стадии, в момент выхода конуса пуансона из сформиро-

ванного отверстия, осевая сила снижается до нуля. В заготовках меньшей толщины, количество стадий уменьшается в связи с сокращением времени протекания процесса второй и третий стадий. Подобное формообразование отбортовок наблюдается при использовании пуансонов других диаметров.

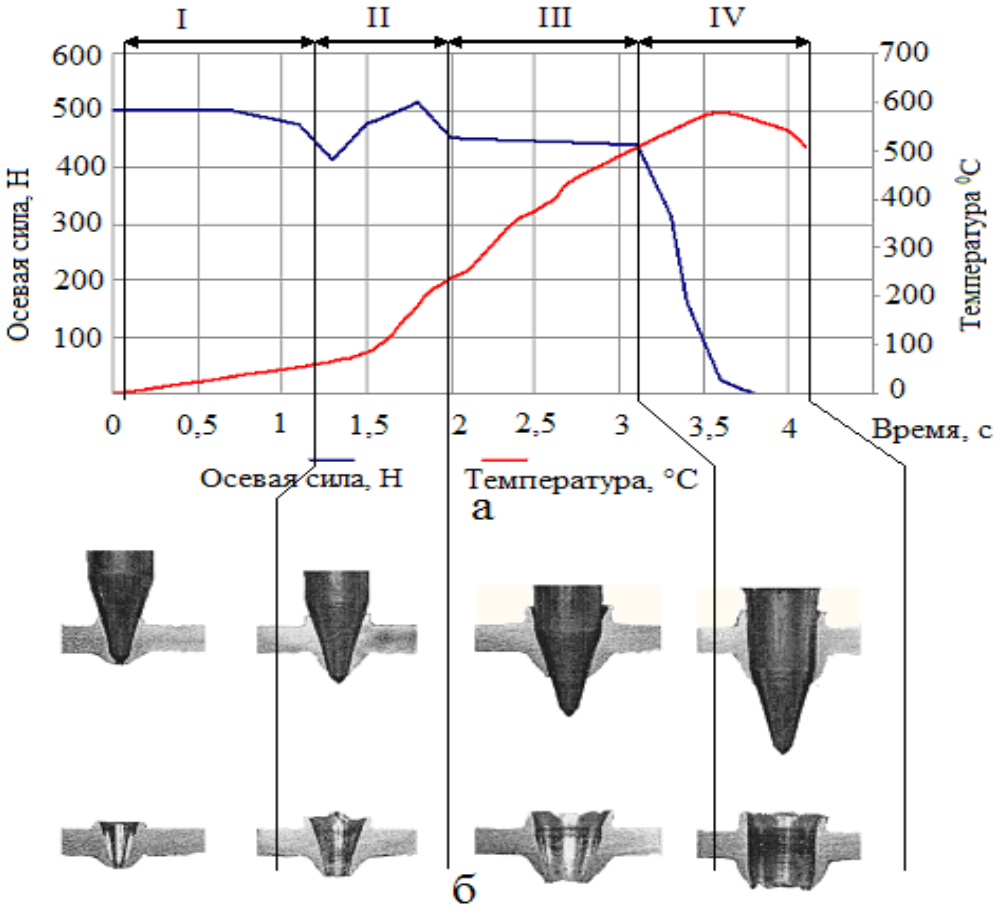


Рис. 1. Стадии формообразования отверстия : а – изменение осевой силы P_{oc} и температуры T °С в точке измерения, во время процесса t; б – I-II-III-IV – стадии процесса (диаметр пуансона d = 5 мм; толщина заготовки δ = 2,0 мм)

На рис. 2 представлены размеры и фотографии внешнего вида отверстий с отбортовками. Видно, что в заготовке толщиной 0,8 мм верхняя отбортовка не образуется, а весь деформируемый металл идёт на образование только нижней отбортовки. Установлено, что профиль наружных поверхностей отбортовок представляет параболу, а общая их форма – усечённый параболоид.

Для определения взаимосвязи основных входных и выходных параметров операции производился ряд экспериментов. Исследования показали, что при уменьшении осевой силы увеличивается температура и время протекания процесса, при этом геометрические параметры отбортовок практически остаются неизменными. В табл. 1 представлены экспериментальные результаты полученных параметров отбортовок и температура формообразования в зависимости от осевой силы и толщины заготовки.

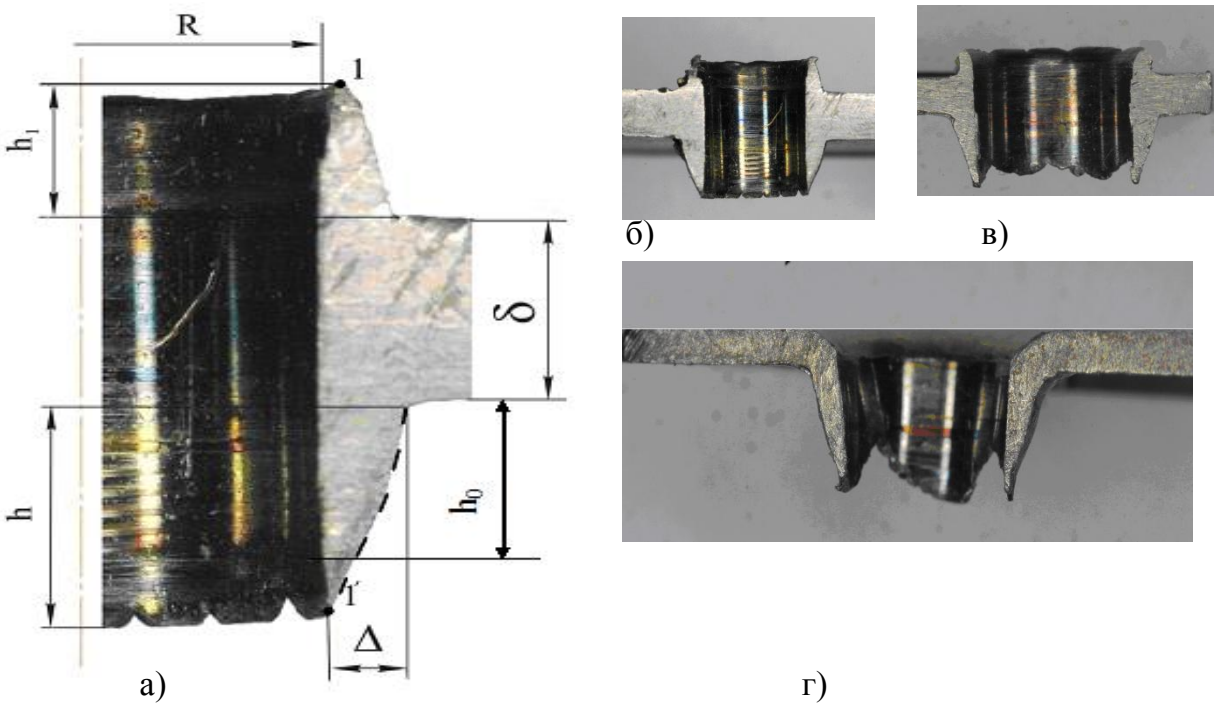


Рис. 2. Отверстия с отбортовками, полученные в результате экспериментов: а – геометрические параметры (δ – толщина заготовки, мм; R – радиус отверстия, мм; h и h_1 – высота нижней и верхней отбортовок, мм; h_0 – высота нижней отбортовки отверстия до разрыва поверхности, мм; Δ – толщина основания отбортовки, мм; l и l' – точки измерения температур; --- – расчётная парабола); б, в, г – внешний вид отверстий с отбортовками образованных пуансоном диаметром 5 мм в заготовках толщиной 2,0; 1,5 и 0,8 мм соответственно

Таблица 1

Влияние осевой силы и толщины заготовки
на технологические параметры отверстий с отбортовками

Исходные данные		Экспериментальные результаты				
δ, мм	P_{oc}, Н	T, °С	t, с	h, мм	Δ, мм	h_1, мм
2	440	577	3,8	2,6	1,0	1,3
	350	610	8,0	2,7	1,0	1,1
	180	620	14,7	2,7	1,1	1,1
1,5	320	400	3,5	2,5	0,9	1,0
	200	410	7,0	2,4	1,0	1,0
	125	450	11,0	2,5	1,0	1,0
0,8	170	300	4,5	2,5	0,8	–
	100	340	6,8	2,7	0,8	–
	80	340	9,1	2,7	0,7	–

Приведённые результаты свидетельствуют и том, что осевая сила, температура и время протекания процесса взаимосвязаны и практически не влияют на геометрические параметры отбортовок. При изменении частоты

вращения пуансона геометрические размеры отбортовок также не изменяются. Данное положение может служить основой для управления процессом.

С учётом того, что отбортовки имеют вид усечённых параболоидов, а весь металл отверстия идёт на образование отбортовок, можно определить высоту верхней и нижней отбортовок отверстия в зависимости от доли металла b, участвующей в образовании нижней отбортовки [3]. Получены уравнения для определения высоты верхней h_1 и нижней h отбортовки:

$$h = \frac{2bR^2\delta}{(2R+\Delta)\Delta}; \quad (1)$$

$$h_1 = \frac{2(1-b)R^2\delta}{(2R+\Delta)\Delta}. \quad (2)$$

Длина свинчивания определяется эффективной высотой отбортовки, зависящей от шага резьбы и толщины основания отбортовки (рис. 3), и толщиной заготовки:

$$L_{св} = h[1-\frac{(0{,}866P)^2}{\Delta^2}] + \delta, \quad (3)$$

где P – шаг резьбы.

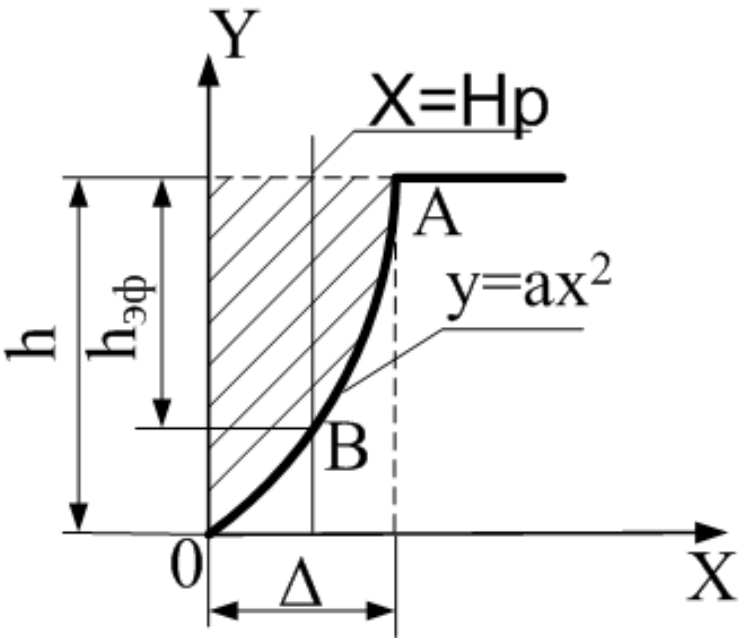


Рис. 3. Схема расчета эффективной высоты нижней отбортовки отверстия: $x = H_р$ – высота метрической резьбы; $h_{эф}$ – эффективная высота, определяющая длину свинчивания, мм; a – коэффициент параболы ($a = \frac{h}{\Delta^2}$)

Зная длину свинчивания можно определить силу, вызывающую срез витков резьбы [4] по известной формуле:

$$F_{ср} = \pi d L_{св} K_г K_м \tau_{ср}, \quad (4)$$

где d – внутренний диаметр резьбы гайки; $K_г$ – коэффициент полноты резьбы, характеризующий длину контакта (перекрытие) витков резьбы болта и гайки; $K_м$ – коэффициент, учитывающий неравномерность деформирования витков по высоте гайки при наличии пластической деформации; $\tau_{ср}$ – предел прочности на срез.

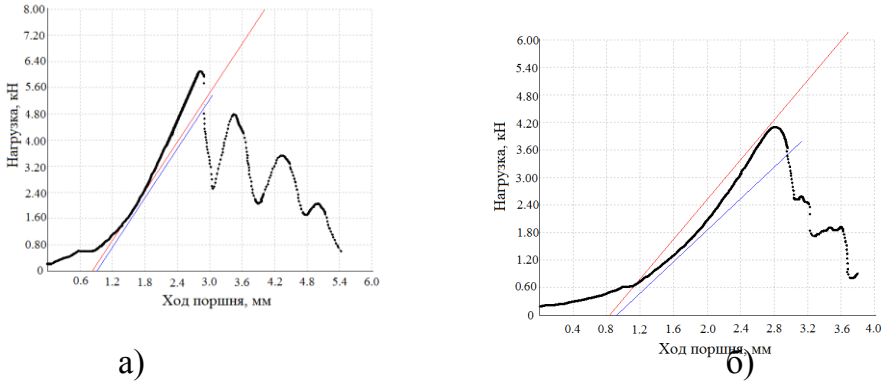
В табл. 2 приведены результаты расчётов силы, вызывающей срез витков резьбы и экспериментальные данные по замерам прочности резьбового соединения на срез, проведённые на прессе Tinius Olsen H100KU при скорости нагружения 1,5 мм/мин. Там же приведены геометрические размеры отбортовок и режимные параметры процесса.

Таблица 2

Влияние геометрических размеров отбортовок отверстий на расчётную и фактическую прочность резьбы на срез

δ, мм	$P_{ос}$, Н	T, °С	h, мм	Δ, мм	h_1, мм	$L_{св}$, мм	Кол-во витков	$F_р$, Н	$F_ф$, Н
2,0	440	540	2,5	0,9	1,0	3,7	4,7	5780	9400
1,5	220	400	2,4	0,8	0,8	2,3	2,9	4330	6300
1,0	150	350	2,4	0,7	–	1,1	1,4	1880	2270
0,8	120	300	2,4	0,7	–	0,9	1,1	1600	2210
Примечание: диаметр пуансона d = 4,2 мм, материал пуансона ВК6, резьба М5х0,8, материал заготовки 08 кп, материал болта Ст3, $\tau_{ср}$ = 200 МПа, $K_г$ = 0,8, $K_м$ = 0,75									

Из табл. 2 следует, что фактическая прочность резьбового соединения больше расчётной, что связано с упрочнением материала заготовки в зоне формообразования отверстия. Для проверки данного предположения были проведены эксперименты по определению прочности резьбового соединения на срез в заготовках толщиной 2,0 мм с отверстиями, образованными различными методами. В одном случае отверстие под резьбу было образовано вращающимся пуансоном с последующим срезом верхней и нижней отбортовок, а в другом было образовано сверлом. Результаты проведения экспериментов приведены на графиках (рис. 4). Из графиков видно, что сила, вызывающая срез витков резьбы в отверстии, образованным вращающимся пуансоном, составляет 6100 Н, а в отверстии образованным сверлением – 4110 Н, что подтверждает предположение о упрочнении металла при деформации.



а) б)

Рис. 4. Диаграмма разрушения резьбового соединения М5х0,8 в образце толщиной 2,0 мм, отверстие в котором образовано: а – вращающимся пуансоном с последующим срезом отбортовок; б – сверлением

Проведённые эксперименты показали, что в зоне деформации, прилегающей к внутренней поверхности отверстия, происходит упрочнение металла. Зона упрочнения отверстия в заготовке толщиной 2,0 мм составляет 1,5 мм, а отверстия, образованного в заготовке толщиной 0,8 мм – 1,0 мм. Следовательно, резьба в отверстиях находится в зоне упрочнения, что объясняет более высокие значения нагрузки разрушения витков резьбы в проведённых экспериментах, по сравнению с расчётными значениями.

На основании проведённых исследований предлагается применять в производстве вертикально-сверлильные станки с рычажной системой, обеспечивающие свободное перемещение пуансона при заданной нагрузке. В качестве инструмента предлагается применять пуансоны трёх типов с углом конуса 20°. Материал пуансона – твёрдый сплав ВК6.

Для разработки операции формообразования отверстий с отбортовками необходимы данные об осевой силе, времени процесса, а также о высоте и толщине основания стенки нижней отбортовки, приведённые на рис. 5–7.

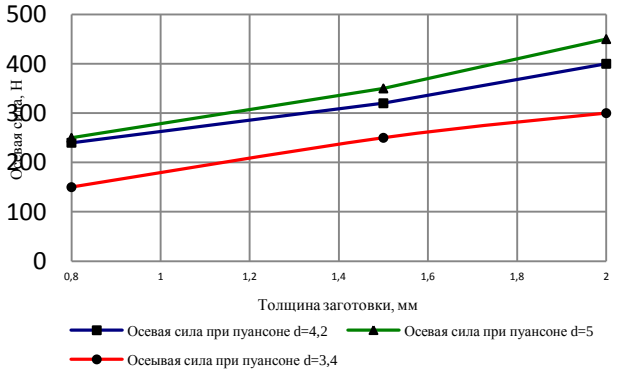


Рис. 5. Зависимость осевой силы от толщины заготовки

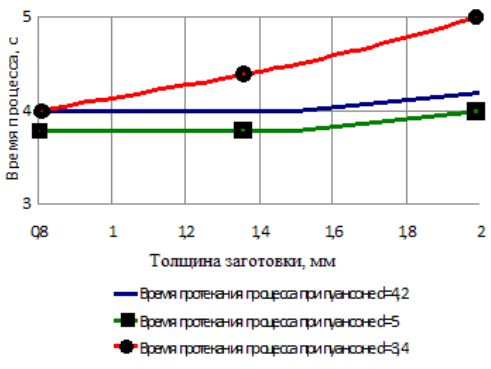
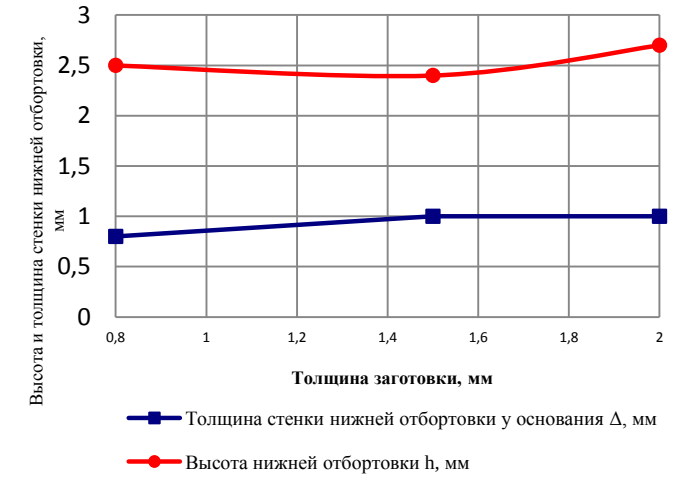
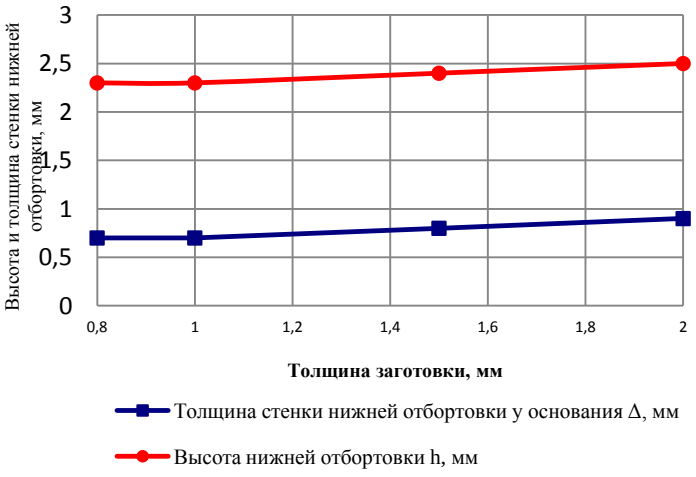


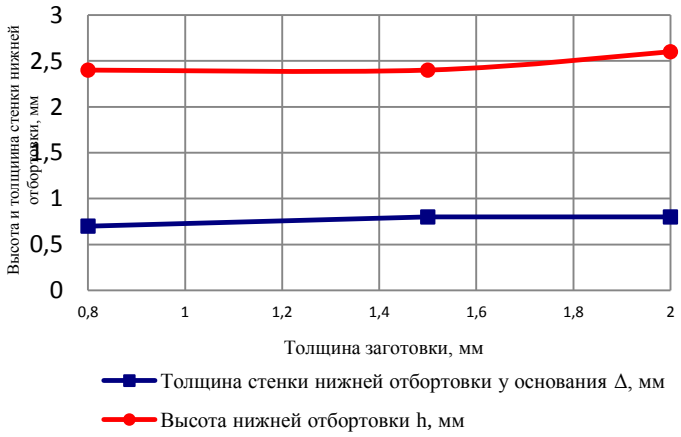
Рис. 6. Зависимость времени протекания процесса от толщины заготовки и диаметра пуансона



а)



б)



в)

Рис. 7. Зависимость толщины и высоты нижней отбортовки от толщины заготовки при пуансоне: а – d = 5 мм; б – d = 4,2 мм; в – d = 3,4 мм

Для назначения параметров операции и расчёта прочности резьбового соединения предлагается следующая методика:

1. Диаметр пуансона выбирается в зависимости от номинального диаметра резьбы по методике, принятой для выбора свёрл.

2. По графикам (см. рис. 5), в зависимости от толщины заготовки и диаметра пуансона, выбирается осевая сила для процесса формообразования отверстия с отбортовками.

3. В зависимости от толщины заготовки и диаметра пуансона определяется время процесса (см. рис. 6).

4. По графикам (см. рис. 7) определяется высота h и толщина основания Δ нижней отбортовки отверстия, в зависимости от толщины заготовки и диаметра пуансона.

5. По известным значениям h и Δ определяется длина свинчивания (формула (3)) с учётом выбранного типа резьбы.

6. Рассчитывается предельная прочность резьбового соединения на срез по формуле (4) с учётом выбранной резьбы, длины свинчивания и коэффициентов, входящих в формулу. В случае равенства толщины основания отбортовки и высоты профиля резьбы выбирается резьба с меньшим шагом.

Библиографический список

1. Шаламов, П.В. Формирование отверстий вращающимся пуансоном в листовой заготовке / П.В. Шаламов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2011. – № 18. – С. 81–84.

2. Установка для формообразования отверстий с отбортовками в тонколистовых заготовках. Патент на полезную модель № 116388 от 27.05 2012 Приоритет 12.12.2011 г. / В.И. Гузеев, П.В. Шаламов // ФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ).

3. Гузеев, В.И. Определение параметров отбортовки и длины свинчивания при изготовлении отверстия вращающимся пуансоном в тонколистовом металле / В.И. Гузеев, П.В. Шаламов, С.Е. Радийчук // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2010. – № 2. – С. 25–29.

4. Гузеев, В.И. Прочность резьбового соединения на срез в отверстиях с отбортовками, образованных вращающимся пуансоном в тонколистовых заготовках / В.И. Гузеев, П.В. Шаламов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 19. – № 12(271). – С. 209–213.

К содержанию

УДК 621.914.1.01

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА УСАДКИ СТРУЖКИ ПРИ РОТАЦИОННОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ

В.Г. Шаламов, С.Д. Сметанин, А.И. Голосников

Проанализированы существующие способы определения коэффициента усадки при резании. Предложен подход к нахождению коэффициента усадки стружки при ротационном фрезеровании. Выявлено различие в усадке стружки, формируемой при работе гладкого и зубчатого режущих элементов.

Ключевые слова: ротационное фрезерование, стружка, коэффициент усадки, формообразование.

Значительное место в создании прогрессивных современных материалов занимает порошковая металлургия. Динамичное развитие порошковой металлургии объясняется тем, что она позволяет преодолевать технологические трудности изготовления изделий из тугоплавких металлов, создавать материалы с особыми, часто уникальными составами, структурой и свойствами, иногда вообще недостижимыми при применении других методов производства, либо с обычными физическими и механическими свойствами, но при существенно лучших экономических показателях [1].

Для производства изделий методами порошковой металлургии требуются армирующие волокна и порошки в качестве наполнителей, к которым предъявляются требования по физико-химическим и механическим свойствам. В зависимости от набора размеров частиц порошки характеризуются фракционным или гранулометрическим составом. Для обеспечения оптимальной плотности засыпки и прессуемости порошков нужно соблюсти определенное соотношение разных частиц [2].

Порошки можно получать различными методами [3], одним из которых является резание. Особенностью данного процесса является то, что при преобразовании слоя материала в стружку вследствие пластических деформаций форма и размеры последней требуют определения. Поэтому для теоретического определения размеров получаемой стружки при моделировании процесса необходим учет указанного явления.

Пластические деформации срезаемого слоя материала при превращении его в стружку внешне проявляются в том, что длина стружки получается короче пути, пройденного режущей кромкой по обработанной поверхности. Толщина и ширина стружки при резании получается больше толщины и ширины срезаемого слоя. Соотношения этих параметров называются коэффициентами усадки в направлениях, соответственно, толщины и ширины [4]. Для всех обрабатываемых материалов, исключая титановые сплавы, коэффициенты усадки стружки больше единицы. Коэффициенты усадки стружки являются количественной оценкой степени пластической

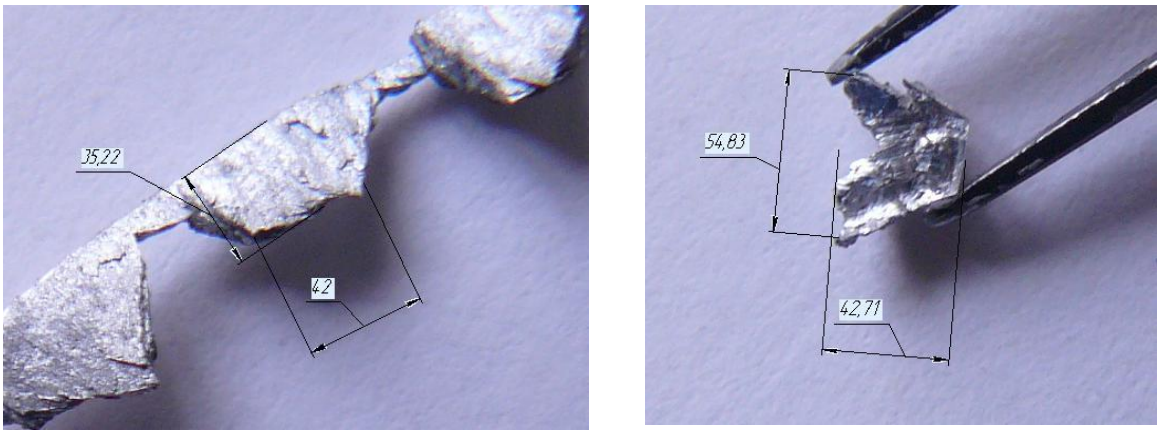
деформации обрабатываемого материала при резании. Чем меньше усадка стружки, тем с меньшими пластическими деформациями протекает процесс резания и более благоприятные условия для стружкообразования. На коэффициент усадки стружки оказывают влияние вид операции, геометрические элементы режущей части инструмента, элементы режима резания, обрабатываемый и инструментальный материалы и СОТС. При традиционной обработке резанием разброс коэффициента усадки для разных материалов составляет 1,1…5.

Определение усадки при традиционном фрезеровании может осуществляться измерением длины полученной стружки с помощью гибкой нити, весовым методом, путем нанесения рисок на заготовке и др. способами [5]. При получении элементной стружки ротационным фрезерованием [6] коэффициент усадки рационально получать другим методом. Учитывая сложность траектории движения точек режущих кромок можно осуществить прямое сравнение размеров полученной стружки с их расчетными значениями.

Процесс ротационного фрезерования при получении элементной стружки осуществляется по групповой схеме резания двумя режущими элементами – гладким и зубчатым. На поверхности зубчатого элемента выполнены режущие зубья, которые, перемещаясь по определённой траектории, последовательно врезаются в материал заготовки и формируют частицу порошка, оставляя на поверхности часть не срезанного материала. Гладкий режущий элемент, контактируя с заготовкой непрерывно всей режущей кромкой, срезает материал, оставленный зубчатым элементом.

Форма, размеры стружки и условия протекания процесса при работе гладкого и зубчатого режущих элементов при ротационном фрезеровании существенно отличаются. Зубчатый элемент внедряется в сплошной материал и формирует стружку в стесненных условиях. В результате имеет место существенная деформация и искажение формы стружки. Гладкий элемент осуществляет свободное резание, удаляя материал, рассеченный канавками. Стружка свободно перемещается вдоль плоскости сдвига, претерпевая незначительную деформацию. Поэтому имеет смысл рассматривать коэффициенты усадки отдельно для стружки, формируемой гладким и зубчатым режущими элементами. Снимки стружки, формируемой гладким (а) и зубчатым (б) режущими элементами показаны на рис. 1.

Для определения коэффициента усадки стружки при ротационном фрезеровании осуществим моделирование процесса. Исходный материал – алюминиевый сплав АК9. Общие параметры: радиус режущих элементов $r = 24$ мм; угол наклона оси режущего блока $\beta = 0$; подача $S = 1$ мм/зуб; глубина резания $t = 2$ мм; угол при вершине зубчатого элемента $\varphi_1 = 6°$, число зубьев $z = 20$. На протекание процесса существенное влияние оказывает угол разворота оси режущего блока λ, который может изменяться в широких пределах, поэтому оценка коэффициента усадки проводилась для различных углов разворота в диапазоне от 10° до 70° с шагом 10°.



а) б)

Рис. 1. Стружка, полученная зубчатым (а) и гладким (б) режущими элементами

Измерение размеров полученной стружки осуществлялось в следующей последовательности:

1. На предметный столик помещается эталон (линейка) и через окуляр микроскопа делается фотоснимок с заданного фокусного расстояния.
2. Опытный образец элемента стружки помещается на предметный столик и через окуляр микроскопа делается фотоснимок.
3. Полученные фотоснимки стружки и эталона импортируются в программу «Компас-3D».
4. На фотоснимке эталона измеряется расстояние между граничными точками эталона в координатах «Компас-3D».
5. На фотоснимке образца измеряется расстояние между интересующими точками в координатах «Компас-3D».
6. Так как известно номинальное значение размера эталона, то поделив размер образца на размер эталона в координатах «Компас-3D» можно получить реальное значение размера измеряемого образца.

Полученные размеры стружки сравнивались с размерами следов, остающихся на заготовке. Коэффициент усадки стружки при изменении λ показан на рис. 2.

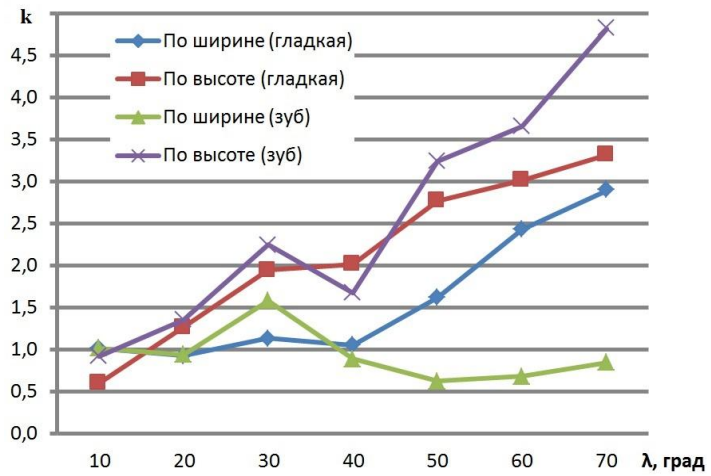


Рис. 2. Коэффициент усадки стружки при изменении λ

График показывает, что при увеличении угла разворота коэффициент усадки стружки также увеличивается. Наиболее интенсивно изменяется высота стружки, формируемой зубчатым режущим элементом. Ширина стружки, формируемой зубчатым режущим элементом, практически не изменяется. Это можно объяснить работой зубчатого элемента в стесненных условиях, в результате чего деформация стружки носит направленный характер.

Библиографический список

1. Либенсон, Г.А. Производство порошковых изделий: учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. / Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.

2. Металлические порошки и порошковые материалы: справочник / под ред. Ю.В. Левинского. – М.: Экомет, 2005. – 520 с.

3. Казармщиков, И.Т. Производство металлических конструкционных материалов: учебное пособие / И.Т. Казармщиков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 247 с.

4. Грановский, Г.И. Резание металлов: учебник для вузов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.

5. Куфарев, Г.Л. Расчет степени деформации стружки при торцовом фрезеровании / Г.Л. Куфарев, А.А. Козлов, В.В. Овчаренко / Известия ТПИ. – Т. 209. – Томск, 1976. – С.135–138.

6. Сметанин, С.Д. Оптимизация процесса получения порошковых материалов ротационным фрезерованием / С.Д. Сметанин, В.Г. Шаламов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 12. – С. 4–11.

К содержанию

УДК 621.923.1

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА CAM-МОДУЛЯ СИСТЕМЫ ADEM ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПЕРИФЕРИЕЙ КРУГА В ВИДЕ ТРЕХСТУПЕНЧАТОГО ЦИКЛА

Л.В. Шипулин

В статье рассматривается разработка алгоритма CAM-модуля системы ADEM для проектирования операций плоского шлифования периферией круга в виде трехступенчатого цикла, включающего черновую, чистовую и выхаживающую стадии. Решаются две основные задачи – разработка алгоритма проектирования цикла и формирование на основе спроектированного цикла управляющей программы.

Ключевые слова: плоское шлифование периферией круга, алгоритм проектирования цикла, управляющая программа для плоского шлифования.

Современное машиностроение неотрывно связано с компьютерными технологиями. Среди производственных задач, решаемых с помощью компьютеров, важнейшее значение имеет расчет траектории движения режущего инструмента. Такой расчет осуществляется в CAM (computer-aided manufacturing) модулях различных систем автоматизированного проектирования. Анализ систем Pro/ENGINEER, DelCAM, SolidCAM, PowerMill, FeatureCAM (АСКОН) и ADEM показал, что существующие CAM-системы позволяют построить сложнейшие траектории движения инструмента для токарной и фрезерной 5-координатной обработки, но для шлифования не предназначены.

В то же время, в научной технологии машиностроения имеются работы, направленные на разработку циклов шлифования, позволяющих повысить эффективность обработки [1, 2, 3]. В связи с этим, разработка CAM-модуля, позволяющего формировать траекторию движения абразивного инструмента с учетом цикла шлифования, является актуальной.

Разработка CAM-модуля плоского шлифования периферией круга для проектирования операций в виде трехступенчатого цикла подразумевает решение двух основных задач: разработка алгоритма формирования цикла плоского шлифования и формирование траектории движения инструмента в соответствии с разработанным циклом.

Решение первой задачи подробно описано в работах автора [1, 4]. Согласно методике проектирования операций плоского шлифования периферией круга в виде трехступенчатого цикла [1, 4], весь припуск делится на части, и каждая часть снимается на соответствующей ей стадии обработки: черновой, чистовой и выхаживающей. На первой, черновой стадии обра-

ботки предлагается работать с максимально допустимыми режимами резания, обеспечивающими максимальную производительность, но не вызывающими брак детали. На этой стадии снимается большая часть припуска, при этом температуры в зоне резания вызывают наклепы, прижоги, остаточные напряжения и прочие температурные дефекты. На второй, чистовой стадии, обработка проводится с режимами резания, близкими к нормативным значениям, при этом обеспечивается выполнение основных требований по точности, бесприжоговости и шероховатости. Образовавшийся после черновой стадии дефектный слой должен быть полностью удален с поверхности заготовки на чистовой стадии. И на заключительной, выхаживающей стадии обработки происходит формирование шероховатости поверхности.

Поскольку каждая из стадий обработки имеет специфический характер, то и проектирование этих стадий требует различного подхода. Так, на черновой стадии требуется определить максимально допустимые режимы резания, при которых формируемый дефектный слой не должен превышать величину оставшегося на чистовую стадию припуска. На чистовой стадии решается обратная задача – исходя из требований по качеству обработанной поверхности, находятся допустимые режимы резания.

Для решения представленных задач вводятся технологические ограничения по допустимой глубине прижога, по осыпаемости абразивного инструмента, по точности обработки, по мощности привода станка и по шероховатости обработанной поверхности, для расчетного определения которых применяется разработанная комплексная имитационная модель плоского шлифования [5].

В результате для решения первой задачи – формирования цикла плоского шлифования – предлагается расчетный алгоритм, представленный на рис. 1. Работу алгоритма можно описать следующим образом. В первую очередь по введенным исходным данным строится график основного времени. Затем для черновой стадии обработки строятся области допустимых режимов резания и находится объединенная область, в которой выполняются все учитываемые технологические ограничения. Программно определятся оптимальная ситуация с минимальным основным временем. Далее вычисляется оставшийся после черновой стадии припуск, и для него строится график основного времени, накладываются технологические ограничения и находится оптимальная ситуация. Далее, исходя из заданной шероховатости, определяется требуемое количество выхаживающих ходов. На заключительном этапе выводятся рекомендуемые режимы резания на каждую стадию обработки.

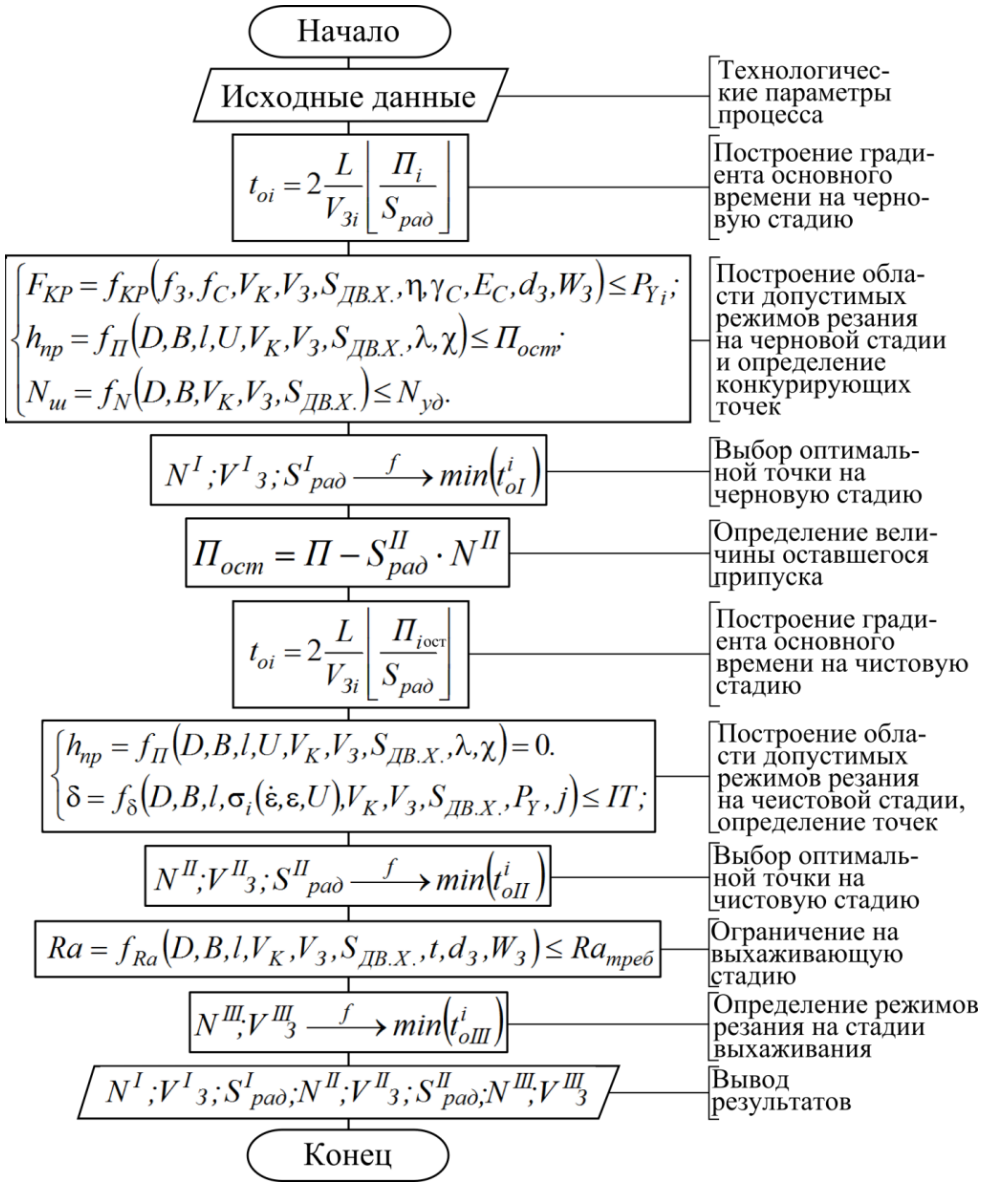


Рис. 1. Алгоритм расчета параметров цикла плоского шлифования

Реализация представленного цикла позволяет для каждой из трех стадий обработки получить значения радиальной подачи шлифовального круга, скорости продольного движения стола с заготовкой и количество проходов по глубине. На рис. 2. показан файл с результатами расчета конкретного цикла шлифования, который включает в себя информацию о параметрах заготовки (исходные данные), параметрах выбранного шлифовального круга и стадиях обработки.

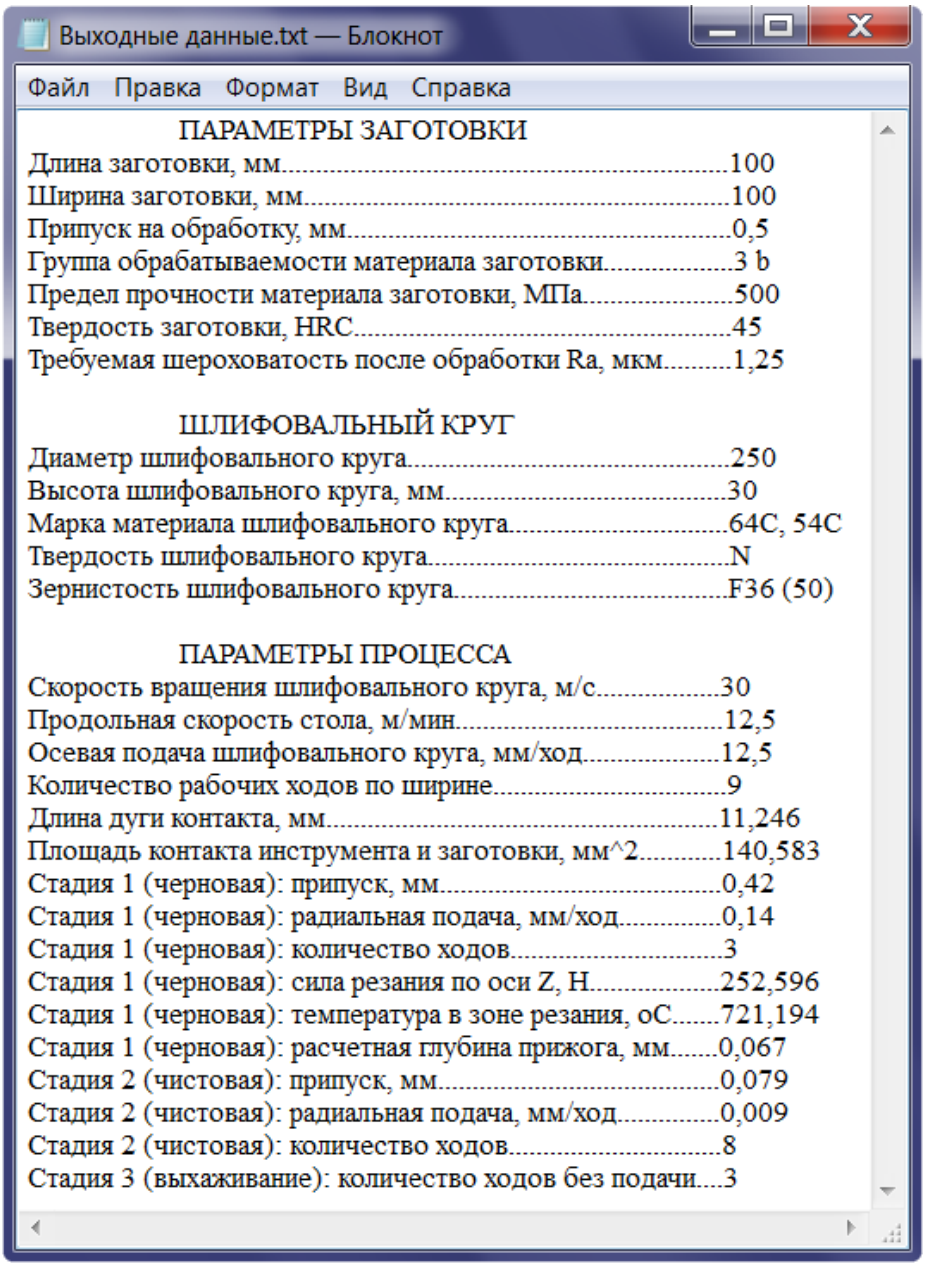


Рис. 2. Результаты работы алгоритма

Для решения второй задачи необходимо по полученным данным формировать массив координат движения шлифовального круга. Съём всего припуска осуществляется последовательным удалением слоев, каждый из которых удаляется движением инструмента на одном Z-уровне по траектории зигзаг (рис. 3). Затем инструмент спускается на следующий уровень и отрабатывает аналогичную траекторию. Высоты положения инструмента по оси Z являются выходными данными из расчетного алгоритма (см. рис. 1).

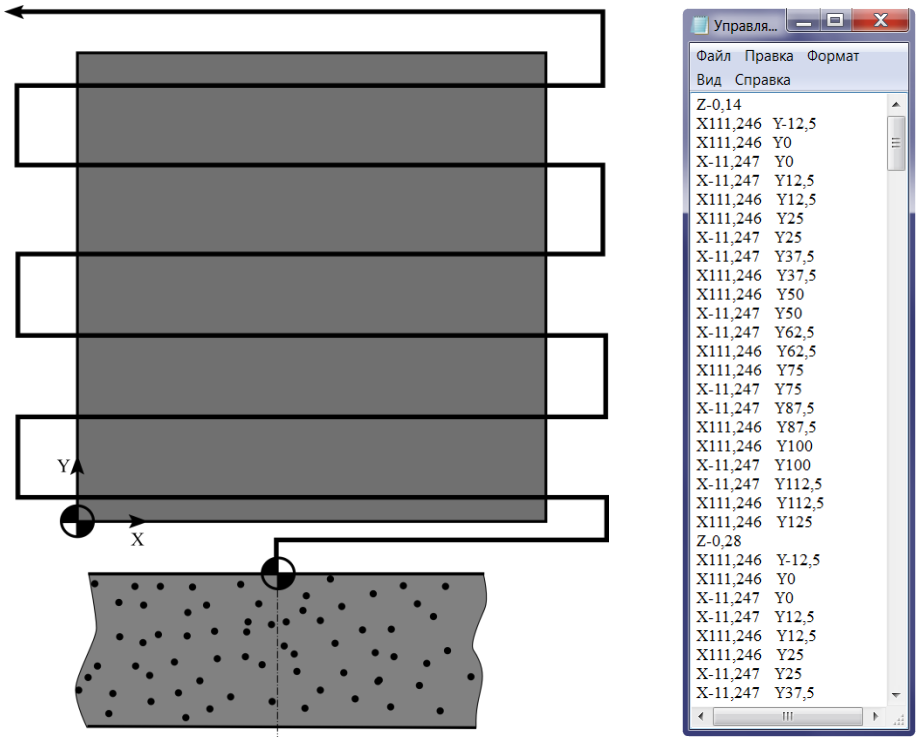


Рис. 3. Траектория движения шлифовального круга (вид сверху)
и формируемая управляющая программа

Библиографический список

1. Дьяконов, А.А. Методика проектирования операций плоского шлифования периферией круга в виде трехступенчатого цикла / А.А. Дьяконов // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 12(30). – С. 12–18.

2. Переверзев, П.П. Моделирование технологических ограничений при оптимизации автоматических циклов шлифования / П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 165–168.

3. Гузеев, В.И. Наукоёмкий процесс моделирования цикла врезного шлифования цилиндрических заготовок / В.И. Гузеев, А.Х. Нуркенов, А.В. Гренштейн // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 10(28). – С. 2–3.

4. Шипулин, Л.В. Совершенствование методики проектирования операций плоского шлифования периферией круга на основе комплексного моделирования процесса / Л.В. Шипулин // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 214.

5. Дьяконов, А.А. Комплексное моделирование процесса плоского шлифования периферией круга / А.А. Дьяконов, Л.В. Шипулин // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 6(24). – С. 14–18.

К содержанию

УДК 621.762

СИСТЕМАТИКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

И.В. Шмидт

В статье проведена классификация существующих покрытий по виду, методу их создания, используемым материалам. Показано, что выбор покрытия зависит от эксплуатационных требований, предъявляемых к каждой поверхности детали, метода нанесения и толщины покрытия, а также от материалов подложки и самого покрытия.

Ключевые слова: напыление, наплавка, металлизация, покрытия.

Служебное назначение деталей в машиностроении является основой для формирования требования по точности и качеству ее поверхностей.

К каждой поверхности детали могут предъявляться свои требования, зачастую разные. Например, для поверхностей деталей, работающих в условиях высоких контактных нагрузок, требуется создание высокой твердости поверхности, при этом сердцевина должна оставаться достаточной вязкой. В парах трения–скольжения поверхности сопряжения должны иметь низкий коэффициент трения и т. д.

Одним из наиболее эффективных технологических путей для улучшения эксплуатационных свойств рабочих поверхностей деталей машин является нанесение на них различных металлических и неметаллических покрытий.

При выборе типа покрытия одним из основных показателей является его функциональное назначение, т. е. условия при котором оно работать. Существующие на сегодняшний день покрытия по функциональному назначению можно разделить на 7 групп (табл. 1). Покрытие представляет собой поверхностный слой детали, целенаправленно создаваемый на поверхности основного материала детали. Покрытие характеризуется конечной толщиной, химическим составом и структурно-фазовым состоянием материала, которые качественно отличаются от аналогичных характеристик материала самой детали.

Большой выбор материалов, используемых для создания покрытий, позволяет обеспечить заданные свойства поверхности для любых деталей современного машиностроения. Обычные конструкционные материалы не всегда способны удовлетворить требованиям, предъявляемым к деталям машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях эксплуатации. Конструкционные материалы повышенного качества, если и отвечают таким требованиям, то могут оказаться слишком дорогими для их использования в условиях современного производстве.

Таблица 1

Классификация покрытий по функциональному назначению

№ группы	Тип покрытия	Примеры применения или разновидности группы
1	Защитное	Антикоррозионное, жаростойкое и др.
2	Износостойкое	Керамические, молибденовые и др.
3	Декоративное	Лакокрасочные
4	Антифрикционные	Пары трения–скольжения
5	Фрикционные	Для защиты от скольжения и проскальзывания трапов
6	Функциональные	Диэлектрические, электропроводные, нанопокрытия и др.
7	Покрытия при восстановлении	Для восстановления геометрии изношенных поверхностей деталей

Систематика применяемых для создания покрытий материалов приведена в табл. 2 [1–17].

Немаловажную роль играет способ нанесения покрытия. Зачастую при создании покрытий сопряжено с нагреванием материала основной детали и материала покрытия до высоких температур, например, при получении покрытий из твердых тугоплавких соединений. Или же формирование покрытий происходит без нагрева, как например, при физическом методе, когда пастообразный полимерно-композитный материал наносят на подложку, после чего происходит его полимеризация в естественных условиях. Кроме того, применение того или иного метода требует наличия специального технологического оборудования, зачастую весьма сложного и дорогостоящего, что существенно сказывается на выборе способа создания покрытий.

Не менее важным показателем является толщина создаваемого покрытия. Так методы металлизации позволяют формировать покрытия от 0,01 мкм до 0,7 мм, при наплавке толщина покрытия может достигать 50 мм. В табл. 3 приведена систематика покрытий по методу их получения [1, 2, 5, 9–18].

Наиболее быстро развивающимися технологиями создания функциональных покрытий в машиностроении являются газотермическое напыление, плазменная и лазерная наплавка. Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и недостатки, свои предпочитаемые области применения.

Процесс газотермического напыления представляет собой нагрев, распыление, перенос и осаждение на подложке частиц напыляемого материала с помощью энергии горячих газов.

Таблица 2

Классификация материалов, используемых для покрытий

№ группы	Группа материала	Подгруппа	Примеры
1а	Металлы и сплавы	Интерметаллиды	Ni–Al, Ti–Al и др.
1б		Монометаллы	Zn, Sn, Cr, Ni, W, Mo, Al, Pb и др.
1в		Стали и сплавы	Cr–Ni, Pb–Zn, Zn-Al и др. сплавы; 08Х22Н6Т, 08Х21Н6М2Т, 08Х18Г8Н2Т и др. нержавеющие стали
2а	Композитные материалы	Композитные материалы на полимерной матрице	Порошковые полимерные краски, полимерно-композитные материалы с различными наполнителями
2б		Композитные материалы на металлической матрице	Композитные дисперсно-упрочненные порошковые материалы
2в		Керамические композитные материалы	Оксиды алюминия, хрома, титана, циркония и др. металлов
2г		Металлокерамические композитные материалы	Композитные материалы на основе карбидов вольфрама и хрома, расположенных в металлической матрице
3а	Наноматериалы	Наноструктурированные материалы	Наноструктурированные материалы TiAlN+Si, TiMoN+Si, TiCrN , суспензии, золь-гели и др.
3б		Наномодифицированные материалы	Композитные материалы модифицированные углеродными нанотрубками, наночастицами оксида циркония и др.

Газотермическое напыление подразделяется на газопламенное, плазменное, высокоскоростное газовоздушное, детонационное и др. (см. табл. 3). Общим свойством всех этих видов напыления является создание на подложке слоя из материала, не перемешанного с основным материалом детали, а связанного с ним лишь адгезионной связью. При этом современные технологии напыления позволяют управлять пористостью, уровнем шероховатости, внутренними напряжениями покрытий, создавать слоистые покрытия и покрытия из смесей материалов.

Наплавка производится при более высокой температуре (кроме лазерной наплавки) и в отличие от газотермического напыления сопровождается перемешиванием наплавляемого металла с материалом самой детали.

Таблица 3

Классификация методов нанесения покрытий

№ группы	Группа метода нанесения покрытия	Подгруппа метода нанесения покрытия	Толщина покрытия, мм
1а	Металлизация	Электролитическая	0,15–0,7
1б		Электрофизическая	0,01–0,5
1в		Химическая	0,0005–0,02
1г		Плакирование	0,1–8
1д		Осаждение	0,3–0,6
1е		Вакуумная	0,00001–0,0001
1ж		Взрывом	0,006–0,02
2а	Напыление	Плазменное	0,3–1
2б		Лазерное	0,1–1
2в		Газопламенное	0,5–3
2г		Электродуговое	0,6–1,5
2е		Сверхзвуковое газовоздушное	0,1–1
2ж		Детонационное	0,04–0,4
3а	Наплавка	Лазерная	1,2–5
3б		Плазменная	1,5–5
3в		Электроконтактная	1–3
3г		Электродуговая	0,5–2
3д		Вибродуговая	0,3–3
3е		Индукционная	1,5–4
4а	Прочие методы нанесения покрытий из композитных и наноматериалов	Программируемая роботизированная выкладка	0,5–5
4б		Плакирование	0,1–2
4в		Силовая намотка	0,5–5
4д		Физический	1–4

Лазерная наплавка позволяет создавать на поверхности детали плакирующий слой из порошкового материала с проплавлением его посредством лазерного луча. Применение лазерного луча в качестве источника нагрева имеет ряд преимуществ перед другими:

– дозируемая энергия;

– возможность локальной обработки поверхности;

– отсутствие термических поводок деталей и минимизация зоны термического влияния;

– возможность обработки деталей больших габаритов благодаря высокой производительности наплавки;

– быстрый нагрев и остывание наплавляемого материала;

– возможность обработки на необходимую глубину;

– минимальное перемешивание основного и наплавляемого материала.

В качестве напыляемых материалов могут применяться металлы, сплавы, оксидные, карбидные и нитридные керамики. Основу для напыления могут составлять металлы, сплавы, пластики и др. материалы.

Важным аспектом является возможность применения покрытий при восстановлении поверхностей деталей [17, 19, 20]. В настоящее время вопросы реновации деталей, узлов и агрегатов в машиностроении остаются весьма актуальными, поскольку технологии формирования покрытий при восстановлении позволяют обрабатывать детали за короткое время, с большой экономией средств и получать на выходе продукцию высокого качества, что увеличивает долговечность детали.

Восстановление деталей наплавкой и напылением заменяет методы металлизации и при этом имеет ряд неоспоримых преимуществ. Газотермическое напыление и лазерная наплавка позволяет вернуть деталям их первоначальные характеристики, а порой и значительно увеличить их работоспособность.

Необходимо отметить, что большинство покрытий в дальнейшем подвергаются механической обработке, что актуально не только при восстановлении поверхностей деталей, но и для обеспечения точности и качества поверхностного слоя при обеспечении служебного назначения той или иной поверхности детали.

Таким образом, нанесение покрытий на отдельные поверхности деталей не просто улучшают их свойства, а приводят к образованию слоя из нового материала с присущим ему комплектом свойств, который необходимо учитывать при разработке конструкций машин и механизмов. Наличие различных методов и материалов для формирования покрытий, возможность последующей механической обработки позволяют обеспечить выполнение требований, предъявляемых к каждой отдельной поверхности детали. Еще больше расширяет возможности покрытий их применении в технологиях восстановления.

Проведенная классификация существующих покрытий по виду, методу их создания, используемым материалам показывает, что выбор покрытия зависит от требований к поверхности детали, метода нанесения и толщины покрытия, а также от материалов подложки и самого покрытия.

Библиографический список

1. Арзамасов, Б.Н. Справочник по конструкционным материалам / Б.Н. Арзамасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов [и др.]; под ред. Б.Н. Арзамасова, Т.В. Соловьевой. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 640 с.

2. Киреев, Р.М. Синтез покрытий из нитридов и карбидов интерметаллида систем Ti–Al конденсацией плазменных потоков, генерируемых вакуумной дугой / Р.М. Киреев // Вестник УГАТУ. Машиностроение, материаловедение и термическая обработка металлов. – 2008. – Т. 10. – № 1(26). – С. 96–99.

3. Ловшенко, Ф.Г. Формирование фазового состава, структуры и свойств механически легированных композиционных порошков на основе системы «железо–алюминий» и покрытий из них / Ф.Г. Ловшенко, Г.Ф. Ловшенко, А.С. Федосенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 1(34). – С. 36–50.

4. Ильющенко, А.Ф. Формирование элементов неравновесных аморфизированных структур композиционных плазменных покрытий в системе «напыленные частицы – подложка» / А.Ф. Ильющенко, О.В. Роман, А.И. Шевцов // Вестник ДГТУ. – 2008. – Т. 8. – № 1(36). – С. 62–69.

5. Долговечный, А.В. Технологии наплавки легированной стали на основу из углеродистой стали / А.В. Долговечный, Л.А. Демидова, Е.А. Морозов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1(2). – С. 550–553.

6. Федотов, А.А. Получение наноструктурных электрокаталитических материалов на углеродных носителях методом ионно-плазменного распыления платиновых металлов / А.А. Федотов, С.А. Григорьев, В.Н. Фатеев // Наукоемкие технологии. – 2013. – Т. 14. – № 10. – С. 63–70.

7. Форенталь, Г.А. Оценка упругих и прочностных свойств эпоксидного композита, наполненного наночастицами оксида кремния / Г.А. Форенталь, С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2011. – № 2. – С. 21–27.

8. Абдрахимов, Р.Р. Исследование реологии суспензий для эффективного диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле / Р.Р. Абдрахимов, С.Б. Сапожников, В.В. Синицын // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 68–74.

9. Шолкин, С.Е. Создание управляемой наноструктуры в покрытии, полученном методами газотермического напыления / С.Е. Шолкин, М.А. Юрков // Вопросы материаловедения. – 2010. – № 2. – С. 68–74.

10. Musil, J. Hard and superhard nanocomposite coatings / J. Musil // Surf. and Coat. Tech. – 2000. – Vol. 125. – Pp. 322–330.

11. Жачкин, С.Ю. К вопросу о напряжениях в композитных гальванических покрытиях на основе железной матрицы / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Ю.Э. Симонова // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2013. – Т. 9. – № 1. – С. 105–107.

12. Михайлов, В.В. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования / В.В. Михайлов, А.Е. Гитлевич, А.Д. Верхотуров [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2013. – № 49(5). – С. 21–44.

13. Гусев, В.М. Структура и свойства износостойких покрытий, получаемых методами газотермического напыления / В.М. Гусев, А.В. Бурякин, В.Б. Мордынский // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 326–329.

14. Соловьев, В.А. Оборудование и области применения газотермического напыления / В.А. Соловьев // НаукаПарк. – 2013. – № 6(16). – С. 87–92.

15. Weng, F. Research status of laser cladding on titanium and its alloys: A review / F. Weng, C. Chen, H. Yu // Materials & Design. – 2014. – Vol. 58. – Pp. 412–425.

16. Chen, J. Microstructure and tribological properties of laser cladding Fe-based coating on pure Ti substrate / J. Chen, C. Guo, J. Zhou // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2012. – Vol. 22. – Is. 9. – Pp. 2171–2178.

17. Кошин, А.А. Систематика ремонтных полимерно-композитных материалов / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 5. – С. 39–44.

18. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.

19. Абакумов, Ю.Ф. Реновация в машиностроении / Ю.Ф. Абакумов, А.В. Козлов, С.С. Зуйков, Р.Ф. Юсипов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 249–257.

20. Коробов, Ю.С. Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением / Ю.С. Коробов, В.И. Шумяков, А.С. Прядко // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2013. – № 3. – С. 17–21.

К содержанию

УДК 621.914.1.01 + 621.99:621.914

ОСОБЕННОСТИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ

И.А. Щуров, Е.В. Немытова

По результатам проведенных расчетов, построенных моделей и производственных испытаний выявлено, что специальная упорная резьба имеет ряд ограничений для нарезания ее посредством резьбофрезерования. Одним из таких ограничений являются геометрические параметры и размеры заготовки. В рассмотренном нами случае происходит существенное искажение профиля резьбы. В таком случае необходимо провести дополнительные расчеты и исследования для изменения профиля режущей части фрезы до такой величины и геометрии, чтобы было возможно получить заданный профиль резьбы.

Ключевые слова: резьба; резьбофрезерование; профиль винтовой поверхности; ЧПУ; уравнение контакта.

Введение. Широкое распространение станков с ЧПУ в машиностроении заметно снизило долю применения при резьбонарезании мерных инструментов, таких как метчики, плашки, резьбонарезные головки. Соответственно, увеличилась доля резьбонарезных резцов и фрез [1]. К преимуществам резьбофрезерования на станках с ЧПУ относят высокую производительность, большую гибкость и надежность процесса [2]. Однако вопросы

формообразования резьб, полученных таким методом, исследованы еще не достаточно полно. Встречаются проблемы при нарезании резьб не метрического профиля. Например, при резьбофрезеровании специальной упорной резьбы по ГОСТ 10177–82 диаметром 32 и шагом 4 мм происходит существенное искажение профиля резьбы и затирание задней поверхности инструмента. В связи с этим возникает необходимость оценить влияние технологических факторов на формообразование профиля получаемой резьбы.

Процесс планетарного резьбофрезерования связан с образованием винтовой поверхности как огибающей ряда последовательных положений производящих поверхности инструмента при его относительном движении [3]. Закономерным следствием этого является то, что профиль винтовой поверхности не совпадает с профилем резьбообразующего инструмента и в каждом конкретном случае необходимо принимать решение о дополнительных исследованиях по его определению. Таким образом, приходится решать классическую обратную задачу формообразования, а именно: задавшись профилем инструмента, определить профиль, получаемый у обрабатываемой заготовки.

Одним из современных и достаточно эффективных и надежных методов решения подобных задач является применение твердотельного моделирования и соответствующих графических редакторов, относящихся к классу CAD систем. Ниже представлены результаты исследования формообразования резьбовой фрезой внутренней упорной резьбы с использованием твердотельного моделирования.

1. Методика теоретического решения задачи. ***Исходными данными для решения являются***

1.1. Параметры нарезаемой резьбы. Необходимо было нарезать внутреннюю резьбу с профилем по ГОСТ 10177–82, но с нестандартными размерами (деталь одного из заказчиков). Параметры этой резьбы следующие: наружный (D), средний (D_2) и внутренний (D_1) диаметры: 38, 35 и 32 мм; шаг резьбы (P) 4 мм; высота исходного треугольника (H) 6, 352 мм; рабочая высота профиля (H_1) 3 мм (рис. 1).

1.2. В качестве инструмента была выбрана резьбовая фреза NVRC 1704 156/007 с одной пластиной 4IR 4.0 SAGE производства компании Vargus. Этот инструмент представляет собой сборную конструкцию, включающую: корпус из стали типа 45 или 40Х, сменную многогранную пластину (СМП) из твердого сплава с покрытием и элементы крепления. Диаметр хвостовика 20 мм, минимальный обрабатываемый диаметр 23 мм, общая длина фрезы 180 мм. СМП имеет следующую геометрию: шаг 4 мм, длина боковой стороны пластины 22 мм (рис. 2). При вращении фрезы вокруг ее оси периферийная режущая кромка образует цилиндрическую поверхность диаметром 24 мм, а боковые кромки – конусы с углами от оси: 87º и 60º.

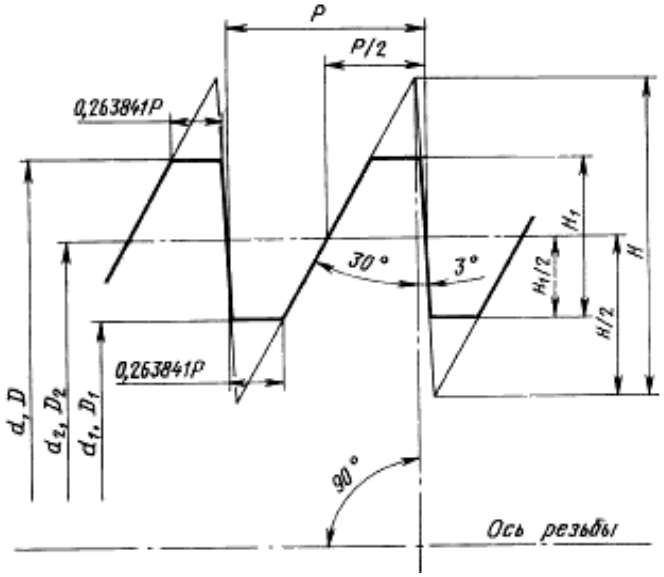


Рис. 1. Профиль резьбы по ГОСТ 10177–82

Рис. 2. Фреза Vargus NVRC 1704 156/007 с пластиной 4IR 4.0 SAGE

Методика решения реализована выполнением следующих этапов

В программе твердотельного моделирования Solideworks, академическая лицензия которой имеется в университете, была построена производящая поверхность фрезы, представляющая собой тело, ограниченное четырьмя поверхностями. Две из них – конические поверхности, с углами, упомянутыми выше, и две – цилиндрические поверхности: наружная – с указанным выше диаметром, внутренняя равная внутреннему диаметру резьбы фрезы.

В этой же программе была построения трехмерная модель заготовки, представляющая собой полый цилиндр с внутренним диаметром равным внутреннему диаметру нарезаемой резьбы и остальными размерами, выбранными конструктивно, поскольку в решении задачи они непосредственно не используются.

В соответствии с заданными параметрами установки инструмента: межосевым расстоянием равным 7 мм, углом разворота фрезы равным углу подъема винтовой линии резьбы была смоделирована установка инструмента относительно заготовки.

В соответствии с заданным законом формообразующего движения, а именно движения инструмента вдоль направляющей – винтовой линии с шагом 4 мм и диаметром 14 мм было произведено твердотельное моделирование формообразования. Такое моделирование включало дискретное перемещение инструмента и выполнение твердотельной операции вычитания объема из тела заготовки объема, занимаемого телом инструмента. В результате такого моделирования получены изображения данных элементов технологической системы, представленные на рис. 3.

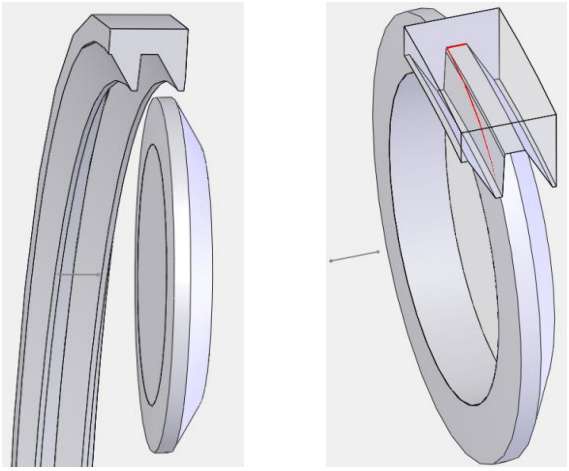


Рис. 3. Фрагменты моделируемых заготовки и инструмента

2. Результаты исследования. Сечение заготовки, приведенное на рис. 4, показывает, что получаемый профиль существенно отличается от заданного стандартом и, следовательно, не позволяет говорить о возможности применения данной фрезы для получения требуемой детали. Аналогичные исследования проведенные на ряде других типоразмеров показали, что во многих случаях получение требуемых резьб планетарным фрезерованием на станках с ЧПУ невозможно.

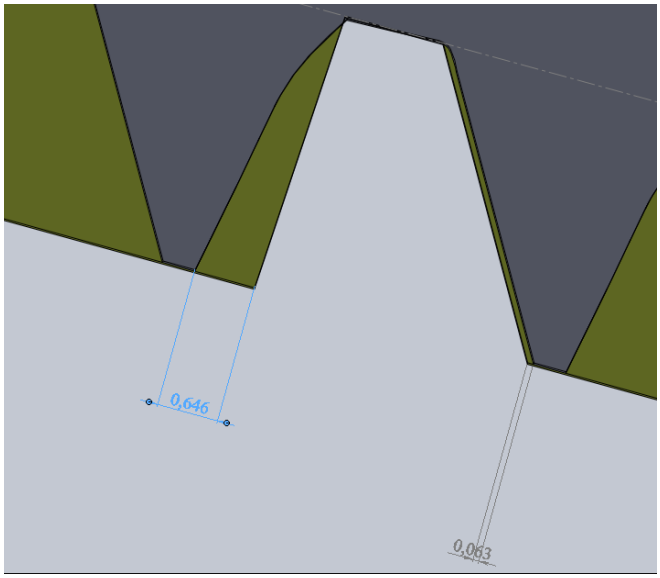


Рис. 4. Профили заготовки исходный и получаемый фрезой

3. Экспериментальная верификация задачи. Полученные выводы были проверены экспериментально. В научно-образовательном центре ЮУрГУ «Машиностроение» на токарно-фрезерном центре MoriSeiki NT4200 были произведена обработка резьб упомянутым выше инструментом (рис. 5).

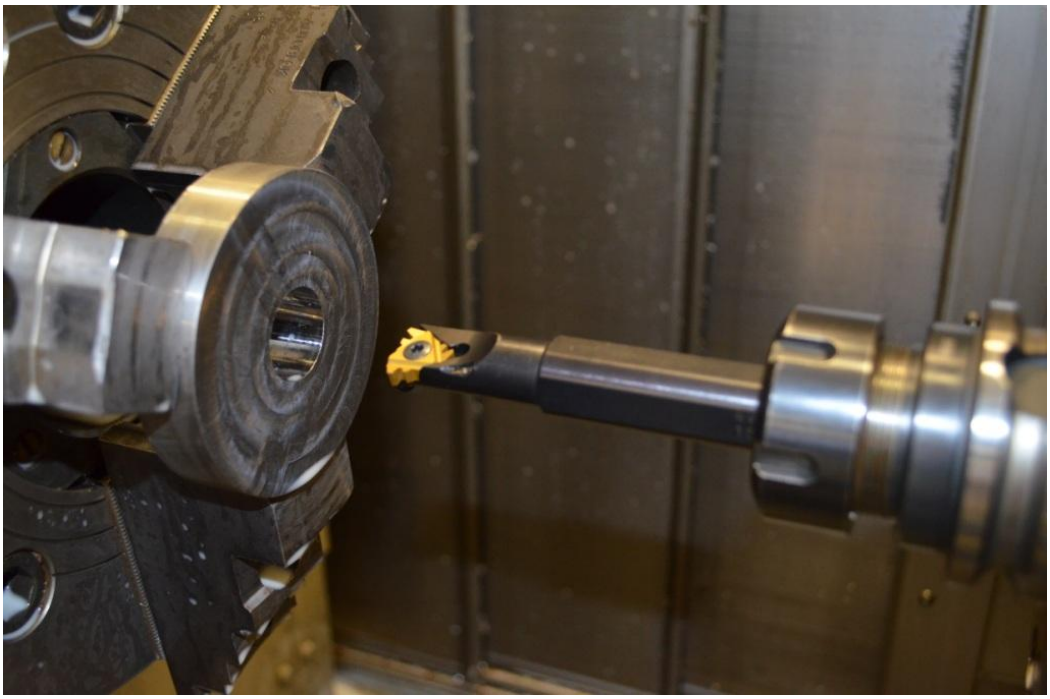


Рис. 5. Обработка резьбы на станке MoriSeiki NT4200

В результате экспериментов были получены заготовки с резьбой, вырезанные фрагменты в виде сектора из которых были сканированы с помощью компьютерного сканера с разрешением 9600 dpi. Изображения резьбы были наложены на получаемые теоретическим моделированием профили и показали высокую сходимость (в пределах величин шероховатостей поверхностей и микронеровностей, вызванных затиранием по задним поверхностям инструмента). Таким образом результат сформулированный выше нашел полное подтверждение.

4. Выводы, обсуждение и применение. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что не все резьбы могут быть получены планетарным фрезерованием на станках с ЧПУ. Ранее проведенные исследования показали, что причиной этого являются системные ограничения применяемого метода формообразования. Все это ставит необходимость провести системные исследования областей применения данного метода. Соответственно, технологи машиностроительных предприятий должны принимать во внимание такие ограничения и на основе данной методики трехмерного твердотельного моделирования или ранее опубликованной аналитической методики, или методики дискретного твердотельного моделирования [4] определять возможность получения требуемых резьб на станках с ЧПУ.

Библиографический список

1. Глушко, Е.В. Резьбофрезерование методом огибания / Е.В. Глушко // СТИН. – 2008. – № 4. – С. 28–31.

2. Руководство DORMER 2008. Обработка резанием. Электронный ресурс. – URL: http://mip.zavod-vtuz.ru/component/content/article/31-dormer/rukovodstvo-2008-obrabotka-rezaniem/957-str-87-rukovodstvo-dormer-2008-obrabotka-rezaniem-rezbofrezerovanie-ukazaniya-metod-polucheniya-rezby-stanok-programma-chpu-din66025-iso-kody-heidenhain-fanuc-siemens-stojkost-instrumenta-pdf-page-87-handbook-dormer-imk-baza-znanij/.

3. Щуров, И.А. Аналитическое решение задачи формообразования метрической резьбы фрезерованием на станке с ЧПУ / И.А. Щуров, Е.В. Немытова, Е.А. Суетина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 19. – № 12(271). – С. 162–164.

4. Щуров, И.А. Расчет точности обработки и параметров инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования: монография / И.А. Щуров. – Челябинск: ЮУрГУ, 2004. – 320 с.

К содержанию

УДК 621.9.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ БАЗИРОВАНИЕМ НА ОБРАБАТЫВАЕМУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

А.В. Щурова

Изучена возможность восстановления шеек роторов турбин путем обработки изношенных поверхностей базированием их на обрабатываемую поверхность. Задача обусловлена необходимостью восстановления таких роторов непосредственно в местах их эксплуатации, что предполагает доставку туда оборудования. Станки для обработки валов в центрах имеют большую массу и габариты, поэтому рассмотрена возможность альтернативной бесцентровой обработки. Рассмотрены три возможных случая такой обработки и приведены результаты теоретических исследований, которые показывают возможность уменьшения отклонения от круглости шеек валов до 10 мкм.

Ключевые слова: восстановление шеек валов роторов турбин, базирование на обрабатываемую поверхность, имитационное моделирование.

Введение. В энергетике применяются роторы турбин, которые имеют большие размеры и массу. В ходе эксплуатации шейки валов этих роторов изнашиваются, и в некоторый момент времени их приходится извлекать из энергетических агрегатов. Величины износа обычно не превышают одного миллиметра, что делает возможным восстановление таких шеек в ремонт-

ном производстве. Известно, что рассматриваемые валы изготавливаются обработкой в центрах. Соответственно, наилучшим вариантом восстановления изношенных шеек был бы также вариант обработки в центрах. Однако обработка в центрах требует оборудования, масса и размеры которого существенны, что связано с обеспечением его жесткости и прочности, достаточных для закрепления тяжелого вала в этих центрах. Поскольку транспортировка роторов турбин имеет высокие затраты, то обычно сами станки доставляют к турбинам.

Для минимизации транспортных затрат все более находят применение малогабаритные станки, которые базируются и крепятся непосредственно на шейках валов. Недостаток данного подхода очевиден: изношенные шейки имеют собственные оси, которые теряют связь с общей осью вала. Такие же оси будут иметь и полученные после восстановления цилиндры шеек. Очевидно также, что вал, базирующие поверхности которого не связаны с его общей осью, будет функционировать хуже, чем вал, изготовленный в центрах. Для преодоления этой трудности предлагается произвести обработку изношенных шеек вала путем базирования его непосредственно на сами шейки.

Известные схемы расчета точности обработки, например, при бесцентровом шлифовании, не учитывают начальные погрешности формы заготовки, поскольку обычно в таких случаях начальные погрешности малы. Потому в литературе не удалось найти результатов исследований по влиянию при бесцентровой обработке начальной погрешности формы заготовки на полученные отклонения формы поверхности детали. Именно разработка необходимых для этого расчетных зависимостей и стала целью данного исследования.

Расчетные схемы, принятые допущения. Рассматривались три схемы обработки: точением с базированием шеек вала в призмах; фрезерованием торцовой фрезой с аналогичным базированием и шлифованием торцем цилиндрического абразивного инструмента с базированием на две роликовые опоры.

В исследованиях принимались следующие допущения. Предполагалось, что износ шейки вала приводит к образованию цилиндрической поверхности с направляющей линией в виде эллипса. Это предположение основано на результатах многолетних измерений изношенных шеек на электростанциях. Предполагалось, что в начальный момент времени обработки большая ось указанного эллипса располагается горизонтально. Поскольку трехмерное моделирование длинной заготовки все еще вызывает трудности в компьютерной реализации, учитывая цилиндрический вид заготовки, рассматривалась обработка не всего цилиндра заготовки, а только его радиального сечения (то есть пространственная задача была приведена к плоской). Соответственно, если заготовка базировалась в призмах (угол 90º), то принимался вариант базирования сечения шеек на две точки. Если базирование было на ролики, то рассматривался вариант базирования на окруж-

ности – сечения этих роликов. Аналогичные допущения были приняты для инструментов: вершина резца описывалась в виде точки, торцовые поверхности фрезы и абразивного инструмента, которые располагались параллельно оси вала, – в виде прямых линий. Подача инструментов осуществлялась в вертикальном направлении в сторону заготовки. Упругие и тепловые деформации, износ инструментов, погрешности базирования инструментов и приспособлений в расчетах не учитывались.

Ставилась задача определить возможность и, если она существует, то и условия, при которых заготовка получит радиальное сечение круглой формы. Для исследований был выбран имитационный тип моделирования.

Описание имитационных моделей

1. С заготовкой связывалась система координат заготовки (СКЗ). В этой системе профиль радиального сечения – эллипс задавался в виде двух уравнений в параметрической форме, куда вошли средний радиус сечения заготовки, эксцентриситет ее профиля и полярный угол радиус-вектора произвольной точки профиля указанного сечения.

2. Вводилась вспомогательная система координат (СКВ) с центром в системе координат заготовки и с осями, расположенными горизонтально и вертикально. В первый момент времени обработки указанные выше системы совпадали. В последующий момент, в соответствии с главным движением резания – движением вращения заготовки вокруг ее оси, последняя со своей системой поворачивалась на некоторый угол. Соответственно этому, использовались общеизвестные уравнения взаимосвязи систем координат при их повороте. Приведенные уравнения позволяли рассчитать точки профиля заготовки в произвольный момент времени ее поворота в СКВ.

3. Далее вводилась система координат, связанная с опорами и инструментом (СКИ). Начало такой системы было определено в горизонтальном направлении по оси симметрии призмы или двух роликов, а в вертикальном – на двух взаимно перпендикулярных линиях, проходящих через указанные опоры призм или аналогичное расположение роликов. Оси данной системы были расположены параллельно осям СКВ. Используя общеизвестные уравнения преобразования систем координат при их параллельном переносе, были найдены координаты профиля заготовки в СКИ. Такие уравнения включали подъем СКИ над опорами в зависимости от контакта заготовки и опор, при этом неотъемлемым условием расчета было условие касания профиля заготовки с указанными опорами.

4. На следующем этапе моделирования определялись координаты точек профиля исходной инструментальной поверхности в рассматриваемом сечении. Если такой профиль пресекал профиль заготовки, то с учетом этого рассчитывался новый ее профиль.

5. Процесс моделирования обработки повторялся, начиная с п.3, путем увеличения угла поворота заготовки на следующий шаг, вплоть до конца подачи инструмента.

Такое моделирование позволило найти координаты точек профиля радиального сечения заготовки к моменту окончания перемещения инструмента. Данный профиль и становился искомым профилем детали.

Результаты расчетов профилей деталей на ЭВМ. В соответствии с данной методикой расчета были разработаны три компьютерные программы. Для оценки получаемых профилей был использован пример обработки вала диаметром 300 мм и с эксцентриситетом 0,5 мм. Моделировалась обработка резцом, фрезой в призмах и абразивным инструментом на роликах диаметром 300 мм.

Расчеты показали, что оказывается достаточной обработка с несколькими оборотами заготовки, дальнейшее же увеличение числа ее оборотов при данных параметрах не приводит к повышению ее точности. Вместе с тем, увеличение максимального (итогового) перемещения инструмента вдоль направления его подачи, начиная с некоторой критической величины, приводит лишь к повышению отклонения от круглости. Наибольшее влияние на точность оказывают подача инструмента на оборот заготовки и расположение инструмента. Расчеты показали, что отклонение от круглости может быть уменьшено с начальных 0,5 мм до величин порядка 10 мкм.

Выводы

1. Имитационное геометрическое моделирование еще раз показало свою эффективность в исследовании процессов с заранее неопределенными параметрами движения элементов технологической системы.
2. Моделирование показало возможность снижения отклонения от круглости заготовок с исходной эллипсностью радиального сечения при фрезеровании их в призматических и роликовых опорах.
3. Установлено, что характер изменения величины отклонения от круглости в рассматриваемом процессе практически не зависит от количества оборотов заготовки, но существенно зависит от подачи инструмента на ее оборот.
4. Установлено, что существуют особые условия расположения инструмента, при которых можно добиться заметного снижения отклонения от круглости.

Библиографический список

1. Щурова, А.В. Имитационное моделирование обработки точением с базированием по обрабатываемой поверхности на две точечные опоры / А.В. Щурова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 86–90.

2. Щурова, А.В. Моделирование обработки фрезерованием шеек валов турбин базированием их на обработанную поверхность / А.В. Щурова // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: Сб. науч. тр. I Межд. н-техн. конф. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 594–599.

К содержанию

УДК 621.311.4.053.1

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНОГО ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ

Р.Т. Абдуллоев, А.Б. Тряпицын, А.И. Сидоров

Новые методы контроля состояния заземляющих устройств, облегчают эксплуатацию системы электроснабжения тяговых подстанций и повышают экономическую эффективность ее работы. Для разработки таких методов нами проведен анализ особенностей конструктивного выполнения заземляющих устройств тяговых подстанций. По результатам анализа предложена установка для проведения экспериментальных исследований заземлителей тяговых подстанций.

Ключевые слова: железная дорога, заземляющие устройства, тяговая подстанция.

Заземляющие устройства важнейший элемент системы электроснабжения железнодорожного транспорта, от технического состояния которых зависит надёжность работы электрооборудования и электробезопасность обслуживающего персонала [1].

Заземляющие устройства тяговых подстанций переменного тока (рис. 1) выполняют роль одновременно защитных, рабочих и грозозащитных [2].

В качестве заземлителей используют: искусственный заземлитель, называемый иначе контуром заземления подстанций (КЗП), охватывающий практически всю территорию тяговой подстанций; рельс подъездных путей тяговой подстанции (РПП); рельсы главных путей станции или перегона (РГП), проходящие вблизи тяговой подстанции; другие естественные заземлители (ЕЗ) – водопроводные и прочие металлические подземные коммуникации, проложенные по территории подстанции, оболочки металлических силовых кабелей, напряжением до 1000В и выше (кроме оболочек кабелей местной или магистральной связи, телеуправления, сетей до 1000 В).

Контур *КЗП* выполняют в виде горизонтальной сварной сетки из стальных полос *2* сечением 40х50 мм, положенных на ребро, и вертикальных элементов *1* из стальных уголков, сечением 63х63х5 мм, приваренных к сетке по периметру и по углам ячеек, где установлены опоры с молниеотводами *4*. И сетка, и верхние края вертикальных элементов погружены в землю на 0,7 м. Места сварки полос сетки, а также полос и вертикальных элементов покрыты битумом для защиты от коррозии. Арматура опор *4* для уменьшения сопротивления растеканию импульсным токам разряда молнии приварена к полосам сетки в трех-четырех местах полосами *3* сечением 25х4 мм. В местах, где при выходе с территории подстанции обслуживающий персонал пересекает границу сетки и попадает в зону повышенных градиентов потенциалов земли, устроены так называемые козырьки в виде

нескольких параллельных полос *12*, приваренных к основной сетке, причем каждая следующая со стороны выхода располагается на все большей глубине: сетка на глубине 0,7 м, первая полоса – 1,0 м, вторая – 1,5 м [2].

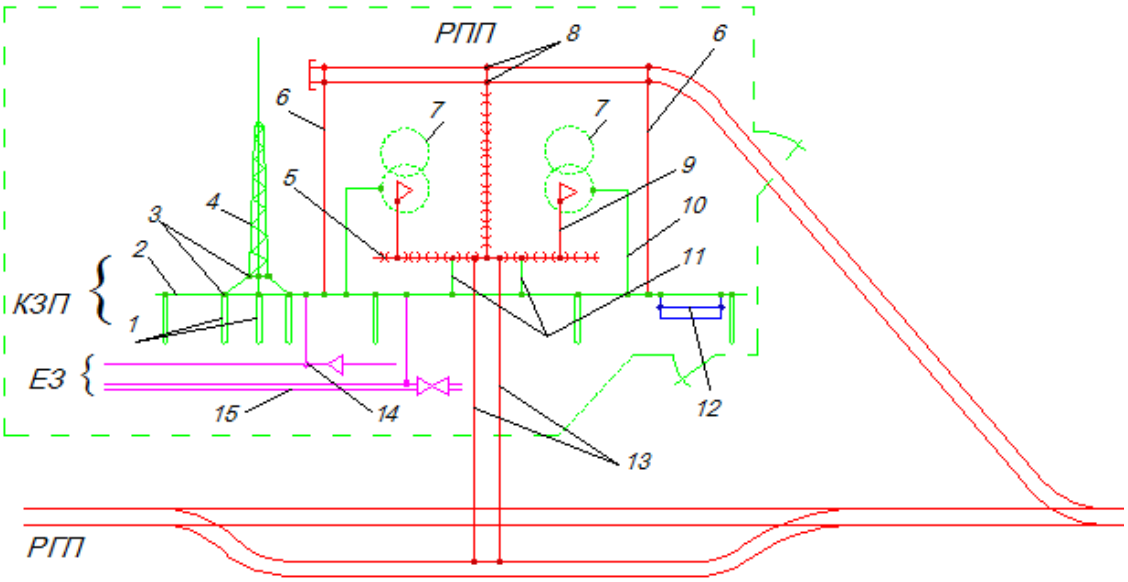


Рис. 1. Принципиальная схема заземляющего устройства тяговой подстанции

Такое размещение полос в козырьке улучшает распределение потенциала на поверхности земли и, тем самым, уменьшает шаговые напряжения $U_ш$ (рис. 2 *а* и *б*, где показаны соответственно, картины распределения потенциалов на поверхности земли $U_з$ в направлении выхода при *КЗП* без козырька и с козырьком).

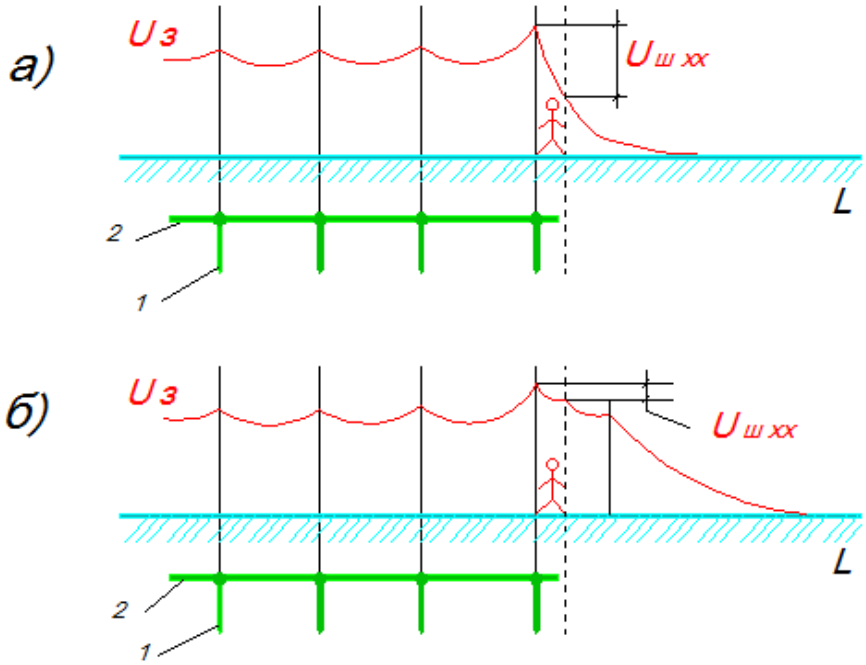


Рис. 2. Распределение потенциалов на поверхности земли в направлении выхода с тяговой подстанции при КЗП без козырька (*а*) и с козырьком (*б*).

Рельсы *РПП* приварены к полосам сетки во всех местах их пересечений соединительными полосами *6*, сечением 40 х 5 мм. К *КЗП* и *РПП* неизолированным, отслужившим свой срок службы рельсом *5*, приложенным на глубине примерно 0,3 м, присоединены выводы фазы *С* трансформаторов. К *РПП* рельс *5* приварен в точке *8*, а к *КЗП* – в местах его пересечения с полосами сетки в точках *11* (на рис. 1 показаны проводники *11*, связывающие рельс *5* и *КЗП*). Спуски от фаз *С* трансформаторов к рельсу *5* выполнены за выключателями вводов РУ 27,5 кВ отрезками шин *9*.

Рельсы *РГП*, проходящие вблизи тяговой подстанции, соединяют с *КЗП* рельсовым фидером *13*. Обрыв рельсового фидера *13* может привести к появлению на рельсах путей станции перегона (вблизи места расположения электроподвижного состава) больших потенциалов. Чтобы исключить вероятность обрыва этого фидера, его выполняют в виде двух параллельных ветвей, подвешенных на опорах. На тяговой подстанций фидер *13* присоединяется непосредственно к проводнику *5*, соединяющему выводы фазы *С* трансформаторов, а на станциях – к нулевым точкам дроссель – трансформаторов (если для тяговых токов и токов автоблокировки используются оба рельса пути), или же к рельсу, по которому проходит тяговый ток (если для тяговых токов используется один, а для токов автоблокировки другой рельс).

К *КЗП* должны быть присоединены естественные заземлители всех типов, находящиеся на территории тяговой подстанции, например металлические оболочки силовых кабелей *14*, металлические водопроводные и другие коммуникации *15*, а также все части оборудования, подлежащие заземлению. К ним относятся следующие: металлоконструкции и ригели порталов всех напряжений; корпуса всех трансформаторов – силовых, тока, напряжения, собственных нужд; корпуса выключателей переменного тока, металлоконструкции блоков и шкафов *КРУН* всех напряжений и другие металлоконструкции; корпуса шкафов, заземляющие ножи разъединителей и т. п. На рис. 1 условно показано лишь присоединение к *КЗП* корпусов трансформаторов *7* заземляющими проводниками *10*.Присоединения заземляющих проводников к оборудованию выполняются видимыми, преимущественно сварными или болтовыми. В качестве заземляющих обычно используют круглые или прямоугольные проводники, площадь сечения которых не менее 100 м^2. Каждый заземляющий элемент должен быть присоединен к *КЗП* отдельным проводником. Заземляющие ножи разъединителей, предназначены для заземления выключателей с двух сторон, присоединяют к одной точке *КЗП*. Оборудование, расположенное в помещениях закрытой части подстанции, соединяют заземляющими проводниками с полосами *КЗП*, расположенными по стенкам кабелей каналов[2].

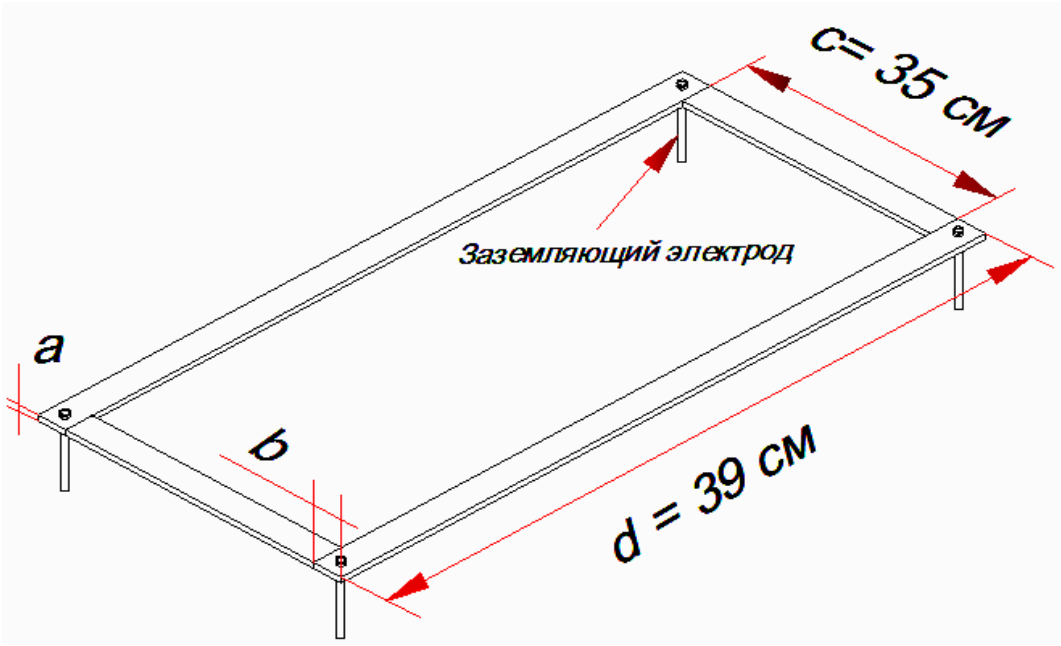
Изучение конструкции и элементов заземляющих устройств тяговой подстанции позволяет получит информацию для дальнейшего исследования и разработкой системы контроля состояния заземляющих устройств.

Для количественного исследования влияния различных внешних факторов на скорость коррозии искусственных заземлителей тяговых подстанций на кафедре безопасности жизнедеятельности ЮУрГУ была разработана специальный лабораторный стенд. Исследование факторов, оказывающих влияние на скорость коррозии ЗУ позволит разработать комплексную методику оценки пригодности заземляющих устройств для дальнейшей работы, выявить «слабые места», косвенный контроль которых должен быть усилен [3].

В соответствии с изложенным выше нами были определены геометрические размеры стенда:

Геометрические размеры заземляющих электродов стенда: $L_{Эл.}$= 50 мм, $S_{Эл.}$= 6 мм^2.

Размеры контур заземления (стальной полос): *a* = 3 мм,*b* = 30мм.



Библиографический список

1. Иванов, Г.В. Повышение эффективности работы заземляющих устройств тяговых подстанций магистральных электрических железных дорог: дис. …канд. техн. наук / Г.В. Иванов. – Омск: ГОУВПО, 2009. – 134 с.

2. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

3. Абдуллоев, Р.Т. Факторы, определяющие состояние заземляющих устройств тяговых подстанций / Р.Т. Абдуллоев, С.А. Тропин, В.М. Галеев // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов III Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). – 2014. – С. 5–8.

К содержанию

УДК 502.174 + 657.567 + 658.382

ОБ ОПАСНОСТИ ПРИ ОБРАЩЕНИИ С ОТХОДАМИ

Л.М. Киселева

При транспортировании отходов существует риск техногенных аварий. Наличие специально оборудованного транспортного средства, специальных знаков и выполнение других требований на транспортном средстве при перевозке отходов не конкретизировано нормативными документами. Рассмотрена возможность идентификации отходов по признакам классификации опасных грузов для использования правил перевозки опасных грузов при транспортировании отходов.

Ключевые слова: отходы; опасность; идентификация; транспортирование.

При обращении с отходами, которое включает деятельность по сбору, накоплению, использованию, обезвреживанию, транспортированию, размещению отходов [1], имеется опасность аварий и других неблагоприятных воздействий. Эти воздействия зависят от опасности отходов. Опасность отходов – измеряемые и документируемые свойства отхода, обуславливающие возможность того, что в определенных условиях содержащиеся в составе отходов вещества, обладающие одним из опасных свойств, представляют непосредственную или потенциальную опасность для здоровья людей и окружающей среды как самостоятельно, так и при вступлении в контакт с другими веществами и отходами. В зависимости от состава отходов производства и потребления, различают следующие опасности: взрывоопасность, огнеопасность, ядовитость (токсичность), едкость (коррозионность), радиоактивность, окисляющая способность (свойства способствующие горению). Опасность необходимо определять и учитывать при различных видах обращения с отходами.

Так, при транспортировании отходов I-IV классов опасности существует риск техногенных аварий. Для того чтобы избежать их, при транспортировании отходов на автомобильном транспорте, предусмотрены следующие требования [1]:

• наличие паспорта отходов I-IV классов опасности;

• наличие специально оборудованных и снабженных специальными знаками транспортных средств;

• соблюдение требований безопасности к транспортированию отходов I-IV классов опасности на транспортных средствах;

• наличие документации для транспортирования и передачи отходов.

Требование наличия специально оборудованного транспортного средства и специальных знаков на транспортном средстве при перевозке отходов не конкретизировано нормативными документами. К опасным грузам [2]

относятся любые вещества, материалы, отходы производственной и иной деятельности, которые в силу присущих им свойств и особенностей могут при перевозке создавать угрозу для жизни и здоровья людей, нанести вред окружающей среде, привести к повреждению или уничтожению материальных ценностей. Таким образом, при транспортировании часть отходов попадает в категорию «опасные грузы», поэтому нормативные документы, регламентирующие правила перевозки опасных грузов, распространяются и на отходы. Но для обеспечения возможности использования требований нормативных документов, регламентирующих правила перевозки опасных грузов [2, 3, 4], необходимо идентифицировать отходы по признакам классификации опасных грузов. Суть идентификации приведена на рис. 1.

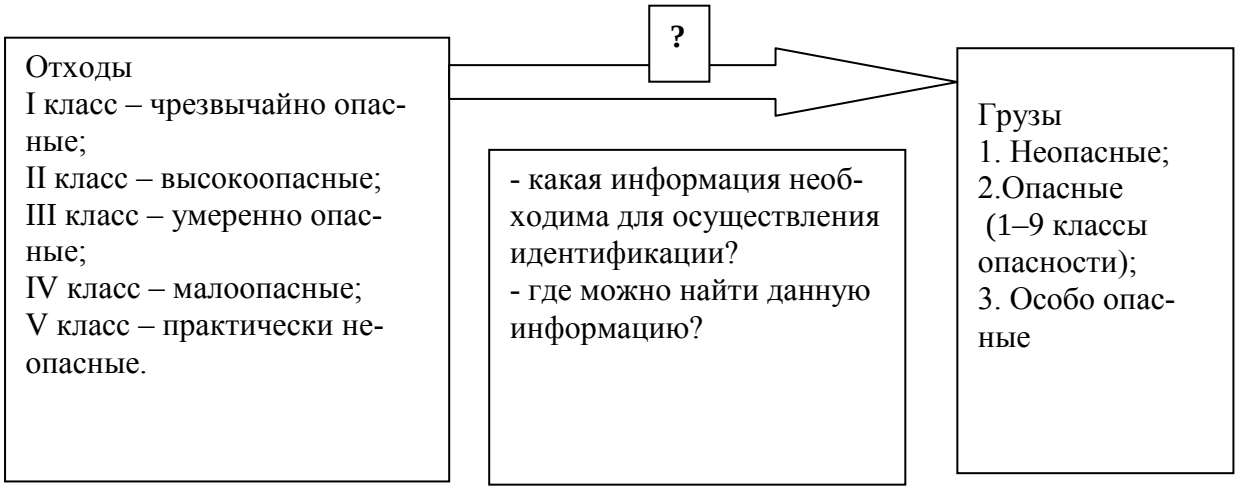


Рис. 1. Суть идентификации отходов разных классов опасности в соответствии с классификацией грузов

Алгоритмидентификации отхода в соответствии с классификацией грузов заключается в том, что отходы, относящиеся к одному из пяти классов необходимо перевести в какой-либо из классов опасного груза, что часто бывает трудно сделать.

Рассмотрим пример идентификации отхода (ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки отработанные и брак) в соответствии с классификацией опасных грузов.

Код отхода:$35330100^{1}13^{2}01^{3}1^{4}$ где:

1 – происхождение отхода (изделия, устройства, приборы, потерявшие потребительские свойства, содержащие ртуть);

2 – агрегатное состояние и физическая форма отхода (готовое изделие, потерявшее потребительские свойства);

3 – опасные свойства отхода и их комбинации (токсичность отхода);

4 – класс опасности для окружающей среды (1 класс опасности).

Данный отход соответствует классу 6, подклассу 6.1 по классификации опасных грузов – ядовитые (токсичные) вещества, способные вызвать отравление при вдыхании паров, пыли, попадании внутрь, но в соответствии

с таблицей А главы 3.2 [4], («Ртуть» – №ООН 2809), относится к восьмому классу (коррозионное вещество). В то же время, согласно специальному положению 599 главы 3.3.1 [4], готовые изделия или приборы, содержащие не более 1 кг ртути, не попадают под действие требований ДОПОГ. Среднее количество ртути в наиболее распространенных в практическом использовании трубчатых люминесцентных лампах составляет 52 мг, что намного меньше 1 кг. Следовательно, ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки отработанные и брак не попадают под действие требований ДОПОГ при их транспортировании. Однако, даже такое малое количество вещества первого класса опасности – ртути, при вдыхании ее паров, способно вызвать не только местное раздражающее действие, но и, что особенно важно, глубокое внутреннее отравление организма человека. Поэтому, в соответствии с гл. III, п. 10 транспортирование отработанных ртутьсодержащих ламп осуществляется в соответствии с требованиями правил перевозки опасных грузов.При обращении с отходами изделий, устройств, приборов, потерявших потребительские свойства, содержащих ртуть (ртутные лампы, люминесцентные ртутьсодержащие трубки; ртутные вентили; ртутные термометры) необходимо знать и учитывать, что ртуть – чрезвычайно опасное химическое вещество, токсична для всех форм жизни в любом своем состоянии. Она отличается чрезвычайно широким спектром и большим разнообразием проявлений токсического действия в зависимости от свойств веществ, в виде которых она поступает в организм (пары металлической ртути, неорганические или органические соединения), путей поступления, дозы и времени воздействия. Диагностика отравлений ртутью очень сложна. Они скрываются под видом заболеваний органов дыхания или нервной системы. Начальные симптомы хронического отравления парами ртути неспецифичны и выражаются, главным образом, в расстройствах нервной системы. Пострадавшие не связывают эти явления с истинной причиной – отравлением ртутью и продолжают работать в отравленной атмосфере.

Анализ возможности идентификации отходов, как опасных грузов, показал, что это не всегда возможно из-за ограниченной информации, указанной в паспорте отхода. Например, одним из критериев отнесения груза к опасному является пожароопасность. Пожароопасность определяется по соответствующим ГОСТам, устанавливающим требования пожарной безопасности, и/или наличием хотя бы одного из следующих свойств – способности жидких отходов выделять огнеопасные пары при температуре не выше 60 °С в закрытом сосуде или не выше 65,5 °С в открытом сосуде. В этом случае отход будет относиться к 3-му классу. Вещества с относительно низкой опасностью при транспортировании, не отнесенные ни к одному из предыдущих классов, но требующие применения к ним определенных правил перевозки и хранения, относятся к 9-му классу. Так, под-

класс 9.1 – твердые и жидкие горючие вещества и материалы, которые по своим свойствам не относятся к 3-му и 4-му классам, но при определенных условиях могут быть опасными в пожарном отношении (горючие жидкости с температурой вспышки от плюс 61 °С до плюс 100 °С в закрытом сосуде). В паспорте отхода информация о температуре вспышки отсутствует.

Потенциальная опасность отдельных видов отходов не до конца документирована и отсутствует методика тестов для количественной оценки такой опасности. Необходимы дальнейшие исследования для разработки методов, демонстрирующих потенциальную опасность этих веществ для человека и (или) окружающей среды. Методы стандартных испытаний разработаны для чистых веществ и материалов, к которым отходы чаще всего не относятся.

Кроме этого, в соответствии с [5] установлены новые Правила проведения паспортизации отходов I–IV классов опасности и типовая форма паспорта отходов I–IV классов опасности, вступающие в силу с 1 августа 2014 года. При этом, новая форма паспорта не содержит строку со сведениями об опасных свойствах отхода и их комбинаций, что еще более ухудшит возможность идентифицировать отходы по признакам классификации опасных грузов.Поэтому, для предотвращения возможного ущерба при транспортировании отходов, необходимо организовать перевозочный процесс с учетом требований, конкретизированных для каждого вида отходов, а это возможно, если известны опасные свойства отходов. В связи с этим, необходимо:

1) при разработке паспортов отходов проводить дополнительные исследования опасности отходов, позволяющие идентифицировать их по признакам классификации опасных грузов;

2) указывать в паспорте отхода класс опасного груза;

3) ввести информацию о классе опасного груза в классификационный каталог отходов.

Библиографический список

1. Об отходах производства и потребления: Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ.

2. Об утверждении правил перевозки опасных грузов автомобильным транспортом: Приказ Минтранса РФ от 08.08.95 n 73 (ред. от 14.10.99).

3. Правила перевозки грузов автомобильным транспортом: Постановление Правительства РФ от 15 апреля 2011 г. № 272.

4. Европейское соглашение о международной дорожной перевозке опасных грузов (ДОПОГ): Женева, 2011 г.

5. О порядке проведения паспортизации отходов I–IV классов опасности: Постановление Правительства РФ от 16 августа 2013 г. № 712.

К содержанию

УДК 658.382.2 + 612.424

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ОСВЕЩЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ ЗРИТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ И ОРГАНИЗМА В ЦЕЛОМ

А.В. Кудряшов

По результатам проведенных исследований установлено отсутствие негативного влияния света генерируемого светодиодными источниками, обоснованы нормативные уровни освещенности для зрительных работ разной точности, исследовано влияние цветовой температуры светодиодных источников освещения на комфортную работу зрительного анализатора, предложены уточнения и дополнения в действующие нормативные документы по оценке освещения. Сформулированы рекомендации, для создания установок искусственного освещения, безопасных для зрительной системы и общего состояния организма человека.

Ключевые слова: цветовая температура; зрительное утомление; оценка; освещение; светодиоды; нормирование.

На сегодняшний день наиболее популярным видом энергоэффективного освещения становятся светодиодные источники. Потребителей привлекают заявленные показатели световой отдачи, срока службы, но среди специалистов не прекращаются дискуссии об особенностях биологического действия светодиодного освещения [1–5]. Задачей НИР, проводимой Южно-Уральским государственным университетом совместно со специалистами Южно-Уральского государственного медицинского университета Минздрава России, является оценка влияния излучения энергосберегающих источников света на состояние зрительных функций и организма в целом.

Для проведения исследований безопасности и эффективности энергосберегающего освещения была создана экспериментальная осветительная установка, состоящая из различных по спектру светодиодных и люминесцентных источников (от 3000 К до 6500 К) и способная создавать уровни освещенности от 50 до 1000 лк. Также существует возможность оценки слепящего действия, характерного для светодиодных источников света, и сопоставления действия излучения различных по спектру источников света.

Для обеспечения регулировки уровня освещенности в широком диапазоне используются 5 источников тока ИТСК–9008.02.00, которые имеют двухступенчатую структуру обратноходового преобразователя и 120 светодиодных излучателей пяти типов (LEMWA33X70FW00, LEMWA33X75GW00, LEMWA33X75HW00, LEMWA33X80JW00, LEMWA33X80LW00).

Разработка комплексного метода оценки влияния условий освещения на состояние зрительных функций позволила выявить наиболее чувствительные и специфичные методики для решения поставленных в НИР задач. Такими методами оказались: рутинные методы офтальмологического об-

следования, включающие целенаправленный сбор анамнеза, проверка остроты зрения (vis) по таблицам Сивцева-Головина; использование корректурных проб, бесконтактная тонометрия (Tn) в автоматическом режиме на тонометре «TopconCT – 80» (Япония); авторефрактометрия на рефрактометре «TopconKR 8800» (Япония); проверка цветового зрения по пороговым таблицам; проверка аккомодационного аппарата с помощью текстовых таблиц для проверки зрения и набора оптических стекол; биомикроскопия на щелевой лампе фирмы Zeiss (Германия); скиаскопия при помощи скиаскопических линеек. Кроме рутинных была изучена и показана целесообразность включения электрофизиологических методов, включающих одновременную запись электроретинограммы и электроэнцефалограммы, определение электрической чувствительности и лабильности на аппаратно-диагностическом комплексе (Tomey, США). В ходе работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, предназначенной для исследования степени зрительного утомления. Программа позволяет получать достоверные, воспроизводимые результаты. Изменяя значения параметров световой среды можно выявить их влияние на зрительное утомление оператора, а также оценить динамику утомления в течение рабочего дня.

Экспериментальными исследованиями, проведенными в ходе работы доказано отсутствие негативного влияния света генерируемого светодиодными источниками и люминесцентными светильниками (в пределах цветовой температуры 4000–4500К.

Было осуществлено обоснование нормативных уровней освещённости для зрительных работ разной точности в соответствии с СП 52.13330.2011 [6]. Установлены уровни освещенности, способствующие комфортной работе зрительного анализатора при выполнении работ различной точности. Авторами исследований предлагается, согласно полученным данным, внести изменения в действующую нормативную литературу [6, 7], и установить для зрительных работ высокой точности нормативный уровень минимальной освещенности рабочей поверхности не менее 300 лк. Для зрительных работ средней и малой точности оставить в силе требования нормативных документов к уровням освещенности.

В ходе проведения исследований влияния цветовой температуры светодиодных источников света на состояние органов зрения выявлено некоторое повышение абсолютного объема аккомодации и положительной части относительного объема аккомодации («резервная часть») при работе под светодиодным источником света с цветовой температурой от 4000 К до 5000 К при выполнении работы высокой точности, что указывает на более комфортную работу аккомодационно-мышечного аппарата и меньшее напряжение зрительного анализатора при данных значениях температур. В диапазоне цветовых температур от 5700 К до 6500 К отмечается достоверное снижение положительной части относительного объема аккомода-

ции в сравнении с остальными уровнями цветовых температур, что может свидетельствовать о процессе избыточного напряжения аккомодационно-мышечного аппарата зрительного анализатора и уменьшения его резервных возможностей. При выполнении работы при светодиодном освещении с цветовой температурой 3000 К так же отмечается избыточное напряжения аккомодационно-мышечного аппарата зрительного анализатора, что может указывать на неблагоприятное влияние данных значений цветовой температуры светодиодных источников освещения на комфортную работу зрительного анализатора.

Анализ полученных данных при выполнении добровольцами работы средней точности не позволил сделать определенный вывод о влиянии цветовой температуры на показатели зрительных функций.

При работе малой точности отмечаются относительно постоянные показатели абсолютного объема аккомодации при диапазоне цветовой температуры светодиодного источника света от 3000 К до 6500 К, что указывает на низкую степень напряжения зрительного анализатора при данных значениях температур.

На основании проведенных исследований сформулированы рекомендации, для создания установок искусственного освещения, безопасных для зрительной системы и общего состояния организма человека:

1. С целью создания условий комфортной работы зрительного анализатора при выполнения зрительных работ высокой точности, цветовую температуру светодиодных источников освещения установить в пределах от 4000 К до 5000 К. При выполнении зрительных работ малой и средней точности установление требований к цветовой температуре светодиодных источников света нецелесообразно.

2. При проектировании осветительных установок для зрительных работ высокой точности, ориентироваться на нормативный уровень минимальной освещенности рабочей поверхности, равный 300 лк.

3. Для устранения слепящего эффекта необходимо, чтобы яркость излучающей поверхности не превышала 2000 Кд/м^2, что может быть достигнуто применением вторичной оптики или промежуточного рассеивателя, например листа поликарбоната.

4. Для равномерной освещенности в помещениях необходимо, чтобы угол распространения светового потока был не менее 120, что позволяет устранить эффект темных зон и избавиться от областей рабочих поверхностей с избыточными уровнями освещенности.

5. При выборе корпуса светодиодного светильника необходимо учитывать особенности режимов его эксплуатации. При использовании светодиодного светильника необходимо использовать тип корпуса не ниже IP 54. Для устранения возможности поражения электрическим током необходимо осуществлять зануление металлических нетоковедущих частей (корпуса).

6. Для исключения дополнительного зрительного утомления, при построении светильников следует использовать электронные преобразователи, имеющие минимальные пульсации выходного тока, не превышающие 5 % номинальной величины.

7. Для создания комфортных условий освещения необходимо осуществлять регулирование интенсивности светового потока, а также его спектрального состава. Для этого могут использоваться с одной стороны системы передачи информации по питающей сети или по радиоканалу, с другой стороны – светоизлучающие диоды с различными значениями цветовой температуры.

Результаты исследований позволили обоснованно расширить представления о действии света, генерируемого энергосберегающими осветительными приборами, в том числе светодиодами, на состояние зрительных функций и организм в целом, что способствует широкому использованию энергосберегающих систем освещения.

Библиографический список

1. Дуе, Д. Освещение светодиодами: благоприятные возможности или опасность для здоровья / Д. Дуе // Светотехника. – 2012. – № 4. – С. 23–25.

2. Lyons, L. LED-based products must meet photobiological safety standards: part1 // LEDs magazine. – 2011. – Vol.46. – October – P. 31.

3. Ван Боммель, В. Качество освещения и энергоэффективность: критический обзор / В. Ван Боммель // Светотехника. – 2011. – № 1. – С. 6–11.

4. Никифоров, С.Г. Некоторые аспекты восприятия светодиодного излучения глазным аппаратом / С.Г. Никифоров // Полупроводниковая светотехника. – 2009. – № 2. – С. 34–37.

5. Закгейм, А.Л. Светодиодные системы освещения: энергоэффективность, зрительное восприятие, безопасность для здоровья (обзор) / А.Л. Закгейм // Светотехника. – 2012. – № 6. – С. 12–21.

6. СП 52.13330.2011 (СНиП 23–05–95). Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция от 27.12.2010.

7. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий (с изменениями на 15 марта 2010 г.).

К содержанию

УДК 656.13:007.51 + 007.51:612

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА АВТОТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ

И.П. Палатинская, П.С. Дружинин, С.П. Самойлов

В статье рассмотрено моделирование в пакете программ Ansys Mechanical вибронагруженности при гармоническом возбуждении на человека-оператора автотранспортных устройств, представленный виртуальной «реберной» 3D-моделью. Определены собственные частоты системы «голова + позвоночный столб» человека в диапазонах нормируемых частот транспортной вибрации.

Ключевые слова: моделирование, система «голова + позвоночник человека», транспортная вибрация, резонансные частоты.

Целью проводимого исследования являлось моделирование 3D-модели позвоночника человека, подвергающегося общей вибрации категории 1 «транспортная», передающейся через опорную поверхность на тело сидящего человека, генерируемой транспортными устройствами [1], рисунок 1.

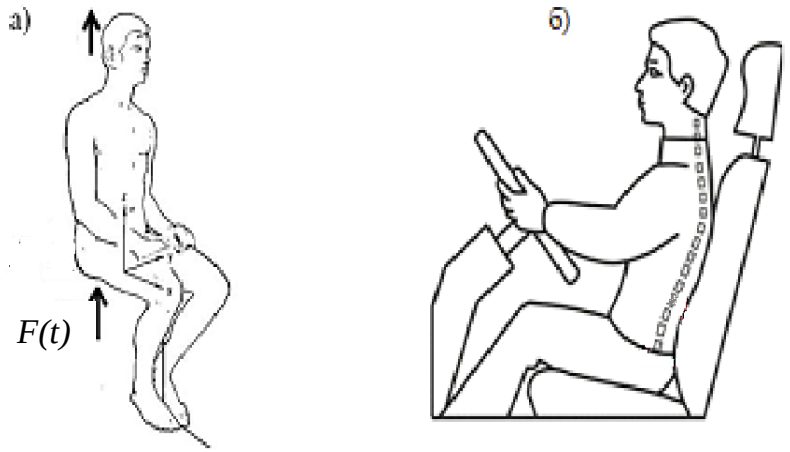


Рис.1. Воздействие общей транспортной вибрации на человека-оператора:
а) преимущественное направление воздействия общей вибрации;
б) общая вибрация категории 1 «транспортная».

Исследование проводилось на виртуальной «реберной» [2] 3D-модели системы «голова + позвоночник» человека-оператора автотранспортных устройств, построенной по предложенному в работе [3] алгоритму:

1) формирование информационной модели, определяющей вид и назначение создаваемой модели;

2) последующее конструирование ее в твердотельной трехмерной модели (пакет программ SolidWorks);

3) импортирование ее в конечно-элементный пакет программ Ansys Mechanical и численное моделирование вибронагруженности.

Информационная модель представляет собой описание строения реального позвоночника, с учетом его особенностей и взаимосвязей между элементами [3].

Основные допущения для создания информационной модели:

1) рассматривается только система, состоящая из головы и позвоночника, который представлен позвонками, межпозвоночными дисками и крестцом (тазовой частью);

2) окружающие позвоночник мягкие ткани человека не учитываются;

3) материал элементов выбран линейным изотропным, таблица 1;

4) биофизические свойства материалов позвонков, тазового сегмента и межпозвоночных дисков шейного, грудного и поясничного отделов, а также особенности их строения были определены из [4, 5]. Вес головы 3,20 кг.

Таблица 1

Свойства материалов позвонков и межпозвоночных дисков

Элемент \ Параметр	Модуль Юнга E, МПа	Коэффициент Пуассона μ	Плотность ρ, кг/м^3
Позвонки и тазовый сегмент	350	0,3	2020
Межпозвоночные диски шейного отдела	105	0,4	1102
Межпозвоночные диски грудного отдела	81	0,4	1096
Межпозвоночные диски поясничного отдела	57	0,4	1090

Твердотельная модель системы «голова + позвоночный столб» человека была построена в пакете программ SolidWorks после анализа рентгеновских снимков и снимков томографии позвоночника нескольких человек мужского пола (среднего возраста 30–40 лет).

По построенной конечно-элементной модели был проведен расчет напряженно-деформированного состояния элементов системы «голова + позвоночный столб» в среде ANSYSMechanical.

В расчетах исследуется действие общей вибрации в полосах частот 1–80 Гц [6] с корректированным среднеквадратичным значением виброускорения допустимых уровней [1], таблица 2.

Для проведения расчетов приняты следующие допущения:

1) поведение всех элементов позвоночника (позвонков и межпозвоночных дисков) подчиняется линейному закону;

2) система находится под действием внешней вертикальной гармонической силы:

$$F(t)= A\times\sin(\varpi_0\times t+ \varphi),$$

где A – амплитуда колебания; F(t) – внешнее силовое воздействие; φ – частота колебания; t – время воздействия.

Таблица 2

Допустимые значения вибрации рабочих мест

Диапазон частот, Гц	Корректированные значения предельно допустимых значений виброускорения, м/с^2	
	Z_0	X_0, Y_0
1 – 80	0,56	0,4

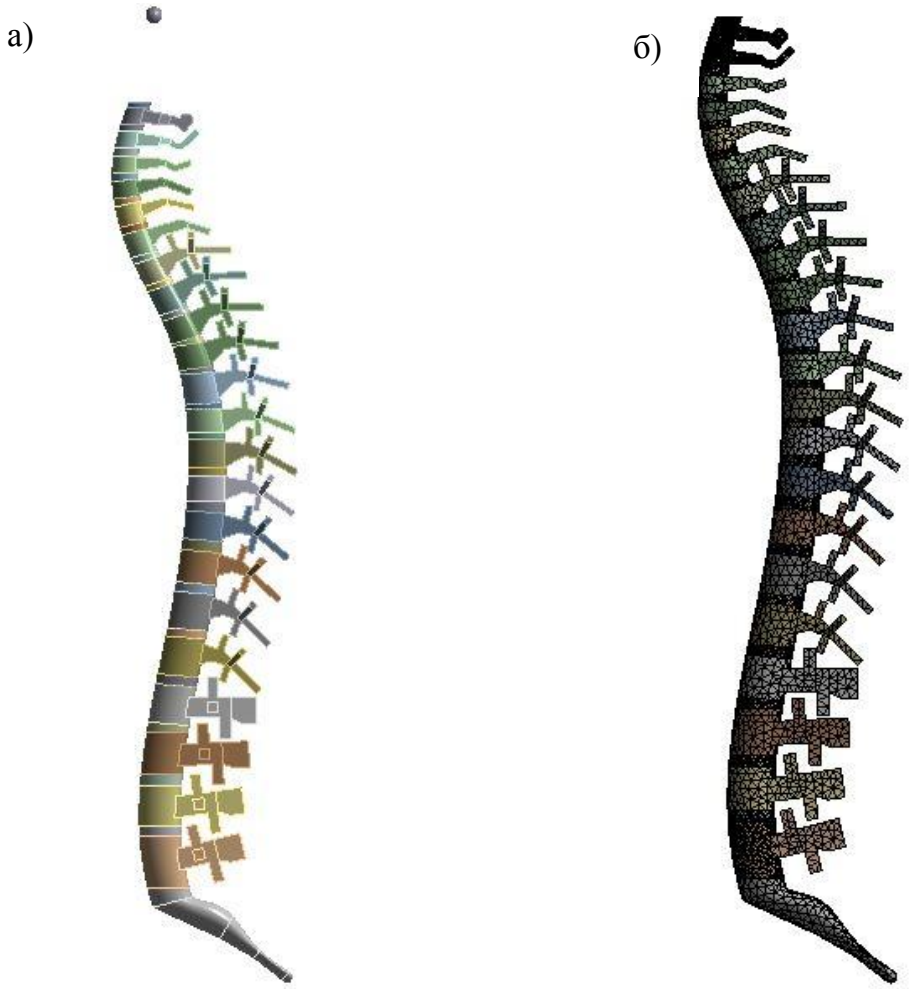


Рис. 2. Твердотельная модель системы «голова + позвоночный столб» человека:
а) 3D-модель для проведения расчета в среде ANSYSMechanical;
б) модель позвоночного столба, разбитая на конечные элементы

В результате проведенных расчетов были найдены амплитудо-частотные характеристики модели, рисунок 3.

Анализ полученных результатов расчетов выявил следующие особенности влияния предельно допустимых уровней общей вибрации 1 категории на напряженно-деформированное состояние системы «голова + позвоночный столб» оператора автотранспортных устройств.

Известно, что наибольшую опасность с точки зрения утомляемости и здоровья человека-оператора представляют вибрационные воздействия в диапазоне 2–14 Гц, так как именно в этом диапазоне расположены резонансные частоты основных органов тела человека [7].

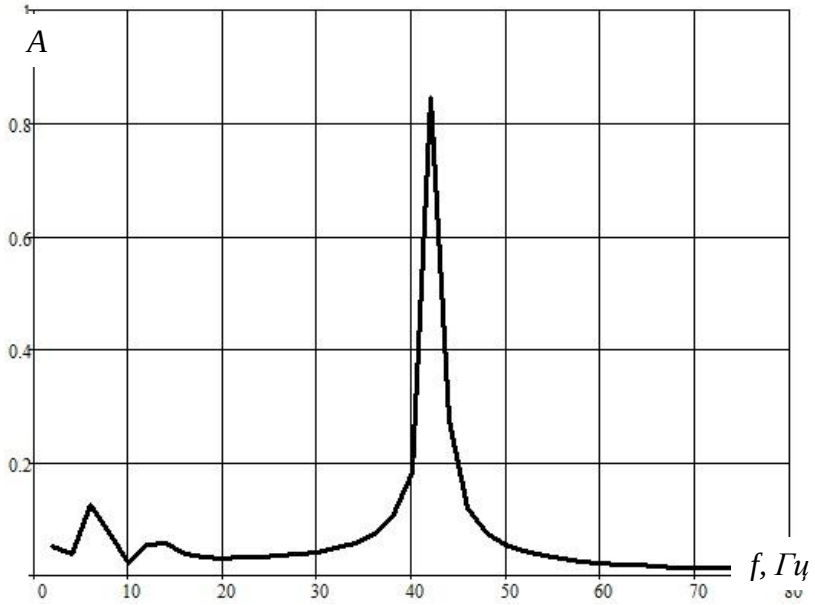


Рис. 3 Амплитудно-частотная характеристика модели системы «голова + позвоночный столб» человека

Собственными частотами «реберной» 3-D модели системы «голова + позвоночный столб» человека являются – 1 Гц, 8 Гц, 12 Гц, 42 Гц, рис. 3. Эти частоты соответствуют низкочастотному и среднечастотному спектрам общей транспортной вибрации, таблица 3.

Таблица 3

Соотношение собственной частоты системы и спектра вибрации

Собственные частоты модели	Граничные частоты октавных полос, Гц	Средние геометрические частоты октавных полос, Гц	Наименование диапазона вибрации
1 Гц	0,88+1,4	1	Низкочастотная вибрация
–	1,4+2,8	2	
–	2,8+5,6	4	
8 Гц	5,6+11,2	8	Среднечастотная вибрация
12 Гц	11,2+22,4	16	
42 Гц	22,4+45,0	31,5	

Кроме того, они совпадают с резонансными частотами основных органов тела сидящего человека при воздействии вибрации. А именно, полученные результаты совпадают с исследованиями биологического действия вибрации на резонансных частотах, описанных в [7]: «для сидящего на вибрирующей поверхности человека имеются резонансные пики на частотах на частотах 4—6 Гц. Для грудной клетки человека резонансные частоты лежат в области 2–12 Гц; для ног и рук 2–8 Гц; для головы 8–14 Гц; для поясничной части позвоночника 4–14 Гц [2]».

Библиографический список

1. СН 2.2.4/2.1.8.566-96 Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы. Минздрав России. – М.: Информационно-издательский центр, 1997. – 26 с.

2. ГОСТ Р ИСО 15536-2-2010. Эргономика. Компьютерные манекены и модели тела. Часть 1. Общие требования. Дата введения 2011-12-01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 26 с.

3. Палатинская, И.П. Суперкомпьютерное моделирование динамических нагрузок поясничного отдела позвоночника / И.П. Палатинская, Н.Ю. Долганина, Т.Ю. Попцова // Вестник УГАТУ. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». – 2013. – Т. 17. – № 5 (58). – С. 230–236.

4. Березовский, В.А. Биофизические характеристики тканей человека: справочник / В.А. Березовский, Н.Н. Колотилов; отв. ред. и авт. предисл. Костюк П.Г. – Киев: Наук. думка, 1990. – 244 с.

5. Анатомия позвоночника. – URL: http://www.mc-profi.ru/pozvonochnik-heloveka.html.

6. ГОСТ 12.4.094-88 ССБТ. Метод определения динамических характеристик тела человека при воздействии вибрации. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 24 с.

7. Вибрации в технике: справочник: в 6 т. Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К. В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.

К содержанию

УДК 656.13:007.51 + 007.51

О МЕХАНИЗМАХ УПРАВЛЕНИЯ ФАКТОРАМИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО РИСКА ЧЕЛОВЕКА-ОПЕРАТОРА АВТОТРАНСПОРТНЫХ УСТРОЙСТВ

И.П. Палатинская

В статье рассматриваются особенности механизмов управления профессиональными рисками работников, систематизация, структурирование и анализ факторов профессионального риска на примере водителей автотранспорта. Предлагаются рекомендации по разработке мероприятий для снижения профессиональных рисков в системе управления ими.

Ключевые слова: человек-оператор автотранспортных устройств, профессиональный риск; механизмы управления профессиональными рисками.

Понятия «профессиональный риск» и «управление профессиональными рисками» введены в Трудовой кодекс РФ в 2011 году. Так, под управлением профессиональными рисками в организации понимается «комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих в себя меры по выявлению, оценке и снижению уровней профессиональных рисков (статья 209 [1]).

Целью оценки и управления профессиональными рисками является обеспечение безопасности и сохранение здоровья работника в процессе трудовой деятельности. Управление профессиональными рисками (ПР) на предприятиях «должно стать ядром превентивной системы охраны труда» [2], которое, следовательно, должно обеспечивать:

1) безопасность производственного оборудования – свойство оборудования сохранять соответствие требованиям безопасности труда при выполнении заданных функций в условиях, установленных нормативно-технической документацией;

2) безопасность производственного процесса – свойство производственного процесса сохранять соответствие требованиям безопасности труда в условиях, установленных нормативно-технической документацией.

3) безопасность трудового процесса – организация трудового процесса при его протекании в параметрах безопасности в течение всего рабочего времени.

Для того, чтобы организация могла добиться своих целей в управлении ПР, ее задачи должны быть скоординированы, что требует систематизации и структурирования механизма управления, «устанавливающим внутренние связи и учитывающим деятельность всех звеньев и работников предприятия – от рабочего до директора» [3].

Применяя понятия теории управления, рассмотрим механизмы управления факторами профессионального риска человека-оператора автотранспортных устройств. Механизм управления [3], кроме принципов и задач управления, включает в себя:

- организационную структуру управления и его персонала;
- экономические и юридические методы и ограничения;
- информацию и технические средства ее обработки.

Функционирование любого механизма управления, и конечно, управление ПР, обеспечивается администрацией предприятия, к которой относятся руководители высшего, среднего и низшего звена, а также специалисты, подготавливающие для руководителей необходимую информацию и документы. Для управления ПР человека-оператора автотранспортных устройств такой информацией являются данные, собранные из блоков А…Д (рис. 1), по следующим обязательным вопросам:

• Какие опасности возникают на работе?

• Какое оборудование, а также инструменты и технологии выполняемой работы являются причинами опасности?

• Где проявляются опасности?

• В каких ситуациях работники подвергаются опасности?

• Какова частота возникновения опасностей?

• Какова тяжесть негативного события?

• Влияют ли профессионально-личностные качества на возникновение негативного события?

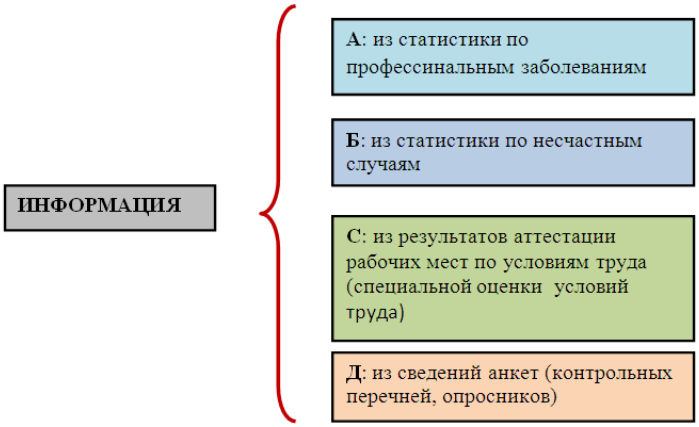


Рис. 1. Информационная база для управления профессиональными рисками

В механизмах управления ПР важное место занимают оперативное и повседневное регулирование деятельности организации и его структурных подразделений, а также выбор, планирование и выполнение мероприятий, эффективность которых зависит от распознавания факторов опасностей, определения по ним величины и значимости риска [4]. В работе [5] было предложено факторы профессионального риска водителей сформировать в следующие группы:

1) группа факторов, выявляемых из анализа результатов условий труда по гигиенической оценке, оценки травмоопасности, оценки соответствия средств индивидуальной защиты;

2) группа факторов, выявляемая из анализа индивидуальной оценки: профессионально-личностные показатели, а также профессиональные заболевания и несчастные случаи на производстве;

3) группа факторов, выявляемая из анализа данных не связанных с профессиональной деятельностью работника и производственной деятельностью организации, например, физико-географические и климатические условия, аварии, инциденты и т.д.

У водителей автотранспорта, в виду специфики их деятельности [5], наблюдаются высокие уровни травматизма и профессиональных заболеваний, которые зачастую связаны с плохим состояния дорожного покрытия, с несоблюдением режимов труда и отдыха водителей, с формальным прохождением медицинских осмотров, с неблагоприятными климатическими условиями, с профессионально-личностными качествами и др. Поэтому для таких работников предлагается по факторам второй и третьей групп более подробное группирование, таблица 1.

Далее, для разработки механизмов управления факторами ПР у водителей автотранспорта необходимо оценить количественно степень риска, частоту и тяжесть негативных событий. Считается, что если риски не оценены должным образом, не установлены связи, то не может быть начат процесс управления рисками, и, следовательно, вряд ли могут быть определены соответствующие профилактические меры [4].

Приблизительная оценка профессиональных рисков для таких работников выявила [6] очень высокие уровни частоты и значимости рисков (22,57…49,93), которые в 1,5 и более раз превышают значения по шкале «Оценки значимости рисков» ГОСТ Р 12.0.010-2009 [7], таблица 2.

Анализ значений рисков с первой по четвертую групп выявил, что вторая группа имеет максимальные показатели по значимости рисков, хотя по этой группе значимость риска оценена только по количеству несчастных случаев и профессиональных заболеваний (по стат.данным государственных докладов [6]). На результаты оценки рисков этой группы влияют все другие группы факторов. Следовательно, эта группа является итоговой по специфике трудовой деятельности водителей. А высокая значимость рисков пятой группы увеличивают значения рисков первой и второй групп. Таким образом, для человека-оператора автотранспортных устройств необходимо системно рассматривать влияние всех групп ПР.

Таблица 1

Группы факторов профессионального риска работников автотранспорта

Группы	Факторы
Первая группа	Гигиеническая оценка. Факторы – физические; – химические; – биологические; – трудового процесса
	Оценка травмоопасности. Факторы – производственное оборудование; – инструменты и приспособление; – обучение по охране труда
	Оценка обеспеченности средствами индивидуальной защиты
Вторая группа	Показатели состояния здоровья – данные медицинских осмотров работника
	Данные по профессиональным заболеваниям в организации
	Данные по несчастным случаям на производстве в организации
Третья группа	Профессионально-личностные показатели – профессиональная подготовка; – квалификация; – стаж; – внимательность; – неадекватность поведения
	Личностные качества – антропометрические данные; – образ жизни; – наличие вредных привычек и т.д.
Четвертая группа	Аварии, инциденты – другие участники движения на дорогах; – движение вблизи техногенных источников опасности (например, вблизи плотин, АЭС, магистральных трубопроводов и т.д.)
Пятая группа	Физико-географические и климатические условия
	Состояния дорожного покрытия

Высокие итоговые значения значимости рисков водителей автотранспорта требуют обязательной проработки качественных и оперативных мероприятий по их снижению. Для этого, используя предложенное группирования факторов ПР для водителей автотранспорта и значения приблизительной оценки уровней частоты и значимости факторов ПР необходимо в каждой организации разработать иерархию номенклатуры опасностей, в которой определяются:

• наиболее значимые факторы опасности, требующие более частого контроля – предсменного, внутрисменного, послесменного;

• значимые факторы опасности, требующего только ежедневного контроля;

• менее значимые факторы опасности, требующие контроля раз в неделю, месяц и т.д.

Таблица 2

Сравнение показателей рисков водителей автотранспорта со шкалой «Оценки значимости профессиональных рисков работников» ГОСТ Р 12.0.010-2009 [7]

Показатели риска по ГОСТ Р 12.0.010-2009	Интервал значений риска	$0 < R \leq 5$	$5 < R \leq 10$	$10 < R \leq 15$
	Значимость риска	Низкий	Умеренный	Высокий
Первая группа	Интервал значений риска	4,37…8,73		–
	Значимость риска	Низкий…Умеренный		–
Вторая группа	Интервал значений риска	–	–	10,2…13,2
	Значимость риска	–	–	Высокий
Третья группа	Интервал значений риска	3…7		–
	Значимость риска	Низкий …Умеренный		–
Четвертая группа	Интервал значений риска	1…7		–
	Значимость риска	Низкий…Умеренный		–
Пятая группа	Интервал значений риска	4…14		
	Значимость риска	Низкий…Высокий		

На основе полученной иерархии опасностей, затем, устанавливаются системы наблюдений за факторами ПР и планы-графики мероприятий (контролирующих, организационных, экономических и т.д.) по снижению уровней ПР. Назначаются ответственные за их выполнение, в которых учитывается роль всех звеньев от работников до руководителей. Такая организация механизмов управления ПР для человека-оператора автотранспортных устройств позволит предупреждать факторы опасностей первой и второй групп, снижать их значимость.

Библиографический список

1. «Трудовой кодекс РФ» от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 02.04.2014).
2. Единая общероссийская справочно-информационная система по охране труда. – URL: http://eisot.ru/index.php/otsenka-i-upravlenie-professionalnymi-riskami.
3. Мидюк, О.Н. Теория управления / О.Н. Мидюк, Л.В. Горьканова. – http://cde.osu.ru/demoversion/course124/tit.html.
4. Система управления охраной труда: путь к непрерывному совершенствованию. Доклад МОТ к Всемирному дню охраны труда – 2011/МОТ, Группа технической поддержки по вопросам достойного труда и Бюро МОТ для стран Восточной Европы и Центральной Азии. – М.: МОТ, 2011. – 32 с.
5. Палатинская, И.П. Анализ факторов профессионального риска работников / И.П. Палатинская // Материалы I Международной научно-практической конференции «Безопасный труд как компонент достойного труда». – Екатеринбург, 2013. – С. 23–27.
6. Палатинская, И.П. О профессиональных рисках для работников автотранспорта / И.П. Палатинская // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секция технических наук: в 2 т. – 2013. – С. 233–237.
7. ГОСТ Р 12.0.010-2009. ССБТ. Определение опасностей и оценка рисков.

К содержанию

УДК 661.66

ИЗУЧЕНИЕ АДСОРБЦИИ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ ГЕТЕРОАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ НА УГЛЕРОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

А.И. Солдатов

Исследовалось влияние химической структуры поверхности углеродного сорбента на адсорбцию азотсодержащих гетероароматических углеводородов. Показано, что наибольшее влияние оказывает показатель восстанавливающая способность.

Ключевые слова: углеродный сорбент; химическая структура поверхности; адсорбция.

Образование гетероциклических азотсодержащих ароматических углеводородов и их поступление в окружающую среду связано с микробиологическими и высокотемпературными процессами, протекающими в природе (лесные пожары, вулканическая деятельность), и антропогенными факторами (работа промышленности, сжигание топлива, транспортные выхлопы и т.п.) [1]. Эти соединения обладают высокой токсичностью и биологической (канцерогенной и мутагенной) активностью, вносят заметный вклад в загрязнение атмосферы промышленных центров наиболее опасными для

здоровья человека веществами [2]. Все эти соединения относятся ко 2-му классу опасности (высокоопасные). Для них также характерна относительная легкость попадания в организм самыми различными путями – через желудочно-кишечный тракт, при вдыхании и через кожу, причем быстро проникают даже через неповрежденные кожные покровы.

Основными представителями этой группы соединений являются пиридин, хинолин и изохинолин.

Основными источниками загрязнения окружающей среды гетероциклическими азотсодержащими ароматическими углеводородами являются предприятия, на которых они применяются как растворители, а также при производстве каменноугольного кокса, красителей, пестицидов, лекарственных препаратов, полимеров и пластиков, каучуков, углеродных конструкционных материалов и т.д.

При введении заместителя в данные соединения их биологическая активность, соответственно и опасность, заметно возрастают. Ведь не зря подавляющее большинство лекарственных препаратов, алкалоидов и наркотических веществ являются производными именно этих гетероциклов [3, 4].

В последнее время при выборе методов очистки различных систем от органических загрязнителей всё чаще отдается предпочтение адсорбционной технологии. Целесообразность её применения в первую очередь определяется наличием эффективного сорбента. В качестве сорбентов в промышленности используют искусственные и природные вещества, обладающие развитой поверхностью.

Один из широко используемых методов очистки – это метод, основанный на применении углеродных сорбентов. В настоящее время этот метод является достаточно перспективным, требующим тщательного изучения при его проведении [5, 6].

Для удаления самых разных групп загрязнителей широкое применение находят углеродные сорбенты, основным недостатком которых является широта спектра сорбируемых веществ. Для повышения селективности необходимо, прежде всего, установить влияние структуры поверхности углеродных сорбентов на адсорбцию данных соединений, что и являлось целью настоящей работы.

Для исследования были взяты следующие материалы: активированные угли (АГ-2, СУ, ДрУ, ОУ-А) и термоантрациты ЦОФ «Обуховская».

Материалы 1–4 (табл. 1) не подвергались механическому воздействию. Материалы 5–12 (табл. 1) измельчались различными способами: на валковой дробилке, механической ступке и виброистирателе, соответственно, раздавливанием, ударом и истиранием. Измельчение в ступке производилось в течение 10 минут (пробы 10, 11 табл. 1). При измельчении в виброистирателе время диспергирования варьировали от 1 до 15 минут (пробы 5–9 табл. 1). Материалы, измельченные совместно с фенолом (пробы 8, 11 табл. 1), отмывали от избытка последнего бензолом, далее экстрагировали не адсорбировавшийся фенол подщелоченной водой и сушили при комнатной температуре.

Свойства углеродной поверхности оценивали по следующим показателям: величине удельной поверхности, суммарному содержанию кислотных групп, карбонильных групп, pH водной вытяжки, восстанавливающей способности (табл. 1). Показатели определялись по стандартным методикам [7, 8].

В качестве исследуемых веществ были взяты пиридин, изохинолин, хинолин и его метильные производные. Адсорбция проводилась из уксусной кислоты при стандартных условиях – комнатная температура, время адсорбции 1 час. Показатель адсорбции рассчитывался по изменению концентрации сорбируемого вещества до и после адсорбции. Концентрация определялась методом титрования хлорной кислотой в уксусе с индикатором метиловым фиолетовым. Данные по адсорбции представлены в табл. 2.

Таблица 1

Характеристика поверхности исследуемых углеродных сорбентов

Проба	Углеродный сорбент	Удельная поверхность, $см^2/г$	Восстанавливающая способность, 10^{-5} мг-экв/$см^2$	Кислотные группы, 10^{-3} мг-экв/$см^2$	Карбонильные группы, 10^{-3} мг-экв/$см^2$	pH водной вытяжки
1	АГ-2	4145	8,8	0,63	0,4	9,06
2	СУ	1266	6,95	1,8	1,5	2,15
3	ДрУ	4878	5,06	1,3	2,35	2,87
4	ОУ-А	33200	0,27	0,35	0,03	6,50
5	ТА Обуховский (вибро 1′)	1979	3,04	5,5	0,17	6,98
6	ТА Обуховский (вибро 5′)	7732	0,79	1,4	0,06	7,02
7	ТА Обуховский (вибро 10′)	10510	0,59	1,9	0,21	6,76
8	ТА Обуховский (вибро 10′, 0,1 г фенола)	10510	0,73	2,6	0,36	7,50
9	ТА Обуховский (вибро 15′)	11750	0,61	2,5	0,07	7,15
10	ТА Обуховский (ступка)	1689	4,14	2,2	1,0	6,54
11	ТА Обуховский (ступка, 0,1 г фенола)	1689	3,83	0,08	0,03	7,08
12	ТА Обуховский (валковая)	1051	3,74	0,6	0,09	7,24

Сопоставление показателя адсорбции каждого из исследуемых веществ с характеристиками поверхности углеродных сорбентов, позволяет заключить, что адсорбция ароматических азотсодержащих гетероциклов на углеродном сорбенте зависит от значения восстанавливающей способности поверхности.

Способность к адсорбции на углеродных материалах для исследуемых соединений возрастает в ряду:

пиридин < 2,6-диметилхинолин < 2-метилхинолин <

< 6-метилхинолин < хинолин < 8-метилхинолин < изохинолин.

Для обоснования представленного выше ряда был произведен квантово-химический расчет молекулярных энергий ионизации и сродства к электрону исследуемых веществ (табл. 3). Расчет проводился с использованием пакета программ «HyperChem» методом MNDO–PM3.

Из анализа данных по расчету следует, что для всех адсорбируемых молекул более выгодным является переход в анионную форму, а не в катионную, т.е. в данном процессе поверхность, будет выступать в роли донора электронов, а ароматическая молекула в роли их акцептора [9]. При этом анионная форма легче образуется в бициклических системах, например, нуклеофильное присоединение идет гораздо легче, чем в пиридине [10], соответственно, легче будет протекать и процесс их адсорбции на углеродной поверхности.

Таблица 2

Адсорбция исследуемых веществ на углеродных сорбентах, 10^{-5} моль/см^2

Проба	Углеродный сорбент	Изохинолин	8-метилхинолин	Хинолин	6-метилхинолин	2-метилхинолин	2,6-диметилхинолин	Пиридин
1	АГ-2	6,01	4,99	4,53	3,60	2,96	2,07	1,01
2	СУ	4,70	4,04	3,49	2,81	2,31	1,79	0,32
3	ДрУ	2,85	2,36	1,96	1,65	1,00	0,68	0,11
4	ОУ-А	0	0	0	0	0	0	0
5	ТА Обуховский (вибро 1′)	1,45	1,08	0,75	0,33	0,1	0	0
6	ТА Обуховский (вибро 5′)	0,23	0,04	0,02	0	0	0	0
7	ТА Обуховский (вибро 10′)	0,124	0	0	0	0	0	0
8	ТА Обуховский (вибро 10′, 0,1 г фенола)	0,202	0	0	0	0	0	0
9	ТА Обуховский (вибро 15′)	0,152	0	0	0	0	0	0
10	ТА Обуховский (ступка)	2,24	1,67	1,36	1,11	0,79	0,40	0,06
11	ТА Обуховский (ступка, 0,1 г фенола)	1,93	1,51	1,23	0,82	0,62	0,23	0
12	ТА Обуховский (валковая)	1,90	1,37	1,19	0,81	0,46	0,10	0

Однако кроме сродства к электрону большое значение имеет и энергия активации этого процесса, т.к. адсорбция исследуемых соединений имела место не на всей серии углеродных сорбентов. Можно предположить, что если активационный барьер относительно высокий, то адсорбция исследуемых веществ не происходит, т.к. не хватает силы восстанавливающей способности поверхности сорбента, чтобы его преодолеть и, следовательно, образовать анионную форму для данных соединений, например, если

– значение восстанавливающей способности меньше $0{,}5 \cdot 10^{-5}$ мг-экв/см^2, то адсорбция изохинолина не происходит;

– показатель восстанавливающей способности углеродной поверхности меньше $4 \cdot 10^{-5}$ мг-экв/см^2, то адсорбция пиридина не происходит;

– восстанавливающая способность меньше предела $3–4 \cdot 10^{-5}$ мг-экв/см^2, то адсорбция 6-метилхинолина, 2-метилхинолина и 2,6-диметилхинолина не наблюдается;

– значение восстанавливающей способности около $8 \cdot 10^{-5}$ мг-экв/см^2, то адсорбция 8-метилхинолина и хинолина наименьшая.

Таблица 3

Расчетные молекулярные энергии ионизации и сродства к электрону исследуемых гетероциклических ароматических молекул

Вещество	Энергия ионизации, ккал/моль	Сродство к электрону, ккал/моль
Изохинолин	203,54	22,89
8-метилхинолин	198,90	22,52
Хинолин	204,91	22,50
6-метилхинолин	201,54	22,17
2-метилхинолин	201,87	22,02
2,6-диметилхинолин	198,20	21,71
Пиридин	226,08	4,49

Таким образом, как и в случае адсорбции полиароматических соединений [11, 12], за счет регулирования показателя восстанавливающей способности поверхности углеродного материала, возможно изменение селективности сорбента по отношению к различным конденсированным ароматическим системам, т.е. контролировать их адсорбцию.

Выводы

1. Показано, что адсорбция ароматических азотсодержащих гетероциклов зависит от показателя восстанавливающей способности углеродной поверхности. Возрастание показателя восстанавливающая способность для углеродного сорбента увеличивает их адсорбционную способность.

2. Установлено, что для ароматических азотсодержащих гетероциклов, повышение сродства к электрону ведет к росту их адсорбции на углеродном сорбенте.

3. Показано, что для оценки активационных барьеров процесса адсорбции азотсодержащих гетероциклов может быть использован минимальный показатель восстанавливающей способности поверхности, при котором еще происходит адсорбция. Высоким барьером характеризуется пиридин, низким – изохинолин, остальные вещества обладают промежуточным значением этого барьера.

Библиографический список

1. Polynuclear Aromatic Compounds: Chemical, Environmental and Experimental Data. Vol. 32.– Lion: IARC, 1983.– 447 p.

2. Майстренко, В.Н. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей / В.Н. Майстренко, Н.А. Клюев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. – 323 с.

3. Вредные вещества в промышленности: Справочник для химиков, инженеров и врачей. В 3 т. / под общ. ред. Н.В. Лазарева. – Л.: Химия, 1976–1977.

4. Вредные химические вещества. Справочное изд.: Азотсодержащие органические соединения / под ред. В.А. Филова. – Л.: Химия, 1992. – 432 с.

5. Беляева, О.В. Исследование адсорбционного извлечения пиридина из водных растворов активными углями: дис… канд. хим. наук / О.В. Беляева. – Кемерово, 2005. – 141 с.

6. Кирсанов, М.П. Разработка и применение адсорбционных процессов в технологиях очистки сточных и природных вод от кислород-, азот- и хлорсодержащих органических соединений: дис. ... д-ра техн. наук / М.П. Кирсанов. – Кемерово, 2007.– 247 с.

7. Практическое руководство по методам контроля качества сырья для производства углеграфитовых материалов. – М.: Минцветмет, 1982. – 144 с.

8. Boehm, H.P. Some Aspects of the Surface-Chemistry of Carbon-Blacks and Other Carbons / H.P. Boehm // Carbon – 1994. – V. 32, № 5. – Pp. 759–769.

9. Жданов, Ю.А. Теория строения органических соединений / Ю.А. Жданов. – М.: Высшая школа, 1971. – 288 с.

10. Джоуль, Дж. Основы химии гетероциклических соединений / Дж. Джоуль, Г. Смит. – М.: Мир, 1975. – 398 с.

11 Солдатов, А.И. Регулирование селективности углеродного сорбента при адсорбции ПАУ / А.И. Солдатов // Наука ЮУрГУ: материалы 62-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Т. 2. – С. 106–109.

12. Marcus, F. Effect of chemical surface geterogeneity on the adsorption mechanism of dissolved aromatics of activated carbon / Franz Marcus, Hassan A. Arafat, Neville G. Pinto // Carbon. – 2000. – V. 38. – Pp. 1807–1819.

К содержанию

УДК 612.014.424 + 621.315.1

ПРИМИНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ КАРТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭП ВДОЛЬ ВЛЭП 500 КВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛИНЕЙНОГО ПЕРСОНАЛА

А.И. Сидоров, С.Ш. Таваров

В статьи рассматривается использование методики расчета напряженности электрического поля вдоль воздушных линий электропередач напряжением 500 кВ, учитывающую орографию местности с использованием данной методики припостроение расчетных карт распределения напряженности электрического поля вдоль воздушных линий электропередач напряжением 500 кВ с применением вычислительного кластера для защиты линейного персонала.

Ключевые слова: электрическое поле, воздушные линий электропередач, орография местности, линейный персонал.

В Республики Таджикистан общая протяжённость существующих линий электропередачи напряжением 500 кВпостроенных во времена Советского Союза, составляет 115 км.

После отключения Республики Таджикистан от Единой энергетической системы перед правительством страны, в связи с увеличением в последние годы электропотребления, была поставлена задача строительства новых линий электропередачи 500 кВ для обеспечения электроэнергией крупных городов Республики Таджикистан. Для обеспечения электроэнергией энергодифецитной северной части страны в 2009 году были построенные две линии напряжением 500 кВ с общей протяжённостью 263,5 км. В данный момент, согласно проекту CASA – 1000, в стране запланировано к 2015 построить продолжения линий 500 кВ Худжанд – Датка (Кыргызстан) – Алматы (Казахстан) и Рогун – Сангтуда – Кундуз – Кабул – Пешавар.

Линии электропередачи напряжением 500 кВ проходят в северной части Таджикистана по местности, где возвышения над уровнем моря имеют отметки от 1500 до 2500 м, а в юго – западной – до 1000 м.

Отмеченные особенности позволяют сделать вывод, что применение общепринятых методов расчета распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ [1] приведёт к значительным погрешностямв связи с тем что данные методы применимы при идеально ровной поверхности земли относительно проводов фаз, а проведение измерений по методикам [2] для определения значения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль линий электропередач 500 кВ, с учетом условий применения приборов, будет ограничиваться периодом возможных измерений и сопровождаться большими трудозатратами.

С учетом сказанного предлагается построение расчетных карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ по мето-

дики [3] расчетным путем с представлением орографии местности в цифровом виде и учет изменения орографии местности вдоль пролетов ВЛЭП в программе MechanicalAPDL (ANSYS 13) с применением вычислительного кластера «СКИФ Аврора – ЮУрГУ».

Для более схожий с условиями местности Республики Таджикистан для пролетов № 2 подстанции «Приваловская» и подстанции «Златоуст» по методике [3] были построенный расчетные кривые изменения напряженности ЭП для участков с наиболее характерным рельефом местности (рис. 1–2).

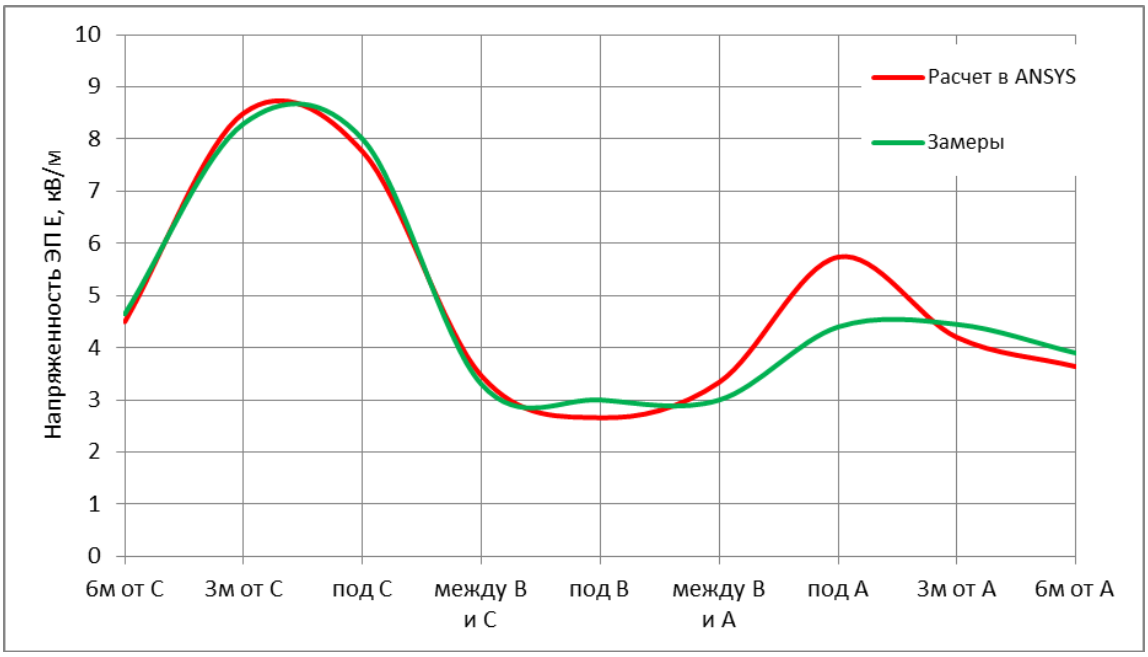


Рис. 1. Расчетные кривые изменения напряженности ЭП для участка с X=60 м пролета №2 п/ст «Приваловская»

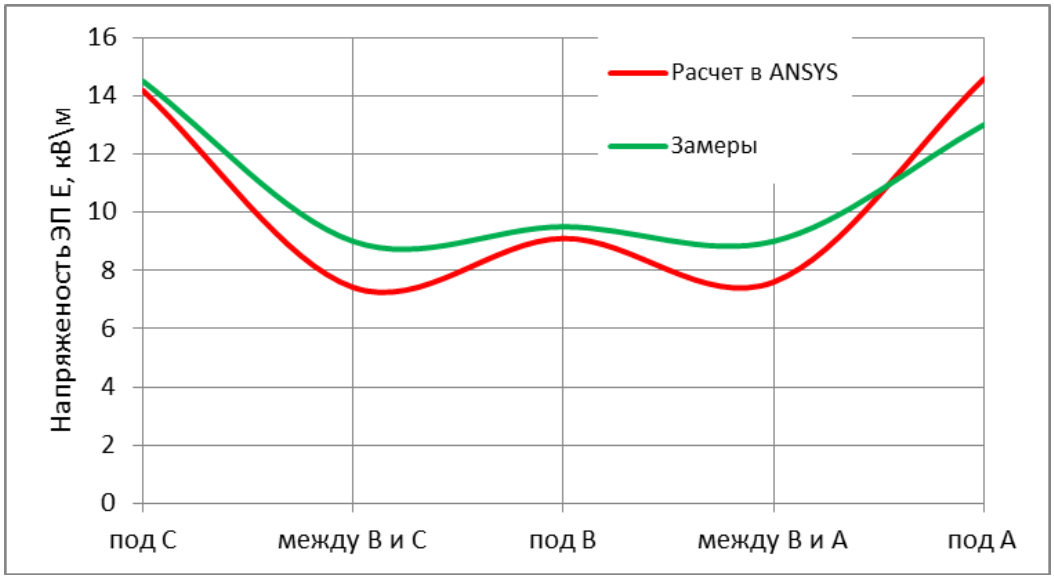


Рис. 2. Расчетные кривые изменения напряженности ЭП для участка с X=240 м пролета №2 п/ст «Златоуст»

По полученным кривым видно что под фазами А наблюдается несколько изменения значение напряженности ЭП полученные расчетным путем в программе MechanicalAPDL (ANSYS 13) с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора – ЮУрГУ» данное превышение не превышает допустимых ±20 % от измеренных [2].

Ниже на (рис. 3–4) приведены расчетные кривые изменения напряженности ЭП вдоль данных пролетов под фазой С полученные расчетным путем с сопоставлением кривыми изменения напряженности ЭП вдоль данных пролетов полученные в результате измерения [2].

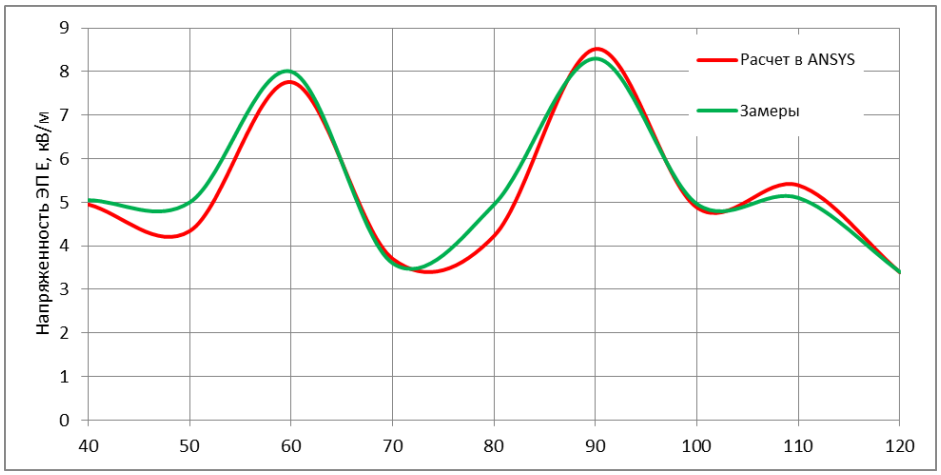


Рис. 3. Расчетные кривые изменения напряженности ЭП вдоль пролетов № 2 п/ст «Приваловская» под фазой С

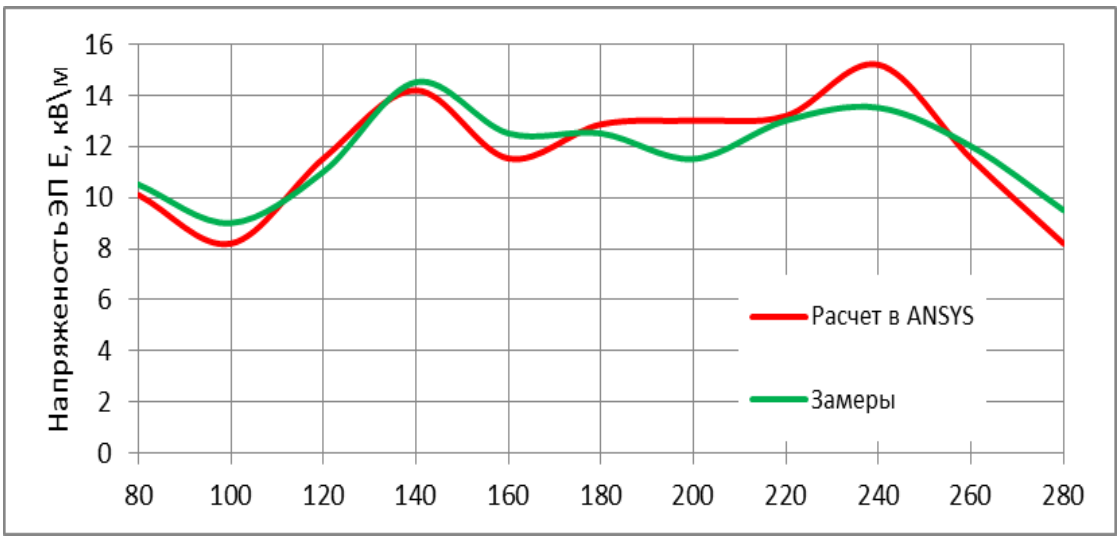


Рис.4. Расчетные кривые изменения напряженности ЭП вдоль пролетов № 2 п/ст «Златоуст» под фазой С

По расчетным кривым изменениям напряженности ЭП вдоль пролетов № 2 под фазами С наблюдается незначительное изменения напряженности ЭП полученное расчетным путем по отношению к измеренным. Относительная погрешность составляет от 6 до 9 % от измеренного значения[2], что является приемлемым.

Ниже на (рис. 5–6) приведены 3-х мерные карты распределения напряженности электрического поля вдоль данных пролетов построенные по полученным данным с применением методики [3] с использованием программы MechanicalAPDL (ANSYS 13) с помощью вычислительного кластера «СКИФ Аврора – ЮУрГУ».

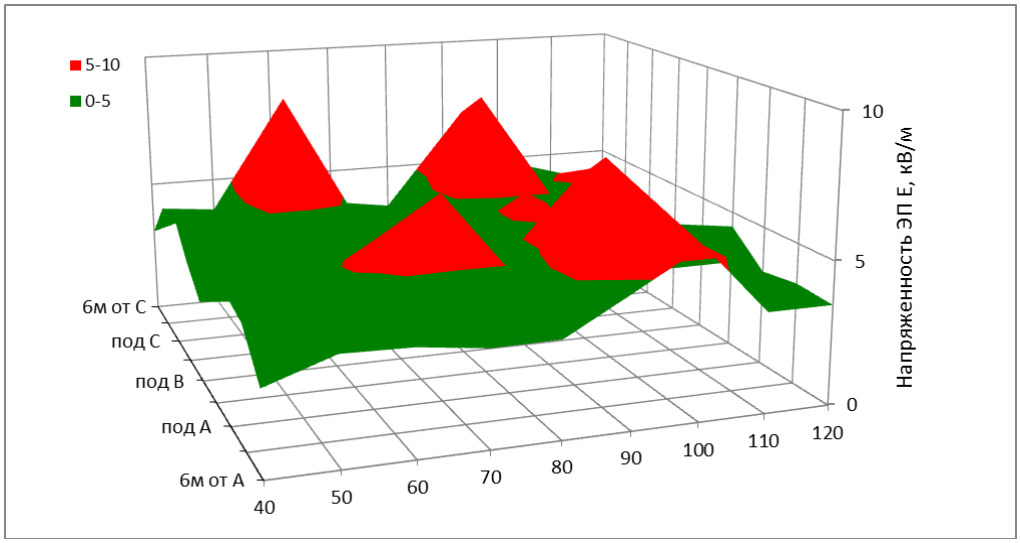


Рис. 5. Карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ пролета № 2 подстанция «Приваловская»

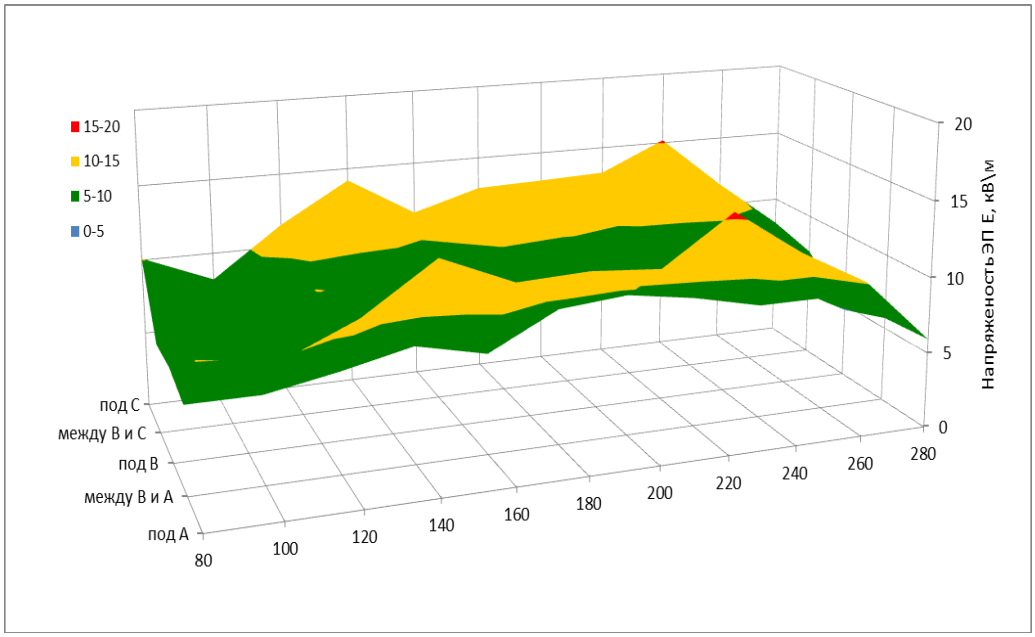


Рис. 6. Расчетная карта распределения напряженности ЭП вдоль ВЛЭП 500 кВ под пролетом № 2 подстанция «Златоуст»

Вывод

Таким образом, полученные расчетные карты распределения напряженности электрического поля промышленной частоты вдоль линий электропередачи напряжением 500 кВ расчетным путем могут быть применимы при разработке мероприятий по защите линейного персонала с учетом орографии местности Республики Таджикистан.

Библиографический список

1. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках / П.А. Долин. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.

2. Сидоров, А.И. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения: монография / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская. – Челябинск: Изд-во: ЮУрГУ, 2008. – 204 с.

3. Сидоров, А.И. Построение карт распределения напряженности электрического поля вдоль ВЛЭП 500 кВ Республики Таджикистан / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, С.Ш. Таваров // Вестник Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Серия «Энергетика». – 2014. – № 1(25). – С. 56–59.

К содержанию

УДК 331.456 + 658.382.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЗРЫВООПАСНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БЛОКОВ ТОВАРНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ПРИ ОБОСНОВАНИИ БЕЗОПАСНОСТИ

А.В. Хашковский

Приведены последовательность и результаты определения значений энергетических показателей взрывоопасности на примере товарно-сырьевой базы, в составе которой используется как стандартное так и нестандартное оборудование характерное для нефтебаз, и ведутся технологические процессы транспортировки, переработки и хранения нефтепродуктов. Даны практические рекомендации по обоснованию промышленной безопасности технологических блоков.

Ключевые слова**:** анализ риска аварий, обоснование безопасности, промышленная безопасность, технологические блоки, взрывоопасность, опасный производственный объект.

Широкое применение углеводородного топлива связано с соблюдением требований промышленной безопасности на предприятиях, связанных с добычей, транспортировкой, переработкой и хранением нефти и газа. Такие предприятия, в соответствии с законодательством о промышленной безопасности в Российской Федерации относятся к опасным промышлен-

ным объектам (ОПО). В новой редакции закона о промышленной безопасности ОПО [4], принятого в целях повышения инвестиционной привлекательности отраслей российской промышленности, законодательно введен принципиально новый документ – обоснование безопасности ОПО. Такой документ должен содержать сведения о результатах оценки риска аварии на опасном производственном объекте (ОПО), проводимой в соответствие с [1, 3] и содержащей определение значений энергетических показателей взрывоопасности технологических блоков ОПО. Для этого требуется провести оценку энергетического уровня каждого технологического блока и определить расчетом категорию его взрывоопасности, а затем по расчетным значениям относительных энергетических потенциалов и приведенной массе парогазовой среды установить категории взрывоопасности технологических блоков [2]. В статье приведены результаты определения значений энергетических показателей взрывоопасности на примере товарно-сырьевой базы, в составе которой используется как стандартное оборудование характерное для нефтебаз, так и нестандартное (установка ЛФ17 УСН) и ведутся технологические процессы транспортировки, переработки и хранения нефтепродуктов.

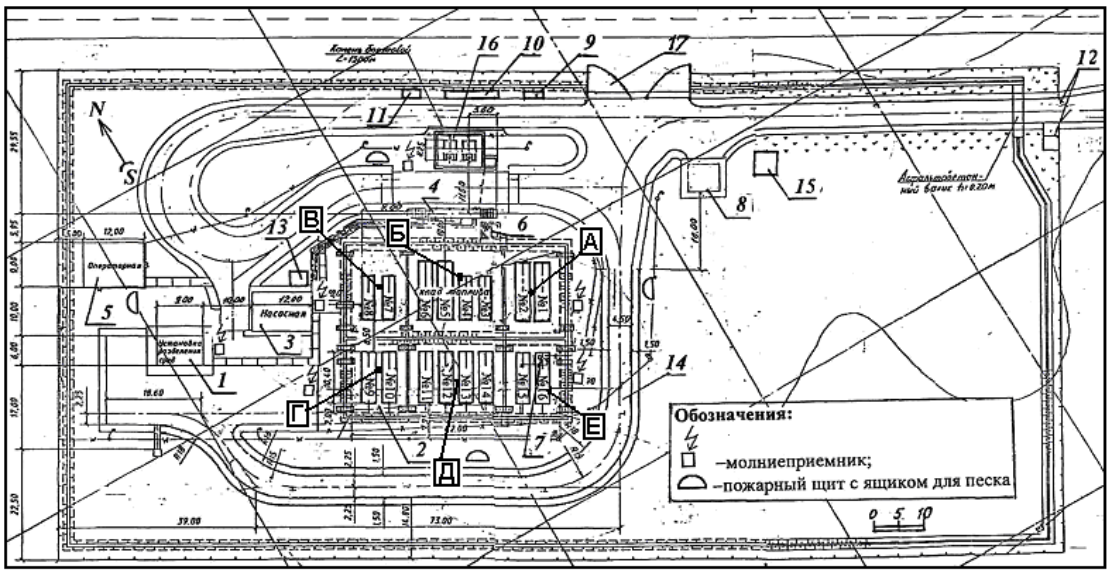


Рис. 1. План размещения помещений и технических объектов на территории нефтебазы: 1 – установка разделения сред ЛФ 17 УСН (блок № 17); 2 – склад топлива ёмкостью 1000 м^3 (А,Б,В,Г,Д,Е – секции склада), (блоки №№ 1–16); 3 – насосная станция (блок № 20); 4 – наливная эстакада (блок № 18); 5 – операторная; 6 – подземный резервуар аварийного слива; 7 – подземный резервуар для сбора ливневых стоков; 8 – ящик для нефтеотходов; 9 – электроподстанция КТП-160; 10 – вагончик (помещение для начальника нефтебазы и охраны); 11 – склад; 12 – запасные ворота; 13 – электрощитовая; 14 – дороги; 15 – пожарный резервуар; 16 – сливное устройство (блок № 19); 17 – основные ворота

Назначение товарно-сырьевой базы (далее, нефтебазы) – прием нефти, газового конденсата стабильного, переработка нефти, газового конденсата стабильного с целью получения товарного нефтепродукта (бензин промышленного назначения, дизтопливо, печное топливо), применение мазута и печного топлива в качестве топлива, хранение сырьевых и товарных нефтепродуктов, а также оптовый отпуск товарных нефтепродуктов. Используемый вид транспортировки нефтепродуктов для приёма и при отпуске – автомобильный (автоцистерна) и технологические трубопроводы. На территории нефтебазы (размер в плане 100х200 м) расположены (рис. 1):

- установка разделения сред ЛФ17 УСН (1);
- склад топлива, емкостью 1000 м^3 (2);
- насосная станция (3);
- наливная эстакада (4);
- операторная (5);
- подземный резервуар аварийного слива (6);
- подземный резервуар для сбора ливневых стоков (7);
- ящик для нефтеотходов(8);
- электроподстанция (9);
- вагончик (помещение для начальника нефтебазы и охраны) (10);
- склад (11);
- электрощитовая (13);
- дороги (14);
- пожарный резервуар (15);
- сливное устройство (16);
- основные ворота (17).

На складе топлива в шести секциях (А,Б,В,Г,Д,Е) размещены резервуары, для хранения нефтепродуктов (табл. 1).

В качестве технологических блоков нефтебазы выделены (рис. 1, 2):

№№ 1–16, это резервуары склада топлива (по числу резервуаров 16 технологических блоков);

№ 17 – установка разделения сред ЛФ17 УСН;

№ 18 – сливное устройство;

№ 19 – наливная эстакада;

№ 20 – насосная станция.

Энергетический потенциал взрывоопасности E блоков нефтебазы определялся в соответствии с [2]. При этом из шести составляющих энергетического потенциала четыре равны нулю или их вклад весьма мал.

Этими составляющими являются:

$E_1^{'}$ = 0, так как внутри блоков давление или атмосферное или незначительное (мене 0,02 МПа);

$E_2^{'}$ = 0, так как по технологическому регламенту любой блок связан трубопроводом только с блоком переработки сырья, или другим резервуа-

ром, работающим в стационарном режиме и содержащем незначительно количество нефтепродукта; кроме того, этот трубопровод автоматически перекрывается в случае аварийной ситуации;

$E_1^{''}$ = 0, так как эта составляющая учитывается лишь для жидкостей с низкой (ниже температуры хранения) температурой кипения и хранящейся, по этому, при повышенных давлениях;

$E_2^{''}$ условно принимаем равной нулю, так как испарение разлитой жидкости за счет тепла экзотермических реакций горения «первичной» парогазовой фазы (ПГФ) нами будет учтено при вычислении величины $E_4^{''}$;

$E_3^{''}$ = 0, так как в емкости, содержащей нефтепродукт, нет технологического теплоносителя.

Таблица 1

Распределение нефтепродуктов по резервуарам склада топлива

Секция склада	Номер резервуара	Ёмкость, м^3	Вид нефтепродукта
А	1	100	Газовый конденсат
	2	100	Газовый конденсат
Б	3	50	Бензиновые фракции
	4	50	Бензиновые фракции
	5	100	Печное топливо
	6	100	Печное топливо
В	7	50	Печное топливо
	8	50	Мазут
Г	9	60	Печное топливо
	10	60	Печное топливо
Д	11	60	Печное топливо
	12	60	Печное топливо
	13	60	Бензиновые фракции
	14	60	Бензиновые фракции
Е	15	60	Газовый конденсат
	16	60	Газовый конденсат

Таким образом, энергетический потенциал любого технологического блока нефтебазы следует оценивать по формуле:

$$E = E_4^{''}, \text{ кДж.}$$

Энергия сгорания ПГФ, образующейся при испарении разлитой горючей жидкости (ЖФ) за счет теплопередачи от окружающей среды, определяется по формуле:

$$E_4^{''} = G_{\Sigma}^{''} q'.$$

Здесь $q^{'}$ = 43100 кДж/кг - удельная теплота сгорания паров нефтепродукта (принимаем для бензина). Масса образующихся при испарении паров складывается из массы ПГФ $G_4^{''}$, образующейся в результате теплообмена с подложкой (пол, поддон, грунт и др.), и массы $G_5^{''}$, образующейся в результате нагревания пламенем $G_{\Sigma}^{''} = G_4^{''} + G_5^{''}$.

Первое слагаемое $G_4^{''} = 2\frac{T_o - T_k}{r}\frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}}F_{\Pi}\sqrt{\tau_{и}} \approx 0$. Это объясняется тем, что в условиях хранения нефтепродукта его температура (T_k) практически равна температуре подстилающей поверхности (T_o). Второе слагаемое:

$$G_5^{''} = m_{и} F_{ж} \tau_{и},$$

где $\tau_{и}$ – время испарения, с; $F_{ж}$ – площадь зеркала пролитой жидкости, м^2; $m_{и}$ – скорость испарения, кг/(м^2·с).

Скорость испарения, для нефтепродукта при температуре воздуха 40 ^{0}C и скорости ветра 1 м/с определяется по формуле:

$$W = 10^{-6} \cdot \eta\sqrt{M} \cdot P_{н},$$

где: η – коэффициент, принимаемый по табл.1 [2] , в зависимости, от скорости воздушного потока и температуры воздуха; M – молекулярная масса кг·кмоль$^{-1}$ (для смесей принимается наибольшее значение молекулярной массы соответствующего компонента); $P_{н}$ – давление насыщенного пара при расчетной температуре, определяемое в данном случае по формуле:

$$P_{н} = 0{,}133 \cdot 10^{\left(A - \frac{B}{C_A + t_p}\right)}, \text{ кПа},$$

где: A, B, C_A – константы уравнения Антуана; t_p – температура воздуха.

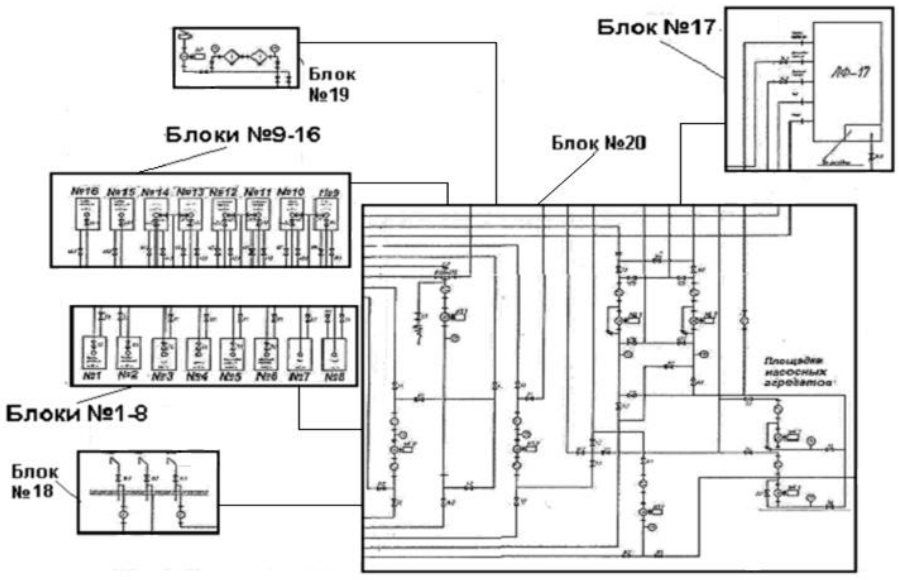


Рис. 2. Технологическая блок-схема нефтебазы

Соответственно получим (для бензина АИ-93, летнего):

$$P_н = 0{,}133 \cdot 10^{\left(A - \frac{B}{C_A + t_p}\right)} = 0{,}133 \cdot 10^{\left(5{,}0 - \frac{664{,}976}{221{,}7+40}\right)} = 0{,}133 \cdot 10^{2{,}46} = 38{,}36 \quad \text{кПа}.$$

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_н = 10^{-6} \cdot 4 \cdot \sqrt{98{,}2} \cdot 38{,}36 = 1520{,}5 \cdot 10^{-6}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

После вычисления E, для определения категории взрыво-пожароопасности блоков определим относительный энергетический потенциал по формуле:

$$Q_в = \frac{1}{16{,}534}\sqrt[3]{E},$$

и приведённую массу по формуле:

$$m = \frac{E}{4{,}6 \cdot 10^4}.$$

Используя приведённые формулы и полагая, что для рассмотренных технологических блоков разлившийся нефтепродукт заполнит обвалованное пространство с площадью испарения F и будет испаряться в течение 3600 с, вычислим массу испарившегося нефтепродукта G_5'' для каждого блока, величину энергетического потенциала E и относительного энергетического потенциала Q_B, приведённую массу m, оценим категорию взрыво-пожароопасности блоков и определим радиус R_0 (табл. 2).

Таблица 2

Приведённая масса испарившегося нефтепродукта для каждого блока, величина энергетического потенциала и относительного энергетического потенциала

№ блока	Площадь испарения F, м2	Масса G_5'' кг	Энергетический потенциал E, кДж	Относительный энергетический потенциал QB	Приведённая масса m, кг	Категория взрыво-пожароопасности блоков и радиус R0, м, [2]
1,2,7,8, 9, 10,15,16	204	1116,6	$4{,}81 \cdot 10^7$	21,97	1046	III; 0,894
3,4,5, 6,11, 12,13,14	336	1840	$7{,}168 \cdot 10^7$	25,1	1758	III; 1,165
17	130	711	$3{,}064 \cdot 10^7$	18,9	666,1	III; 0,66
18	150	821	$3{,}54 \cdot 10^7$	19,8	769	III; 0,73
19	150	821	3,54·107	19,8	769	III; 0,73
20	120	657	2,83·107	18,43	615	III; 0,627

Анализ данных таблицы 2 показывает, что категория пожаро-взрывоопасности любого из блоков нефтебазы не превышает третьей. Это означает, что при эксплуатации блоков нефтебазы должны быть выполнены требования «Общих правил…» [2], например:

– для технологических блоков II и III категории взрывоопасности – установка запорных и (или) отсекающих устройств с дистанционным управлением и временем срабатывания не более 120 секунд, при этом должны быть обеспечены условия безопасного отсечения потоков и исключены гидравлические удары;

– для технологических блоков всех категорий взрывоопасности и (или) отдельных аппаратов, в которых обращаются взрывопожароопасные продукты, предусматриваются системы аварийного освобождения, которые комплектуются запорными быстродействующими устройствами;

– системы аварийного освобождения технологических блоков I и II категорий взрывоопасности обеспечиваются запорными устройствами с автоматически управляемыми приводами, для III категории блоков разрешено применение средств с ручным приводом, размещаемым в безопасном месте, и минимальным регламентированным временем срабатывания.

Библиографический список

1. Положение о разработке планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах. Утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 26 августа 2013 г. № 730.

2. Приказ Ростехнадзора от 11.03.2013 № 96 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» (Зарегистрировано в Минюсте России 16.04.2013 № 28138).

3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. «Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта». Утверждены приказом Ростехнадзора от 15.07.2013 № 306.

4. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (с изменениями на 4 марта 2013 года), (редакция, действующая с 1 июля 2013 года).

К содержанию

УДК 378.04 + 37.048.45
ББК Ч420.053.6 + Ч448.44

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ В СФЕРЕ ПРОФОРИЕНТАЦИИ

К.С. Буров

На основе существующих педагогических предпосылок, в статье описывается модель взаимодействия образовательных организаций общего и профессионального образования по вопросам профориентации в содержательном, результативном и организационном аспектах. При этом данные аспекты уточняются для уровней учебно-педагогического, профессионально-педагогического и административного уровней, что может служить основанием Данные сведения представляют собой основание для проектирования организации и содержания взаимодействия образовательных организаций по вопросам профессиональной ориентации и сопровождению профессионального выбора учащихся на основе социально-педагогического партнерства.

Ключевые слова: модель взаимодействия образовательных организаций в сфере профориентации, профессиональное самоопределение, профориентационная деятельность образовательных организаций.

Феномен профессионального самоопределения личности, в современной действительности приобретает новые свойства в свете реализации концепции «образования через всю жизнь». Профессиональное самоопределение следует рассматривать как процесс поэтапного принятия решений по согласованию личностных и общественных интересов, и выбору направления профессиональной деятельности и соответствующего уровня образования. При этом, существует определенный социальный заказ на эту деятельность со стороны органов управления образованием, учреждений высшего профессионального образования, работодателей, администрации школ, учащихся, родителей [6].

В своих статьях мы уже говорили о разобщенности усилий образовательных организаций в профориентацонной деятельности, а также ставили проблему взаимодействия образовательных организаций, выполняющих роль координационных центров, имеющих соответствующую инфраструктуру, ресурсы, практически осуществляющих принцип «образование через всю жизнь». Взаимодействие субъектов образования, на наш взгляд – это явление, которое характеризует социальные связи, продуктивно проявляющие себя в сотрудничестве между субъектами образования, опирающимся на единство целей в решении актуальных проблем, внутренние и интегрированные ресурсы этих субъектов, сопровождающееся передачей информации, возникновением и развитием взаимосвязанных устойчивых

структур и систем [1]. Как отмечается в научных работах, с точки зрения педагогической науки взаимодействие образовательных организаций целесообразно выстаивать на концептуальных принципах непрерывности, преемственности, системности взаимодействия [1, 3, 4]. Это предполагает упорядочение деятельности в сфере профориентации в соответствие с типовой моделью имеющей инвариантные и вариативные компоненты, которые можно будет реализовывать в зависимости от условий конкретного образовательного учреждения, или выстраивать на их основе сетевое взаимодействие [2]. Идеальная модель взаимодействия образовательных организаций, должна быть построена таким образом, чтобы могли быть реализованы все потребности основных ее субъектов.

Как известно модель – это отражение реальных объектов или процессов, аккумулирующих в себе наиболее существенные структурные элементы и связи этого реального объекта (процесса). В соответствие с системных подходом, любая модель будет носить признаки системности, следовательно ее необходимо описать в морфологическом, структурном, функциональном и генетическом аспектах [5].

Исходя их педагогических предпосылок организации взаимодействия, его виды в системе образования можно классифицировать по уровням (административно-управленческое, профессионально-педагогическое, учебно-педагогическое) [1]. Следовательно, нашу модель следует представить на трех уровнях: учебно-педагогическом, профессионально-педагогическом и административном. На каждом уровне необходимо выделить морфологические элементы: цель и задачи, структуру субъектов, их функции, содержание деятельности, и результаты на которые данная деятельность направлена. Это будет соответствовать описанию модели в морфологическом, структурном, функциональном и генетическом аспектах на каждом уровне. В соответствие с гуманно ориентированным подходом цели, содержание и организационные формы должны учитывать социальный заказ на развитие учащихся в аспекте их подготовки к выбору профессии. Следовательно, наиболее важным здесь является цели, содержание и организация учебно-педагогического взаимодействия. Профессионально-педагогическое и административное взаимодействие при этом будет направлено на сопровождение данной деятельности [1, 3].

Целью учебно-педагогического взаимодействия будет служить развитие готовности к выбору профессии. Задачами: подготовка к выбору профессии, подготовка к выбору направления профессионального образования. Содержание учебно-педагогического взаимодействия может описываться модульной программой для учащихся: «Содействие профессиональному самоопределению и выбору направления профессионального образования». Программа проектируется с учетом модульного и компетентностного подходов и может реализовываться на разных этапах образования, обеспечивая при этом преемственность в целях и результатах.

В результате освоения учащиеся повышают уровень готовности к выбору профессии, т.е. готовы определиться с выбором направления профессионального образования.

Устойчивой структурой, совместным субъектом курирующим деятельность могут выступать образовательные округа, включающие ряд образовательных организаций, объединенных общей целью, при ведущей роли учреждения высшего образования.

Формы учебно-педагогического взаимодействия: освоение основной образовательной программы в рамках ФГОС, углубленное изучение предметов, профильное обучение, научная работа учащихся, информирование о рынке труда и сфере профессионального образования, организация участия в олимпиадном движении, организация участия в профориентационных мероприятиях, психологическое консультирование, дистанционное обучение, организация процесса по набору абитуриентов (приемная комиссия), создание справочника профессий, углубленное изучение предметов, подготовка к сдаче ЕГЭ, профориентационное тестирование, психологические консультации, выставки, фестивали, конкурсы и т.д.

На профессионально-педагогическом уровне субъектами взаимодействия выступают только педагогические работники. Целью взаимодействия будет повышение квалификации и разработка методических средств обеспечения взаимодействия образовательных учреждений в подготовке к выбору направления профессионального образования. Содержанием профессионально-педагогического взаимодействивя будет создание и согласование методического обеспечения профориентационной деятельности, инициирование инноваций содействия профессиональному выбору учащихся, обмен информацией, обмен опытом профориентационной деятельности и т.д.

Устойчивой структурой, совместным субъектом курирующим деятельность может служить методический ресурсный центр, созданный как административная единица, либо как виртуальная структура в виде портала данных. Формы взаимодействия на профессионально-педагогическом уровне: методическая работа, научная работа, дополнительное профессиональное образование, повышение квалификации педагогов, научные мероприятия (конференций, семинаров, симпозиумов и т.д.), проводимых учреждением; программы, проекты, конкурсы, гранты, в которых планирует принять участие учреждение на совместной основе.

На административном уровне ставится цель организации, стимулирования, контроля взаимодействия образовательных учреждений в подготовке к выбору направления профессионального образования. На этом уровне решаются задачи: структурирование управления, создание общественных органов курирующих профориентацию, планирования и реализации сетевых проектов, координация деятельности, разработка управленческих решений. Устойчивой структурой, совместным субъектом курирующим деятельность может служить координационный совет по профориентации.

В его компетенции может входить постановка задач профессиональной ориентации; подготовка предложений по новым направлениям подготовки специалистов, разработка мероприятий по развитию профориентационной работы, реализация плана мероприятий, способствующих повышению престижа профессий; разработка конкретных проектов, направленных на развитие профориентационной работы; подготовка рекомендаций по организации взаимодействия образовательных организаций, органов управления образованием, представителей промышленности и бизнеса; подготовка предложений по созданию информационной системы координации деятельности в сфере профориентации; подготовка предложений по обеспечению ресурсами направлений развитии профориентационной работы; обмен данными о поступлении в учреждения профессионального образования, об успешности освоения образовательной программы; проведение научно-практических конференций; осуществление контроля исполнения требований приказов.

Субъектами управления выступают: администрация, педагогический совет, научно-методический совет, факультеты, кафедры образовательных организаций. В их компетенции входит: распределение компетенций, разработка нормативно-правовой базы, разработка концепции содержания профессионально-педагогического взаимодействия и уточнение ее в виде программ и планов деятельности на уровне образовательной организации; создание условий для профессиональной ориентации обучающихся через систему работы педагогов, психологов, социальных педагогов; сотрудничество с базовыми предприятиями, учреждениями профессионального образования, центрами профориентационной работы; разработка мер стимулирования педагогов образовательного учреждения; разработка мер информационно-коммуникативного характера; инициирование инноваций содействия профессиональному выбору учащихся; создание педагогического коллектива, способного к инновационным преобразованиям; организация экспериментальной работы по апробации инноваций координацию общего методического замысла образовательного процесса; контроль качества образования по обобщенным критериям и др.

Формы взаимодействия административного уровня: проведение заседаний координационного совета, осуществление инноваций содействия профессиональному выбору учащихся; постановка задач профессиональной ориентации; обмен информацией (данные о поступлении в учреждения профессионального образования, об успешности освоения образовательной программы); создание и наполнение сайтов, обеспечение обратной связи.

Общим результатом реализации модели можно назвать повышение уровня готовности учащихся к профессиональному самоопределению, наличие синергетических эффектов взаимодействия образовательных организаций в сопровождении профессионального самоопределения учащихся.

Таким образом, мы представили педагогические предпосылки разработки и собственное видение модели организации взаимодействия образовательных организаций общего и профессионального образования по вопросам профориентации, описав ее в системной логике на трех уровнях. Данные сведения представляют собой основание для проектирования организации и содержания взаимодействия образовательных организаций по вопросам профессиональной ориентации на основе социально-педагогического партнерства.

Библиографический список

1. Буров, К.С. Проблема взаимодействия школы и вуза в сопровождении выбора учащимися направления профессионального образования / К.С. Буров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». – 2011. – Вып. 11. – № 3 (220). – С. 40–44.

2. Весна, Е.Б. Модели взаимодействия организаций при сетевой форме реализации образовательных программ / Е.Б. Весна, А.И. Гусева // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – С. 1–16.

3. Котлярова, И.О. Гуманно ориентированное непрерывное образование / И.О. Котлярова, Г.Н. Сериков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». – 2009. – Вып. 6. – № 38(171). – С. 7–11.

4. Сериков, Г.Н. О непрерывности образования человека в современной действительности / Г.Н.Сериков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Здравоохранение, физическая культура». – 2005. – № 15 (55). – С. 16–22.

5. Сериков, Г.Н. Образование: аспекты системного отражения / Г.Н. Сериков. – Курган: Зауралье, 1997. – 464 с.

6. Шамсутдинова, И.Г. Психолого-педагогическая поддержка профессионального самоопределения учащихся / И.Г. Шамсутдинова, Е.Г. Казарова // Педагогика. – 2008. – № 10. – С. 62–70.

К содержанию

УДК 378.22+378.037 +378.17

СОДЕЙСТВИЕ РАЗВИТИЮ КОМПЕТЕНЦИЙ СЛЕДОВАНИЯ ЗДОРОВОМУ ОБРАЗУ ЖИЗНИ У МАГИСТРАНТОВ

М.А. Волкова

На основе анализа литературы по проблеме исследования и данных о диспансеризации студентов вузов г. Челябинска обосновывается актуальность содействия развитию у магистрантов компетенций следования здоровому образу жизни. Охарактеризованы возможности дисциплины по выбору «Педагогика высшей школы», которая изучается магистрантами в первом семестре, для содействия развитию компетенций следования здоровому образу. Особое внимание обращается на такую форму работы магистрантов, как социальное проектирование, направленное на приобщение к здоровому образу жизни студентов – будущих бакалавров и специалистов.

Ключевые слова: здоровый образ жизни; социальный проект; компетенции; высшая школа; магистранты.

В последнее десятилетие было осуществлено значительное количество исследований, в том числе педагогических, направленных на разработку и апробацию моделей приобщения студентов к здоровому образу жизни, использование здоровьесберегающих технологий в образовательном процессе высшей школы, создание здоровьесберегающей среды [1–7].

Внимание к проблеме содействия студентам в следовании здоровому образу жизни обусловлено и тем обстоятельством, что здоровье специалистов – выпускников высшей школы – имеет тенденцию к ухудшению. Об этом свидетельствуют результаты ряда исследований, осуществленных в различных регионах Российской Федерации.

Так, в Сибирском федеральном университете было проведено исследование анализа заболеваемости студентов 1–3 курсов за период с 1990 по 2011 гг. Данное исследование показало, что здоровье студентов за этот период значительно ухудшилось: если к началу 90-х годов «заболевания отмечалось у каждого 9 студента, то теперь – у трех из пяти» [1, с. 113]. Прежде всего, повысился уровень сердечнососудистых заболеваний и заболеваний опорно-двигательного аппарата.

Исследование заболеваемости среди студентов Орловского государственного университета в период с 2008 по 2011 гг. свидетельствует о том, что увеличилось количество заболеваний органов зрения, опорно-двигательного аппарата (остеохондроз, сколиоз и т.п.), органов пищеварения, т.е. «заболеваний наиболее значимые для обеспечения жизнедеятельности» [10, с. 265].

О наличии проблемы ухудшения здоровья студентов свидетельствуют также данные диспансеризации студентов вузов г. Челябинска за период 2007–2012 гг., представленные главным врачом муниципального бюджетного учреждения здравоохранения «Городская клиническая больница № 2» И.П. Кругляковой. По данным профилактических осмотров за период 2007–2012 более 60 % студентов имеют отклонения в состоянии здоровья, 20 % имеют 3 группу здоровья и нуждаются в систематическом наблюдении и профилактическом лечении. В структуре выявленной патологии по данным профилактических осмотров лидируют болезни глаза (36 %), хирургическая патология (21 %), терапевтическая патология (15 %). В структуре общей заболеваемости при обращаемости лидировали болезни глаза и его аппарата 53,3 %. Наблюдается рост первичной заболеваемости в расчете на 1000 студентов с 180 обращений студентов в 2007 года до 300 в 2012 году [9].

Вопросам формирования здорового образа жизни уделено значительное внимание в основополагающих документах федерального уровня. Среди них – «Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации до 2020 года». Одним из приоритетных направлений государственной демографической политики названо «сохранение и укрепление здоровья населения, увеличение роли профилактики заболеваний и формирование здорового образа жизни» [8, с. 29].

Положения новой доктрины социального управления поддержанием здоровья населения нашли свое отражение и в содержании образования. Так, готовность организовать свою жизнь в соответствии с социально-значимыми представлениями о здоровом образе жизни, владение средствами самостоятельного, методически правильного использования методов укрепления здоровья, достижение необходимого уровня физической подготовленности для осуществления полноценной социальной и профессиональной деятельности в государственных образовательных стандартах высшего профессионального образования последнего поколения рассматривается как общекультурная компетенция.

Например, в федеральном государственном образовательном стандарте высшего профессионального образования по направлению подготовки 010100 Математика (квалификация (степень) «бакалавр») эта компетенция имеет следующую формулировку:

– приверженностью к здоровому образу жизни, нацеленность на должный уровень физической подготовки, необходимый для активной профессиональной деятельности (ОК-3) [11].

В федеральном государственном образовательном стандарте высшего профессионального образования по направлению подготовки 020100 Химия (квалификация (степень) «бакалавр») представлены следующие формулировки:

– владеет средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и самовоспитания для повышения адаптационных резервов организма и укрепления здоровья (ОК-16);

– готовность к достижению должного уровня физической подготовленности, необходимого для освоения профессиональных умений и навыков в процессе обучения в вузе и для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности после окончания учебного заведения (ОК-17) [12].

В федеральных государственных образовательных стандартах высшего профессионального образования будущих магистров данные компетенции не отражены, поскольку должны быть сформированы в период получения квалификации «бакалавр» и «специалист». Следовательно, содействовать следованию магистрантов здоровому образу жизни должна прежде всего образовательная среда вуза, а также содержание предметов общенаучного цикла.

Здоровье является одним из видов личного ресурса магистранта. Без развития компетенции самоуправления личными ресурсами, в частности собственным здоровьем, невозможным становится полная самореализация личности, в том числе в профессиональной деятельности. Управление собственной деятельностью (в том числе по здоровьесбережению), то есть самоуправление, требует от магистранта осознания как имеющихся у него ресурсов (одним из видов которого является здоровье), так и самого процесса самоуправления данным видом личного ресурса.

На этапе ранней зрелости, приходящейся на период адаптации магистранта к профессиональной деятельности, осуществляется развитие таких видов совокупного личного ресурса, как компетентность и профессиональная квалификация. Именно в этот период начинается активное освоение личностью ряда социальных ролей (гражданских, профессионально-трудовых, семейных). Как следствие, магистранту приходится выдерживать значительные нагрузки, причем, не только интеллектуальные, но и нравственные, и волевые. Осознанное формирование и применение компетенции самоуправления личными ресурсами позволяет выдерживать данные нагрузки с минимальным ущербом для здоровья.

Таким образом, содействие магистранту в сохранении и укреплении здоровья, создание условий, способствующих здоровому образу жизни, становится одной из актуальных задач высшей школы. Своего рода ориентиром в такой деятельности стал открытый публичный Всероссийский конкурс образовательных учреждений высшего профессионального образования на звание «ВУЗ здорового образа жизни», который проводился в соответствии с приказом Министерства образования и науки России № 1065 от 22 октября 2010 года.

Как показало самообследование, проведенное в Южно-Уральском государственном университете, здесь присутствуют все необходимые условия для приобщения магистрантов к здоровому образу жизни, для осуществления здоровьесберегающей и здоровьеформирующей деятельности.

Прежде всего, создана мощная материально-техническая база для занятия спортом и для оздоровления. Так, физкультурно-спортивный клуб Южно-Уральского государственного университета предоставляет студентам возможность для занятий по следующим видам спорта: волейбол (мужчины и женщины); баскетбол (мужчины и женщины); конькобежный спорт; спортивное ориентирование; футбол; легкая атлетика; борьба самбо, борьба дзюдо, армспорт, гиревой спорт, пауэрлифтинг, тяжелая атлетика, шахматы, бадминтон, плавание, хоккей с шайбой, настольный теннис, лыжные гонки, кик-боксинг, бокс, дельтапланерный спорт. Осуществляет работу клуб спортивного ориентирования, турклуб «Рифей».

Созданы внешние по отношению к личности магистранта условия, способствующие поведению, соответствующему здоровому образу жизни:

– наличие у университета собственных спортивных сооружений (спортивные залы, манеж, плавательный бассейн, физкультурно-оздоровительный комплекс, стадион, плоскостные сооружения);

– наличие спортивного (спортивно-оздоровительного) клуба;

– возможность регулярного прохождения диспансерных осмотров, получение необходимых рекомендаций и системное проведение оздоровительных мероприятий по результатам диспансеризации;

– участие в физкультурно-оздоровительных мероприятиях университета и факультета, в том числе в рамках программы по оздоровлению студентов и пропаганде здорового образа жизни;

– наличие постоянно действующего Интернет-ресурса по вопросам формирования и пропаганды здорового образа жизни, борьбе с вредными привычками, популяризации физической культуры и спорта, творческой и культурно-досуговой деятельности;

– наличие инновационных программ и проектов в сфере здорового образа жизни;

– наличие программ и планов санаторно-курортного оздоровления студентов.

Однако необходима системная работа по вовлечению магистрантов в целенаправленную деятельность по сохранению и развитию собственного здоровья, что предполагает прежде всего развитие ценностного отношения к здоровью и здоровому образу жизни.

Ценностное отношение формируется под влиянием реальной жизненной практики и связано с эмоциональной сферой личности, которая отражает субъективную и личностно-переживаемую связь человека с окружающим миром. В связи с этим появляется необходимость актуализировать эмоционально-ценностное отношение магистранта к здоровому образу жизни (внутреннюю позицию) и его потребность в нем.

Актуализация эмоционально-ценностного отношения магистранта к здоровому образу жизни представляет собой целенаправленную деятельность

по переводу ценностных ориентиров (мыслей, взглядов, представлении, убеждений, установок, чувств, способностей) из потенциального состояния в реальное и осознанию их значимости в жизнедеятельности человека.

Включение магистранта в здоровьесберегающую деятельность предполагает активизацию действенно-практической сферы личности, развитие потребности в здоровом образе жизни. Включение в любую деятельность вызывает собственную активность личности, способствуя обогащению опыта, развитию, самореализации и самоактуализации. Поэтому деятельностный аспект в контексте содействия следованию здоровому образу жизни приобретает особое значение. Включение магистранта в здоровьесберегающую деятельность предполагает специально организованную среду, в которой происходит обогащение его личностного опыта здорового образа жизни, приобщение к нему и формирование предпосылок системной и последовательной самостоятельной деятельности по организации и ведению собственного здорового образа жизни.

Представляется целесообразным содействовать следованию магистрантами здоровому образу жизни, используя содержание, методы, приемы и средства информационного, ценностно-ориентационного и креативно-деятельностного характера.

Большие возможности для содействия развитию у магистрантов компетенций следования здоровому образу жизни предоставляет дисциплина «Педагогика высшей школы», которая в Южно-Уральском государственном университете (г. Челябинск) является дисциплиной по выбору и изучается магистрантами в первом семестре. Один из модулей программы посвящен педагогическим компетенциям преподавателя высшей школы. К таким компетенциям относятся компетенции по формированию здоровьесберегающей среды и самоуправление собственным здоровьесбережением.

В рамках дисциплины «Педагогика высшей школы» магистранты осваивают компетенции социального проектирования. Актуальным направлением социального проектирования, осуществляемого магистрантами, являются проекты, направленные на содействие приобщению студентов – будущих бакалавров и специалистов к здоровому образу жизни в ходе осуществления внеучебной и (или) учебной работы. В ходе осуществления социального проектирования по данной проблематике магистранты осуществляют анализ научной литературы по проблеме исследования, изучают практику создания здоровьесберегающей среды молодежи, в том числе студенческой, проводят диагностическое исследование в конкретной образовательной организации и предлагают свою модификацию существующего проекта или разрабатывают собственный с учетом особенностей конкретной образовательной организации и (или) ее подразделения.

Большая загруженность магистрантов, традиционно сочетающих учебную и научно-исследовательскую деятельность с трудовой, к сожалению, не позволяет активно и массово вовлекать магистрантов в реализации соз-

данных ими проектов, направленных на аудиторию студентов – будущих бакалавров и специалистов. Однако разработка данных проектов и подготовка к их публичной защите содействует осмыслению новой актуальной информации о путях и средствах укрепления здоровья человека, позволяет ознакомиться с комплексом диагностических методик для самоконтроля состояния здоровья, комплексом лечебно-профилактических мероприятий, направленных на профилактику заболеваний, связанных с областью профессиональной деятельности, совмещения профессиональной и учебной деятельности, с характеристиками основных стратегических направлений по укреплению здоровья студентов.

При создании данных социальных проектов осуществляется «прохождение» магистрантом следующих этапов: знания (овладение определенной информацией) и убеждения (трансформация в сознание необходимых знаний). Реализация на практике созданных проектов, «встраиваемых» в спортивно-оздоровительную жизнь университета, города, области позволяет совершенствовать умения (выработка способности правильно выполнять рекомендации, осознанно применять знания); компетенции (использование освоенных рекомендаций, осознанное применение знаний для эффективного решения задач собственного здоровьесбережения и содействия в сохранении здоровья подопечных). Участие магистрантов с социальном проектировании и частичной реализации проектов является особенно важным с учетом того факта, что далеко не все из них обучались по стандартам третьего поколения, в которых представлены компетенции следования здоровому образу жизни, то есть лишь у определенной части магистрантов данные компетенции сформированы. Таким образом, именно социальное проектирование по тематике ЗОЖ и активное вовлечение магистрантов в физкультурно-оздоровительную среду университета (в том числе в рамках реализации созданных ими проектов) будет способствовать формированию компетенций следования здоровому образу жизни.

Библиографический список

1. Богащенко, Ю.А. Влияние социально-экономических перемен на здоровье студентов Сибирского федерального университета / Ю.А. Богащенко, А.С. Темных // Физическое воспитание студентов. – 2012. – № 6 – С. 108–113.

2. Волкова, М.А. Формирование ценностного отношения к здоровью у студентов / М.А. Волкова // Педагогический ежегодник. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – Вып. 7. – С. 19–30.

3. Волкова, М.А. Нормализация учебной нагрузки студентов вуза как процессуальный ресурс здоровьесбережения / М.А. Волкова // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия «Образование. Педагогические науки». – 2009. – № 4. – С. 29–37.

4. Волкова, М.А. Здоровье студентов как параметр качества образовательного процесса / М.А. Волкова // Вестник Южно-Уральского государственного университета, серия «Образование. Педагогические науки». – 2010. – № 3. – С. 70–78.

5. Волкова, М.А. Здоровье студента как вид личного ресурса / М.А. Волкова // Педагогическое сопровождение развития человеческих ресурсов. Материалы Международной научно-практической конференции 26 октября 2010 г. / под ред. И.О. Котляровой, К.С. Бурова. – Часть 2. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011. – С. 29–35.

6. Волкова, М.А. Внеучебная работа факультета как один из факторов, содействующих формированию у студентов общекультурных компетенций следования здоровому образу жизни / М.А. Волкова // Перспективы развития науки и образования: материалы VI Международной научно-практической конференции. – Душанбе, 2012. – С. 17–21.

7. Volkova M. INFORMATIONAL AND ORIENTATIONAL COMPONENT OF THE HEALTHY LIFESTYLE SUPPORT SYSTEM FOR HIGHER SCHOOL FACULTY MEMBERS // Science and Education [Text]: materials of the III international research and practice conference, Munich, April 25th – 26th, 2013 / publishing office Vela Verlag Waldkraiburg – Munich – Germany, 2013, vol. 2, pp. 213–217.

8. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. – URL: http://www.government.ru/content/governmentactivity/rfgovernmentdecisions/archive/2008/11/17/2982752.html.

9. Круглякова, И.П. Диспансеризация студентов вузов как приоритетное направление охраны здоровья молодежи / И.П. Круглякова. – URL: http://ckazhi.ru/files/files/_.ppt.

10. Саурина, О.С. Анализ состояния здоровья студентов Орловского университета / О.С. Саурина // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: естественные, технические и медицинские науки. – 2012. – № 3. – С. 264–267.

11. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 010100 Математика (квалификация (степень) «бакалавр»). – URL: http://минобрнауки.рф/документы/1857.

12. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 020100 Химия (квалификация (степень) «бакалавр»). – URL: http://www.edu.ru/db-mon/mo/Data/d_10/prm531-1.pdf.

К содержанию

УДК 378.126(510)+378.2(510)

ПРОГРАММА ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА ВУЗОВ КНР

И.О. Котлярова

По результатам исследования образовательных потребностей профессорско-преподавательского состава представителей вузов КНР разработана программа дополнительного профессионального образования. В нее на основе матричных связей введены разделы (модули) и блоки. Осуществлена ее апробация, изучена степень удовлетворенности программой слушателей. Сделаны выводы о целесообразности включения в программу различных блоков.

Ключевые слова: профессорско-преподавательский состав; международное сотрудничество; программа дополнительного профессионального образования.

Согласно Закону «Об образовании в Российской Федерации» международное сотрудничество в сфере образования осуществляется по ряду актуальных направлений. Первое из них – «разработка и реализация образовательных программ и научных программ в сфере образования совместно с международными или иностранными организациями» [4]. В рамках данного направления нами осуществлено маркетинговое исследование [1] потребностей преподавателей профессорско-преподавательского состава двух вузов Китайской народной республики (КНР): Океанического Университета (г. Чжэцзян) и Хэбэйского профессионального института иностранных языков (г. Циньхуандао). Выявлялись потребности повышения квалификации преподавателей в аспекте использования ими современных образовательных технологий, в целях дальнейшей разработки программы повышения научно-педагогической квалификации.

Научно-педагогическая деятельность профессорско-преподавательского состава вузов России и Китая сравнивалась по критериям: требования к научной деятельности (ученые степени, требования ведения научных исследования, регламент научной деятельности), аспекты педагогической деятельности, структура соотношений между ними, нагрузка [5]. Были выявлены некоторые различия в научно-педагогической деятельности преподавателей Китая и России: обязательная плановость ведения исследования (практическое отсутствие инициативных незапланированных исследований), сравнительно большее время для ведения научных исследований (в процентном отношении как доля общей нагрузки), относительно низкая педагогическая нагрузка, рациональное распределение рабочего времени, система восстановления человеческого ресурса в продолжение профессиональной деятельности, работа с большими потоками студентов. В плане

использования образовательных технологий требовании в обеих странах общие, однако, применение интерактивных технологий в китайских вузах порой затруднительно из-за высокой наполняемости потоков и групп. В то же время, для преподавателей КНР представляло интерес применение всего актуального для нашей страны спектра образовательных технологий: активных, интерактивных, сетевых, технологий электронного и дистанционного образования, компьютерной симуляции, работы в команде и др. Опрос респондентов показал, что цели международной стажировки распределились следующим образом (табл. 1).

Вынесение научной деятельности на первое место объяснимо большей доступностью научных изданий в России по сравнению с Китаем. Многие ученые воспользовались условиями стажировки для использования информационных ресурсов по своему научному направлению. Опыт ученых ЮУрГУ в интересующих слушателей научных направлениях также представлял интерес для слушателей. Возникла потребность обмена опытом, научными результатами ученых двух стран.

Таблица 1

Ранжирование целей стажировки

Цель	Средний ранг
Занятия научной деятельностью	3,1
Изучение российской системы образования	3,3
Сравнение образования в РФ и КНР	4,3
Изучение современных образовательных технологий	4,9
Изучение русской культуры	4,9
Изучение русских людей, русского быта и традиций	5,1
Обмен собственным опытом	7,3

Также оказалось, что общие вопросы образования в России интересуют слушателей больше, чем современные образовательные технологии, в частности. Это объясняется уровнем представлений китайских коллег об образовании в России. Происходят лишь первые этапы ознакомления с нашей системой, вопросы общего характера являются базой для дальнейшего изучения конкретных разделов и тем, характеризующих российское университетское образование. Образование человека естественно изучать в контексте не только социально-экономической и политической обстановки в стране, но и во взаимосвязи с социально-психологическими особенностями развития людей и их взаимодействия между ними. Вероятно, в связи с этим на одинаковом уровне востребованности оказались потребности изучения современных образовательных технологий, русской культуры, особенностей русских людей, русского быта и традиций. В ответах на вопросы многие слушатели отмечали, что они хотят завести друзей и завязать прочные связи в России.

Изучая образовательные технологии в другой стране (России), китайские ученые преследуют цели не просто развития своих компетенций в этой области. Все они указали по необходимость изучения образовательных технологий во взаимосвязи с культурными особенностями страны, изучением системы образования, истории и традиций России, г. Челябинска, особенностей быта, человеческих отношений, а также с предметом научных исследований и преподаваемыми дисциплинами.

Образование человека как часть социальной сферы его жизнедеятельности испытывает все виды социального влияния: со стороны семьи, социума, средств массовой информации, искусства. Образование и культура – неотделимые и взаимно влияющие друг на друга аспекты человеческой жизнедеятельности. Их взаимное влияние и проникновение выражается в содержании образования, компенсации содержания формального образования содержанием неформального и информального образования, обеспечении процессов опредмечивания и распредмечивания культуры, тождественности воздействия на развитие личных ресурсов. Все эти аспекты вызывают интерес зарубежных стажеров, в частности, и потому что способствуют лучшему пониманию системы образования в России.

Это обусловило следующий вывод относительно содержания программы дополнительного профессионального образования. Он состоит в нецелесообразности представления содержания как закрытой системы. Наряду с педагогическими разделами и темами необходимо отражение в содержании программы социально-психологические и культурные аспекты образования людей. Содержание программы, соответствующее тематике, нужно связывать со всеми вышеперечисленными направлениями. Таким образом, в содержание программы дополнительного профессионального образования были включены соответствующие разделы: «Высшее образование в России», «Россия в системе мирового образования», «Национальный исследовательский университет – центр развития и интеграции образования и науки», «Современные технологии высшего образования и оценки его качества».

В первых разделах отражены историко-культурные особенности образования нашей стране. Рассматриваются вопросы история становления университетского образования в России. Развитие профессионального образования изложено в контексте общих тенденций культурного развития крупнейших культурных центров России: Санкт-Петербурга, Москвы. Слушатели погружаются в историю развития ЮУрГУ, также во взаимосвязи с развитием промышленного региона – Челябинской облатси. В последний раздел, являющийся содержательным ядром программы, включены темы «Технологии социально-педагогического взаимодействия», «Технологии проектирования и реализации образовательного процесса», «Тьюторские технологии в образовании», «Технологии дополнительного образования», «Технологии оценки качества образования в университете».

Таким образом, наряду с содержательными модулями, в программу были включены блоки, которые подразумевались при чтении каждого раздела: государственно-политический, предметный, культурно-аксиологический. Характеризуя открытость программы, обратим основное внимание на блоки, обеспечивающие связь образовательных технологий, используемых в высшем образовании, с другими аспектами жизнедеятельности. Культурно-аксиологический блок был представлен разделами: «История и культура России», «История университетского образования в России», «Социально-экономические условия и культурная жизнь Южного Урала». Сетевой характер программы нашел выражение в проведении экскурсий не только в образовательных, но и в культурных учреждениях городов Челябинск, Екатеринбург, Москва, Санкт-Петербург. Разделы и блоки программы образовали матричную структуры, позволяющую максимально решать задачи программы и удовлетворять потребности слушателей.

Учитывая особенности получения образования взрослыми людьми, принципы андрагогики и непрерывного образования [2, 3], мы также посчитали необходимым завершить программу результатами, свидетельствующими о ее продуктивности. В нашем случае это была подготовка научных статей, предметом которых стал сравнительный анализ образования в КНР и Российской Федерации, а также были достигнуты предварительные договоренности о дальнейшем сотрудничестве в области выполнения совместных исследований. Это нашло отражение в интегрирующе-продуктивном блоке программы.

Выявленный заказ нашел отражение и в условиях реализации программы. Прежде всего, были выдвинуты требования к профессорско-преподавательскому составу: знание английского языка (языка программы) на уровне не ниже Intermediate, научно-педагогическая квалификация не ниже квалификации слушателей, включение кадров высшей квалификации по педагогическому и экономическому направлению (направление слушателей), активное привлечение специалистов в области английского языка. В квалификационном плане было выдвинуто требование владения педагогами методиками образования взрослых людей, кардинально отличающимися от методик образования детей, подростков и юношей.

При проектировании методов образования также была учтена необходимость организации взаимодействия с разными категориями субъектов образовательного процесса: студентами (бакалаврами, магистрами), аспирантами, преподавателями – а также представителями производственной сферы, предприятий и организаций. Взаимодействие происходило в разнообразных формах: лекции, семинары, конференции, наблюдение за образовательным процессом, мастер-классы, встречи, беседы, круглые столы, пресс-конференции, индивидуальное общение. Кроме того, в университете слушатели посетили все музеи, многие лаборатории, кафедры, центры и фа-

культеты, в целях ознакомления слушателей, как с образовательным процессом, так и с социально-культурной средой, обеспечивающей образование.

Программа была апробирована в течение трех месяцев ее практической реализации на базе Южно-Уральского государственного университета, в Институте дополнительного образования, в научно-образовательном центре «Педагогика непрерывного образования». В процессе апробации проводились констатирующие срезы (два среза), имевшие целью проверить соответствие программы ключевым требованиям к ее содержанию и условиям реализации. Также привлекались эксперты – специалисты в области дополнительного профессионального образования и международных отношений. В целом оценивание осуществлялось по критериям: актуальность, новизна, авторский, оригинальный характер программы, соответствие потребностям слушателей, соответствие проекту.

В результате исследования программа была оценена как удовлетворяющая всем вышеперечисленным требованиям. В то же время, были определены некоторые несоответствия требований слушателей и реальностью прохождения стажировки. Среди них: невозможность посещения интересующих объектов (вызванная требованиями государственной безопасности), недостаточное количество владеющих на высоком уровне английским языком специалистов по научным направлениям слушателей преподавателей. При этом отмечалась полная удовлетворенность непосредственным содержанием образованием, а также содержанием и организацией социально-культурной среды для дополнительного профессионального образования.

По завершении программы слушатели оценили ее качество. По критериям «содержание образования» и «качество преподавания» были получены следующие оценки (табл. 2). В то же время, выявлено несоответствие качества проведения образовательной программы и бытовых условий проживания, которые в среднем оценены в 1,4 балла. Внеаудиторное общение и культурная жизнь слушателей во время стажировки были оценена ими достаточно высоко (в среднем в 4,3 балла). Следует отметить, что обеспечивалась она и средствами программы, и путем включения слушателей в социально-культурную среду университета.

Также качество программы оценивалось по результатам осуществления на практике интегрирующе-продуктивного блока. В продуктивном блоке были отражены следующие достигнутые результаты: достижение целей программы; возникновение перспективных проектов (обучение в аспирантуре, заключение тем научно-исследовательской работы, совместные исследования, обмен публикациями); решение о продолжении работы в ЮУрГУ для дальнейшего решения задач международного сотрудничества; также было принято решение о продолжении программы для слушателей-преподавателей китайских университетов.

Таблица 2

Оценка программы слушателями

Оценка по критериям, характеризующим качество преподавания, балл					
Новизна содержания образования	Полезность содержания образования для слушателей	Квалификация преподавателей	Коммуникативные компетенции преподавателей	Профессиональные личностные качества преподавателей	Используемые дидактические средства
4,4	3,9	4,6	4,4	5	4,6

В целом по критериям «наличие результирующего продукта» и «обозначение дальнейших перспектив сотрудничества» программ была оценена положительно.

Таким образом, при участии китайских коллег удалось провести исследование оснований проектирования программ дополнительного профессионального образования для преподавателей китайских университетов, разработать и апробировать матричную структуру содержания разделов и блоков программы, скорректировав в частных аспектах и в целом подтвердив предварительные теоретические предположения.

Библиографический список

1. Волошина, И.А. Маркетинг в дополнительном образовании / И.А. Волошина, И.О. Котлярова, Ю.В. Тягунова // Высшее образование в России. – 2010. – № 12. – С. 48–53.

2. Котлярова, И.О. Инновационные системы повышения квалификации: монография / И.О. Котлярова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 320 с.

3. Котлярова, И.О. Особенности современного развития непрерывного дополнительного образования / И.О. Котлярова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». – 2010. – Вып. 8. – №. 12 (188). – С. 12–18.

4. Об образовании в Российской Федерации. – URL: http://xn--80abucjiibhv9a.xn--p1ai/%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/2974.

5. Сериков, Г.Н. Гуманно ориентированная интерпретация профессиональных умений педагогов / Г.Н. Сериков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки. – 2009. – Вып. 5. – № 31 (164). – С. 10–16.

К содержанию

УДК 37.018 + 37.01

ОБРАЗОВАНИЕ КАК ОТНОШЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА С ОКРУЖЕНИЕМ И С СОБОЙ

Г.Н. Сериков

В основе исследования лежит идея о паритете отношений человека с собой и с окружением. Образовательные отношения рассмотрены как вид социальных отношений, в которых выражаются образовательные компетенции. Образование представлено как целостность исполнения образовательной компетенции в отношениях с государственно-общественной системой образования и самообразования.

Ключевые слова: человек, окружение, отношения, образовательные отношения, образовательные компетенции.

Социальный образ жизнедеятельности человека характеризуется отношениями с кем-то (чем-то). Соответствующие отношения сопровождаются обменом информацией с разными представителями окружения. Благодаря этому человек узнает что-то о своем окружении, выясняет реакции представителей окружения на свои действия, знакомится с правилами социально принятого взаимодействия с партнерами, учится цивилизованным отношениям с разными представителями своего окружения. Фактически в отношениях с окружением человек, усваивая ту или иную информацию, учится целесообразному образу жизнедеятельности.

Под ***целесообразным образом жизнедеятельности*** понимается паритет отношений человека с собой и с окружением. Это означает, с одной стороны, его стремление сохранить себя как природоопределенную уникальность. С этой стороны человек, вольно или невольно, осознанно либо интуитивно, ищет такие отношения с окружением, которые способствуют (либо не препятствуют) его самореализации. С другой стороны, жизнедеятельность человека объективно зависит от условий сосуществования с окружением. С этой стороны проявленные отношения с окружением порождают те или иные эмоционально-чувственные отношения к ним. Они-то могут способствовать изменению активности человека в отношениях с окружением. Способность выстраивать отношения с окружением так, чтобы, сохраняя собственную уникальность, не наносить вреда (лучше – приносить пользу) представителям оного, является ведущим признаком целесообразного образа жизнедеятельности человека.

Правомерно констатировать, что в отношениях с окружением и с собой человек раскрывает свой личный энергоресурс. Фактически, усваиваемая информация, становясь знаниями человека, служит побудителем перехода его врожденного энергопотенциала в личный энергоресурс. Он-то и явля-

ется внутренней предпосылкой совершения действий. Одним из результатов свершившихся действий является умение человека пользоваться знаниями при выстраивании отношений с представителями окружения. Удачи и неудачи в пользовании усвоенной информацией при совершении действий способствуют не только закреплению умений выстраивать отношения с кем-то (чем-то) либо с собой. Накапливая опыт совершения действий с окружением (с собой), человек постепенно становится компетентным в соответствующих аспектах отношений.

Усвоенные знания об окружении (о себе), приобретенные умения пользоваться ими в отношениях с кем-то (чем-то) побуждают человека выстраивать целесообразный образ жизнедеятельности. Рано или поздно он осознает зависимость отношений с окружением от себя самого. Это-то и становится причиной активизации отношений с кем-то (чем-то) ради самореализации, а также для совершенствования развившегося личного энергоресурса человека. Вглядываясь в собственный внутренний мир, человек может искать природоопределенные предпочтения, которые ему хотелось бы осуществить относительно себя. Определившись с ними, человек выстраивает действия, направленные на целесообразный образ своей жизнедеятельности.

Таким образом, в отношениях с окружением и с собой человек не только выживает как биосоциальный феномен. Он может и должен заботиться о собственном личном энергоресурсе, как о предпосылке успешного сосуществования с окружением и с собой. Для этого ему необходима компетентность не только в осуществлении отношений с кем-то (чем-то), но и в наращивании личного энергоресурса. Речь идет о расширении и углублении компетентности в соответствующих аспектах жизнедеятельности, а также о самосбережении здоровья, значимого при осуществлении целесообразного образа жизнедеятельности. Этому и должно способствовать образование человека.

Традиционно образование трактуется как специально организованная система социально культурной действительности (в нашей стране – государственно-общественная система образования). Она существует для того, чтобы приобщать человека к достижениям цивилизации в области науки, искусства, права и морали, общественного производства, истории и практики межличностных, межнациональных и межгосударственных отношений. При этом в содержании образования превалируют специально отобранные и обработанные сведения, несущие информацию о соответствующих достижениях человеческой цивилизации. Естественно, что в них достижения цивилизации представлены опосредовано через описания разными авторами соответствующих достижений цивилизации, по-своему интерпретирующих реалии прошлого, настоящего и перспективы будущего.

Каждый человек вступает в специфические отношения с государственно-общественной системой образования. Их особенность состоит в том, что его отношения с окружением подменяются отношением с содержанием образования, в котором представлена интерпретация некоторых аспектов, относящихся к достижениям цивилизации. В отношениях с содержанием образования человек обязывается усваивать соответствующую информацию. Тем самым, он как бы (мысленно) погружается в искусственно созданные отношения с отдельными аспектами якобы реального окружения.

При этом имеют место специально организованные отношения с педагогическим персоналом, сопровождающим образовательную деятельность человека. Однако такие отношения осуществляются в рамках своеобразного регламента, лежащего в основе учебно-педагогического взаимодействия [1; 2; 3]. Образующийся человек обязывается осуществлять отношения с педагогическим персоналом, не нарушая установленного регламента. Менее формализованными являются отношения между образующимися людьми. Все это, безусловно, вносит специфику в отношения человека с окружением в социально организованной системе его образования. Фактически, в отношениях образующегося человека в государственно-общественной системе образования превалирует взаимодействие с партнерами, направленное на обеспечение усвоения человеком опосредованной информации о достижениях цивилизации.

В целом, отношения человека с государственно-общественной системой образования правомерно называть образовательными. Отсюда понятно, что ***образовательные отношения*** человека предстают в виде организованной извне стороны специфических социальных отношений. Человеку, находящемуся в образовательных отношениях, предписываются такие полномочия, которые обязывают его усваивать содержание образования независимо от личного отношения к этому. Полный набор такого рода полномочий предстает как его ***образовательная компетенция***. Исполнение образовательной компетенции человеком в государственно-общественной системе образования происходит при обязательном педагогическом сопровождении. Оно, в частности, призвано обеспечивать становление ценностного отношения человека к социально обусловленному содержанию образования.

Однако при этом остается открытым вопрос о том, насколько усилия педагогов в этом оказываются успешными, ибо далеко не все зависит от их искусства. Дело том, что субъектность образующегося человека обусловлена не только социально определяемыми условиями его образования. Она существенно зависит и от природоопределенных свойств, которые изнутри предопределяют мотивы его образовательной деятельности. Конечно, при осуществлении образовательных отношений человека в системе образования вполне возможно в состав его образовательной компетенции включать

некоторые субъектные полномочия образующегося человека. Однако независимо от потребностей образующегося человека остается обязательным требование к нему – усвоить нормативно-регламентированное содержание образования.

Надо подчеркнуть, что, следуя традициям социальной действительности, каждый человек формально и (или) неформально принимает на себя полномочия, обусловленные обязательным участием в образовательных отношениях с представителями государственно-общественной системы образования. С той или иной долей успеха человек исполняет соответствующую образовательную компетенцию. Он усваивает предложенное ему содержание образования. Полученные при этом знания, развившееся отношение к ним, приобретенные умения пользоваться накопленным опытом педагогически сопровождаемой образовательной деятельности предопределяют развитие его компетентности не только в образовательных отношениях, но и в иных аспектах жизнедеятельности. Изменения в состояниях здоровья, происходящие вследствие исполнения образовательной компетенции, так или иначе, характеризуют тенденцию в развитии энергоресурсов его здоровья. В целом образовательные отношения человека в социально обусловленной системе образования как-то влияют на развитие его личного энергоресурса.

Принимая на себя полномочия в отношениях с теми или иными представителями государственно-общественной системы образования, человек обязывается руководствоваться общепринятыми правилами. Это является своеобразной предпосылкой выстраивания социально приемлемых отношений человека с окружением. Он вольно или невольно адаптируется к нормам и правилам, установленным в организациях государственно-общественной системы образования. Приобретая опыт взаимоотношений с представителями той или иной образовательной организации, человек не только усваивает знания и умения. Он развивается и как личность, имеющая то или иное отношение к себе или окружению.

Другими словами, образовательные отношения человека с представителями государственно-общественной системы образования определенно влияют на развитие его личного энергоресурса [4]. Усвоенные знания, приобретенные умения пользоваться ими в тех или иных отношениях с собой или с окружением, развившиеся личностные качества и другие аспекты его здоровья предопределяют отношение человека к различным сторонам реального мира. На соответствующем фундаменте, руководствуясь развившимися личными ценностными ориентациями, он самоопределяется в приоритетах в продолжении жизнедеятельности. В частности, это относится и к его образованию.

Прежде всего, речь идет о самообразовании человека как о способе удовлетворения личных потребностей в познании себя и окружения путем

освоения информации об этом. В самообразовании образовательные отношения человека отличаются тем, что он усваивает и (или) осваивает информацию не по обязанности, а ради достижения лично значимых целей. Его самообразование может происходить во всех видах отношений с окружением и (или) с собой. В частности, самообразование человека может происходить в образовательных отношениях с государственно-общественной системой образования. Это случается тогда, когда он испытывает потребности в усвоении какой-то части содержания образования.

Справедливости ради следует подчеркнуть, что самообразование человека является одним из существенных признаков его жизнедеятельности. Это обусловлено тем, что склонность к самообразованию человека является его природоопределенным свойством. Естественные потребности человека к познанию своего окружения подталкивают его к поиску и освоению информации о свойствах окружающего его мира. Благодаря этому человек становится способным выстраивать свои отношения с окружением. На первых порах жизнедеятельности оно происходит в режиме саморегуляции.

По сути, самообразование человека, непроизвольно происходит при осуществлении отношений с разными сторонами его окружения. Воспринимая информацию как следствие отношений с теми или иными представителями окружения, человек одновременно и учится. Другими словами, образование человека происходит не только посредством осуществления отношений с государственно-общественной системой образования. Оно происходит и в иных аспектах жизнедеятельности человека. Поэтому правомерно утверждать, что самообразование сопровождает человека и в реализации образовательных отношений с государственно-общественной системой образования. Фактически, самообразование человека происходит непрерывно во всех аспектах жизнедеятельности, в числе, и в отношениях с собой. При этом, активная жизнедеятельность человека в разнообразных ее аспектах существенно влияет на образование человека. В процессе жизнедеятельности человек не только усваивает информацию из искусственных источников. Он имеет возможность осваивать информацию в процессе жизнедеятельности и тут же пользоваться ею в осуществлении отношений, как с окружением, так и с собой.

Рассматривая самообразование человека как природоопределенное явление, сопровождающее его жизнедеятельность, следует выделить в нем два взаимно дополняющих друг друга аспекта. С одной стороны, самообразование человека происходит непроизвольно (без явно выраженного намерения осваивать информацию). Проявляя активность в жизнедеятельности, человек осуществляет определенные отношения с кем-то (чем-то). Они объективно (независимо от него) связаны с информацией, которая вольно или невольно, воспринимается человеком и фиксируется в его внутреннем мире. Соответствующая информация становится одним из элементов, входящих в состав его компетентности.

Дело не в том, осознана ли человеком зафиксированная в его внутреннем мире информация или нет. Важно то, что в соответствующей информации отражен опыт осуществленных отношений человека с кем-то (чем-то). А он-то и может стать приращением компетентности человека как элемента его личного энергоресурса. К тому же, совершая действия в отношениях с кем-то (чем-то), человек испытывает эмоциональные переживания. Другим следствием совершенных действий являются нагрузки на организм и на психику. Информация о пережитых ощущениях является свидетельством об изменениях в состоянии здоровья человека, которые постепенно могут приводить к иному его качеству.

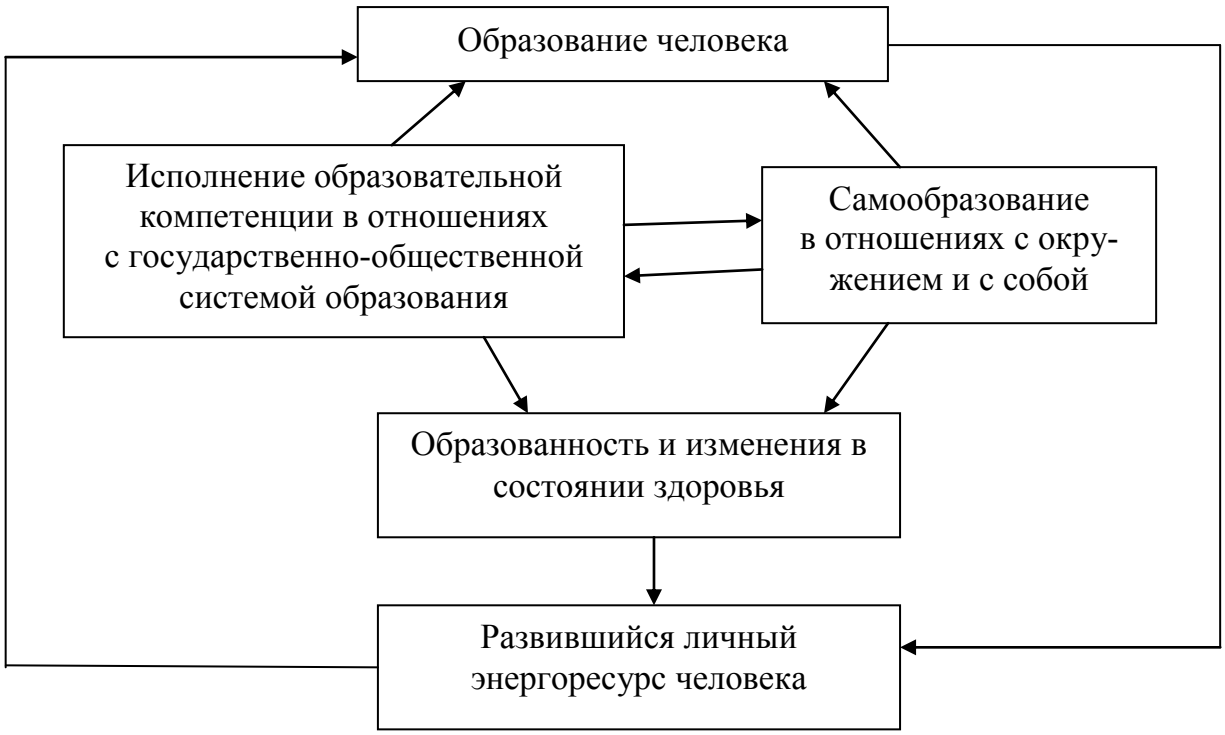
Непроизвольно осуществляющееся самообразование человека в отношениях с окружением и с собой объективно способствует обогащению его внутреннего мира неформальными знаниями, извлеченными из освоенной информации. Такого рода знания, как правило, субъективны, и по форме, и по содержанию. Однако они тоже влияют на компетентность человека и часто превалируют в выражении его отношения к разным аспектам окружения и к себе. Именно непроизвольно осуществляющееся самообразование является источником оригинальности мировоззрения человека, что неотвратимо сказывается на развитии его отношений с кем-то (чем-то).

С другой стороны, человек может осуществлять самообразование намеренно (целенаправленно). Этому способствует развивающееся сознание человека, обусловленное пониманием ценности накопленных цивилизацией знаний и их полезности для себя. Тогда у него активируется потребность к овладению соответствующими знаниями. Отличительной особенностью целенаправленного самообразования человека являются затруднения в выборе тех знаний, которыми он хотел бы овладеть, в подборе тех источников информации, которые соответствуют его развившимся познавательным способностям. Определенные трудности могут возникать и в плане организации целенаправленного самообразования.

Целенаправленному самообразованию человека могут способствовать отношения с организациями государственно-общественной системы образования. Речь идет о наставничестве субъектов педагогического сопровождения при удовлетворении познавательных потребностей образующегося человека. Компетентный наставник может успешно направлять его самообразование, оказывая поддержку и помощь в достижении познавательных целей человека. Неформальные отношения его и наставника снимают психическое напряжение, обусловливаемое обязательствами перед внешними субъектами образования. Человек оказывается ограниченным только обязательствами перед собой и заботой о продолжении сотрудничества с наставником.

Независимо от методов осуществления целенаправленное самообразования отличается приоритетом отношений человека с собой, направленных на освоение либо усвоение лично ценных для него знаний и на приобретение умений пользоваться ими в своей жизнедеятельности. Отношения самообразующегося человека с окружением являются фоном, который может либо нет способствовать достижению целей самообразования. Каждый самообразующийся человек является ведущим субъектом целенаправленного самообразования. В этом также проявляется отличительная особенность самообразования по сравнению с исполнением образовательной компетенции в государственно-общественной системе образования.

Исполнение в государственно-общественной системе образования образовательной компетенции и самообразование совокупно характеризуют образование человека. Оно охватывает разные аспекты отношений человека с собой и с окружением. Находясь в них, он осваивает и усваивает разнообразную информацию, на которой базируются его личные знания. Они, в свою очередь, предопределяют отношения человека к себе, к разным аспектам окружения. Пользуясь знаниями в исполнении образовательный компетенции и (или) в самообразовании, он приобретает умения и опыт пользования ими. Все это характеризует развившуюся образованность как предпосылку компетентности человека. Затраченные при этом усилия на познание себя и окружения предопределяют изменения в его здоровье, которые вместе с образованностью характеризуют развившийся личный энергоресурс как результат свершившего образования человека (рис. 1).



Образование человека как отношения с собой и с окружением

Таким образом, образование человека предстает специфической стороной его отношений с собой и с окружением. Особенность образования человека состоит в произвольном и непроизвольном освоении воспринимаемой информации. Пользуясь соответствующими знаниями, человек совершает обмен информацией с окружением. Тем самым, он, расширяя и углубляя отношения с окружением и с собой, становится способным к целенаправленному самовыражению. Параллельно появляются дополнительные внутренние предпосылки к усилению продуктивности его образования в разных аспектах отношений с окружением и с собой.

В этом видится залог непрерывного образования человека, активно и разносторонне проявляющегося в отношениях с окружением и с собой.

Библиографический список

1. Об образовании в Российской Федерации. URL: http://xn--80abucjiibhv9a.xn--p1ai/%D0%B4%D0%BE%D0%BA%D1%83%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B/2974.

2. Сериков, Г.Н. Гуманно ориентированная интерпретация профессиональных умений педагогов / Г.Н. Сериков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки. – 2009. – Вып. 5. – № 31 (164). – С. 10–16.

3. Сериков, Г.Н. Образование и развитие человека / Г.Н. Сериков. – М.: Мнемозина, 2002. – 416 с.

4. Сериков, Г.Н. Гуманно ориентированная системно-синергетическая интерпретация человеческого ресурса / Г.Н. Сериков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки». – 2010. – Вып. 10. – № 36 (212). – С. 9–17.

К содержанию

УДК 378.014 + 378.026.1
ББК Ч448.44

СВЯЗЬ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНО-НАУЧНОГО ПРОЦЕССА В УНИВЕРСИТЕТЕ С ИНТЕГРАТИВНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ОБРАЗОВАНИИ

Ю.В. Тягунова

В ходе теоретического исследования была выявлена закономерность между созиданием и реализацией проектов образовательно-научного процесса в университете и интеграцией образования, науки и производства, наблюдаемой в современном высшем образовании в РФ. Учет характера этой связи в практике высшего образования способствует наращиванию человеческого ресурса участников проектирования образовательно-научного процесса.

Ключевые слова: проектирование образовательно-научного процесса, интеграция образования и науки в университете, закономерности педагогического проектирования.

Необходимость проектировать образовательно-научный процесс (далее ОНП) в университете в соответствии с новыми стандартами обусловила теоретическое осмысление связей различных аспектов проектирования с другими педагогическими явлениями. Совокупность связей была подвергнута упорядочению. В частности, выявленная связь проектирования ОНП с интегративными процессами в образовании была отнесена к атрибутивным.

К атрибутивным относятся опосредованные связи двух явлений, суть которых в том, что одно явление является признаком существования другого, сопровождает другое [1]. Скорее оба явления являются следствиями одной и той же, скрытой от исследования причины.

Формулировка связи следующая: проектирование ОНП сопровождается появлением новых организационных форм интеграции образования, науки и производства.

Все участники ОНП: государство, преподаватели, студенты, работодатели являются, согласно новым ФГОС, субъектами проектирования основных образовательных программ в университете. Диалогичный характер образовательно-научного процесса обусловлен гуманистической природой субъектов его проектирования и является требованием времени. То есть, ведущим средством перехода к компетентностной модели образования является социальный диалог и взаимодействие с партнерами (с другими участниками образовательно-научного процесса). В ходе исполнения данной функции каждый субъект проектирования обогащается опытом проектировочной деятельности не только на своем участке работы, но и осмысливает суть проектировочной деятельности других субъектов, видит процесс про-

ектирования в целом [2]. Проектирование ОНП для субъекта является действием, своеобразным упражнением, направленным на формирование (для студента) и повышение уровня (для преподавателя и работодателя) общекультурных компетенций социального взаимодействия, профессиональных компетенций созидания новации, ее оценки и реализации (указанные компетенции в различных вариантах входят во ФГОС всех направлений подготовки как результаты образования и определяют его содержание).

В свою очередь опыт участия в проектировании влияет на разные аспекты человеческого ресурса каждого субъекта. Ценность производственного, научного, образовательного ресурса субъектов возрастает по мере накопления опыта участия в проектировании. То есть, в проектировании образовательно-научного процесса, происходит наращивание человеческих ресурсов субъектов образования. Таким образом, каждый проектировщик ОНП в ходе диалога субъектов одновременно является и субъектом «проектирующим» и субъектом «проектируемым». Указанные ресурсы впоследствии проявляются как компетенции (действия) и являются конкурентным преимуществом субъекта в поле его профессиональной деятельности [4]. Для демонстрации в своей практической деятельности данных образовательно-научных компетенций (преимуществ) выпускнику университета, работодателю и педагогу нужны различные формы интеграции производства образования и науки. Так бывший выпускник, как представитель организации работодателя, может оставаться участником проектов, связанных непосредственно с проведением образовательного процесса; проектов в области проведения научно-практических и профессиональных конференций; проектов в области содействия и организации издательской деятельности и экономической поддержки вуза.

Как самостоятельный субъект выпускник может:

- руководить учебно-исследовательской работой студентов;
- выступать рецензентом выпускных квалификационных работ;
- осуществлять научно-исследовательскую работу в лабораториях производства и результаты исследований представлять в образовательном процессе образовательной организации как приглашенный преподаватель;
- участвовать в проектировании новых и коррекции уже апробированных образовательных программ.

Преподаватель, обязанный осуществлять образовательно-научную деятельность, должен проверять ее результаты в производственном процессе, там же он может черпать материалы для обновления содержания образования по дисциплине и уточнения направления учебно-исследовательских работ студентов.

Резюмируя сказанное, следует отметить, что участие в проектировании ОНП наращивает производственный, исследовательский и образовательный аспекты человеческого ресурса субъектов проектирования, что обу-

словливает стихийное или целенаправленное продолжение взаимодействия субъектов проектирования в различных организационных формах уже после реализации совместно созданного проекта. Вместе с тем, ФГОС, задающий необходимость социального диалога данных субъектов в проектировании, не определяет организационные формы их взаимодействия, не регламентирует режим коммуникаций субъектов. Это приводит к возникновению новых, уникальных для каждого набора субъекта проектирования организационных форм их взаимодействия. Поскольку субъекты проектирования являются представителями разных сфер деятельности (образования, науки, производства), в масштабе вуза новые успешные формы взаимодействия отдельных представителей данных сфер в ходе проектирования ОНП тиражируются и становятся организационными формами интеграции уже сфер, а не их представителей.

В данной закономерности прослеживается и обратная связь: появление различных организационных форм интеграции образования, науки и производства является атрибутом участия представителей этих сфер в проектировании ОНП в университете [3]. Анализируя практическое состояние проблемы интеграции, мы можем резюмировать, что уже в начале XXI века производство, наука и образование признали наличие общих проблем, необходимость в схожих условиях функционирования, органическую связь между собой, реализовать которую можно было в совместном проектировании различных аспектов образовательного процесса в вузе.

С одной стороны, наука объективно является той фундаментальной базой, на которой строится вся сфера образования и обеспечивается функционирование производства. Также наука обеспечивает содержательное наполнение всех дисциплин в сфере образования. Во всех вузах, на многих производствах, существуют научные подразделения; часть подразделений носит производственно-научно-образовательный характер (отделы НИОКР, учебно-производственные отделы, магистратура, аспирантура, докторантура), на кафедрах проводится научно-исследовательская работа (НИР), в НИР вовлекаются студенты, а во многих научных организациях существуют свои учебные подразделения в форме аспирантуры, методологических семинаров, подготовка квалифицированных кадров на уровне магистров, кандидатов и докторов наук для сферы образования осуществляется в сфере науки.

С другой стороны, квалифицированные кадры для сферы науки, играющие в ней роль главной движущей силы, поставляют сфера образования и сфера производства. В то же время значительная часть высококвалифицированных специалистов одновременно принадлежат к сферам науки, образования, производства, что находит свое выражение, в наличии у сотрудников одновременно и ученых степеней (за вклад в науку) и ученых званий (за заслуги в области образования). Само понятие «стаж научно-

педагогической деятельности», закрепленное в практике кадрового менеджмента, отражает в себе объективный факт интеграции науки и образования. И наконец, законодательно современные университеты, наделены и правом и обязанностью, интегрировать в единую структуру звенья науки, производства и образования. Такая интеграция трех указанных сфер предполагает их взаимовлияние. Поэтому наиболее целесообразной формой скорого влияния производства и науки на образование, реализации в нем своих интересов и является участие представителей этих сфер в проектировании образовательно-научного процесса в университете.

На практике, с возникновением необходимости совместно проектировать ОНП распространились, как предусмотренные законодательством организационно-правовые формы интеграции науки, производства и образования, так и новые структуры, создаваемые в иных формах, с правовым статусом, регламентированным только локальными нормативно-правовыми актами (таблица).

Таблица

Формы интеграции производства, образования и науки

Традиционные формы интеграции	Новые формы интеграции	Экспериментальные формы интеграции
учебные классы в научно-исследовательских институтах, научно-производственных, производственных и других структурах	центры защиты интеллектуальной собственности, центры сертификации лизинга консалтинга	межвузовская корпоративная автоматизированная библиотечная сеть на базе новых информационных технологий
центры переподготовки и повышения квалификации научно-педагогических кадров и специалистов образовательных учреждений и организаций различных форм собственности	центры коллективного пользования с уникальным научным оборудованием и приборами, центры высокопроизводительной обработки информации	центр совместных научных исследований в области высоких технологий и совершенствования образовательного процесса в университете с привлечением высококвалифицированных научных кадров РАН
конверсионный технопарк, технополисы	лабораторно-экспериментальные комплексы и площадки	сети инновационно-технологических бизнес-инкубаторов.
комплекс: университет, научно-исследовательские институты и конструкторские бюро	инновационные научно-образовательно-технологические парки, центры, комплексы	малые инновационные предприятия компании и фирмы, для апробации «рисковой» технологии
Центр высоких технологий, центр международного сотрудничества вузов	творческие коллективы для реализации отдельных проектов и программ	распределенная электронная библиотека по профильным специальностям
филиалы кафедр в НИИ	инжиниринговые фирмы	Интернет-университеты

Здесь все же следует отметить, что отсутствие законодательного закрепления современных интеграционных производственно-научно-образовательных структур привело к иллюзии их бесконечного разнообразия. То есть имеет место существование одинаковых по сути форм интеграции с разными названиями.

Таким образом, проектирование ОНП и возникновение новых форм интеграции образования, науки и производства являются атрибутами друг друга. Выявленная атрибутивная связь позволила раскрыть основное качества объекта «проектирование образовательно-научного процесса», его внутреннюю характеристику – интегративный образовательно-научно-производственный характер и установить соотношение с родовым понятием (созиданием нового) через видовой признак – нацеленность на наращивание человеческого ресурса.

Библиографический список

1. Кочетов, А.И. Педагогическое исследование: учеб. пособие для аспирантов, студентов-дипломников и учителей / А.И. Кочетов. – Рязань: РГПИ, 1971. – 178 с.

2. Муравьева, Г.Е. Теоретические основы проектирования образовательных процессов в школе: монография / под ред. М.М. Левиной. – М.: Б.И., 2002. – 200 с.

3. Проектная деятельность как способ организации семиотического образовательного пространства: Электронный учебник [Электронный ресурс]. – URL: http://bg-prestige.narod.ru/proekt/index.html.

4. Тягунова, Ю.В. Эволюция теоретико-методологических оснований проектирования образовательного процесса в университете / Ю.В. Тягунова // Научный журнал «Известия Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота: Психолого-педагогические науки (теория и методика профессионального образования)». – 2012. – № 3(21). – С. 6–18.

К содержанию

УДК 658.382.3 + 612.014.424

АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ЗАБЫВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА

О.А. Ханжина

В статье рассматривается методика определения скорости забывания информации по электробезопасности персонала. Выделяется и актуализируется проблема аттестации электротехнического персонала, связанная с наличием особо опасных и вредных производственных факторов. Приводятся статистические данные электротравматизма.

Ключевые слова: электробезопасность, забывание информации, методика, персонал.

Выполненный анализ становления системы аттестации электротехнического персонала, изучение зарубежного опыта, краткий обзор технических средств и комплексов, предназначенных для повышения эффективности обучения по вопросам охраны труда, показатели, что применительно к электротехническому персоналу, профессиональная деятельность которого характеризуется наличием особо опасных и вредных производственных факторов, вопрос обоснования периодичности аттестации не ставился и не решался в каком-либо виде. Сложившаяся система аттестации во многом является необоснованной, спонтанной, не учитывающей каких-либо личностных свойств персонала.

Кроме того, практика применения сложившейся системы аттестации показывает ее низкую эффективность, что подтверждается статистикой электротравматизма [4].

Индивидуальный подход к определению периодичности аттестации электротехнического персонала позволит, по нашему мнению, придать некоторую соревновательность среди персонала в качестве действующих норм правил охраны труда, что не может не сказаться на повышении уровня электробезопасности.

Для достижения указанных целей в исследовании предлагается решить следующие задачи:

1. Разработать методику исследования материала по вопросам безопасности в памяти электротехнического персонала.

2. Выполнить исследования по оценке сохранения материала по вопросам безопасности в памяти электротехнического персонала.

3. Определить группы лиц с близкими индивидуальными характеристиками скорости забывания информации.

4. Разработать систему аттестации, основанную на индивидуальных характеристиках работников.

Имея кривую скорости забывания информации [7] и данные о результатах последней аттестации можно определить дату следующей аттестации, то есть время до того периода, когда знания ПТБ уже достаточно забыты и необходимо их повторение. Устанавливать экспериментально данные кривые для каждого работника не представляется возможным, так как для этого требуется достаточно много времени. Поэтому предлагается экспериментально выделить группы лиц с похожими индивидуальными характеристиками скорости стирания информации в памяти по таким признакам, как образование, стаж работы, возраст и т.д.

Для обоснования периодичности проверки знаний по ПТБ в зависимости от индивидуальных характеристик работника была разработана методика определения скорости стирания информации в памяти.

В экспериментальной психологии [2,8] существуют следующие методы измерения сохранения материала в памяти:

– метод сбережения (savingmethod). При этом методе обучающиеся через некоторый промежуток времени снова заучивают освоенный ими ранее материал. Повторное заучивание сравнивается с первоначальным в отношении времени, числа повторений и числа ошибок. Результаты измерений по этому методу часто выражаются в процентах времени первоначального научения;

– метод объема воспроизведения (recallscore), то есть процента ранее усвоенного материала, который может быть воспроизведен по памяти в более позднее время;

– по третьему методу испытуемым предъявляется материал, заученный раньше, вместе с некоторыми новыми элементами, ранее не заучивавшимися. Испытуемые должны указать эти новые элементы в ранее заученном материале. Количество данных ими правильных ответов является мерой их способности узнавания (recognitionmemory);

– если материал заучивался в определенной последовательности, то часто применяется четвертый метод, при котором обучающимся предлагается расположить заученные ими блоки в том порядке, в котором они были первоначально заучены. Этот способ называется методом реконструкций.

Ни один из этих методов нельзя признать вполне удовлетворительным. Воспроизведение иногда оказывается довольно ненадежным критерием [8]. Материал может быть полностью «забыт», то есть ни один из его элементов не может быть воспроизведен по памяти, при повторном же заучивании он быстро и легко усваивается или же испытуемый его легко узнает как материал, заучивавшийся раньше. Однако именно этот метод воспроизведения используется в современной системе контроля знаний.

Метод узнавания не дает представления о степени запоминания материала в его первоначальной последовательности, а отклонение от первоначально усвоенного порядка сбивает некоторых испытуемых [8].

Встречает возражение и метод повторного научения (relearning), так как получаемые при нем результаты характеризуют не только сохранение, но и

способность к научению [8]. Когда же в качестве критерия берется время первоначального заучивания, то не учитывается возможность переноса навыков. Вудворс [8] (1938) пишет «В сущности, мы должны сравнивать время повторного научения не со временем первоначального заучивания, а с тем временем, которое теперь затрачивается на выучивание эквивалентного задания».

Нами для решения поставленных задач был выбран метод объема воспроизведения, как наиболее подходящий в нашем случае, так как в процессе работы работник должен воспроизвести по памяти безопасные методы работы. К тому же метод объема воспроизведения наиболее соответствует современной системе контроля знаний.

Для определения изменения информации в памяти и во времени нами разработана методика, которая состоит в следующем:

1. Забывание неосмысленного материала

Индивидуально каждому испытуемому дается листок с 15 словами с задачей запомнить их возможно лучше, а по окончании воспроизвести их (на запоминание несколько минут). Через определенные промежутки времени (промежутки выбираются как можно больше: min– 30 мин., max – 1 год) испытуемые должны вновь воспроизвести их [5].

2. Забывание фраз

Индивидуально каждому испытуемому дается листок с 12 фразами, часть фраз по содержанию не соответствует действительности. Ставится задача как можно лучше их запомнить (на запоминание – несколько минут). По окончании испытуемые воспроизводят их сразу и через определенные промежутки времени (промежутки выбираются также как и выше) [5].

3. Забывание изученного ранее материала

В педагогике, в частности у Беспалько В.П. [1], рассматриваются следующие уровни овладения мастерством (усвоения деятельности):

I уровень – действие с подсказкой (по узнаванию или уровень знакомства);

II уровень – действие по памяти (по воспроизведению или алгоритмический уровень);

III уровень – продуктивная деятельность с опорой на схожие алгоритмы (уровень деятельности в нестандартной ситуации);

IV уровень – продуктивная деятельность в новой, «нехоженной» области (исследовательская деятельность, творческий уровень).

При изучении вопросов, связанных с электробезопасностью производственной деятельности, необходимым является II уровень освоения деятельности, так как от работников требуется воспроизведение по памяти безопасных способов работы. Проконтролировать знания персонала и забывание по Правилам техники безопасности можно с помощью тестов. По каждому из описанных выше уровней усвоения формируются тесты. Однако нас интересовали только I и II уровни, так как по вопросам безопасности II уровень усвоения деятельности является достаточным.

Задание для теста I уровня должно содержать в явном виде все компоненты задачи: Цель, Ситуацию и Деятельность по ее решению. От работников только требуется дать заключение об их совместимости (узнавание ранее изученного).

Задание для теста II уровня содержит Цель и Ситуацию, а работнику по памяти надо воспроизвести подходящую деятельность для достижения заданной цели в заданной ситуации.

Были составлены тесты IиII уровня по материалам ПТБ, ПОТ Р М-016-2001 [6,3], притом вопросы касались в первую очередь тех работ, с которыми работник сталкивается в своей деятельности.

Количество вопросов в тестах зависит от требуемой «надежности тестирования». Понятие надежности тестирования близко к понятию «ошибка метода». Величина надежности измеряется так называемым коэффициентом надежности, изменяющимся от нуля до единицы. Конечно, тестирование будет надежно «на сто процентов», если контрольные задания охватят весь контролируемый материал. Однако это и невозможно, и нерационально. Поэтому приходится договариваться о разумном значении необходимого коэффициента надежности. Нами был составлен тест, содержащий 60 существенных операций, обеспечивающий коэффициент надежности больше 0,7. Тест из 60 существенных операций работники пишут более одного часа, введение же в тест большего количества существенных операций привело бы к большим временным затратам. Тестирование проводится в течение года с интервалом между проверками 1–2 месяца.

Тест состоит из задания на деятельность данного уровня и эталона, то есть образца полного и правильного выполнения действия. По эталону легко определяется число существенных операций, ведущих к решению задания теста усвоения. Сравнение ответа работника с эталоном по числу правильно выполненных учащимся операций теста из всех необходимых дает возможность определить коэффициент усвоения.

Данный коэффициент грамотнее было бы назвать коэффициентом знаний или уровнем остаточных знаний, так как тестирование проводится через какой-то отрезок времени после обучения. Указанные эксперименты проводятся с людьми разного возраста, пола, образования, стажа работы, группы по электробезопасности для определения различий в скорости забывания информации.

Библиографический список

1. Беспалько, В.П. Педагогика и прогрессивные технологии обучения / В.П. Беспалько – М.: М-во образование РФ, институт развития профессионального образования, 1995. – 336 с.

2. Зинченко, Т.П. Когнитивная и прикладная психология / Т.П. Зинченко. – М.: Московский психолого-социальный институт; Воронеж: Издательство НПО «Моден», 2000. – 608 с.

3. Межотрослевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок ПОТ Р М – 016-2001. – М.: Госэнергоиздат, 2001. – 144 с.

4. Окраинская, И.С. Анализ причин электротравматизма на предприятиях цветной металлургии / И.С. Окраинская // Безопасность жизнедеятельности: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЧГТУ, 1992. – С. 58–65.

5. Окраинская, И.С. Методика определения параметров процесса забывания информации / И.С. Окраинская, Е.В. Спиридонова // Безопасность жизнедеятельности: Сб. науч. тр. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – С. 68–74.

6. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. – М.: Госэнергоиздат, 1994, Э АО «Энергосервис». – 138 с.

7. Присняков, В.Ф. Математическое моделирование переработки информации оператором человеко-машинных систем / В.Ф. Присняков, Л.М. Приснякова. – М.: Машиностроение, 1990. – 248 с.

8. Ховланд, К. Изучение и сохранение заученного у человека / К. Ховланд; пер. с англ. под ред. С. Стивенса // Эксперементальная психология. – М.: Изд-во иностр. лит. 1963. – Т. 2. – С. 124–225.

К содержанию

УДК 621.9.025

СПЕЦИАЛЬНЫЙ РОТАЦИОННЫЙ РЕЖУЩИЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

М.Ю. Попов

Рассмотрены особенности формирования фасонных поверхностей перспективными режущими инструментами – ротационными. Установлена возможность формирования фасонных поверхностей с учетом особенностей параметров ротационных режущих инструментов и их установок относительно обрабатываемых заготовок. Показаны основные закономерности при разработке операций точения ротационным инструментом фасонных поверхностей.

Ключевые слова: ротационный режущий инструмент (РРИ), формирование фасонных поверхностей, параметры РРИ и его установки.

В современном машиностроении высокая производительность обработки материалов резанием достигается за счет станков с ЧПУ и режущих инструментов. Последние обеспечивают основные характеристики формируемых поверхностей деталей – точность размеров, качество поверхности, а также физико-механические свойства поверхностных слоев. Традиционно развитие возможности обработки инструментами основывалось, как правило, на совершенствовании инструментальных материалов. Каждый

последующий тип материала обеспечивал повышенную теплостойкость инструмента при работе, что позволяло увеличить скорость резания и обрабатывать труднообрабатываемые материалы. В целом следует отметить и еще об одной особенности традиционных режущих инструментов. Обработка заготовки осуществляется режущим лезвием, который достаточно узок и непрерывно контактирует с заготовкой, воспринимая тепловые и силовые нагрузки. Такое ограничение приводит к быстрому перегреву при работе на высоких скоростях резания, пониженной возможности обработки труднообрабатываемых материалов, а также быстрому износу небольшого участка инструмента.

Отмеченные недостатки традиционных инструментов преодолевают так называемые ротационные инструменты. Они обладают режущим элементом, который непрерывно вращается в процессе обработки. Это обеспечивает наличие постоянно обновляемого участка режущего лезвия, участвующего в процессе резания. Именно эта особенность ротационного инструмента способствует повышенному теплоотводу из зоны резания и возможность снижения абсолютной скорости резания с применением инструментальных материалов пониженной теплостойкости. Ротационный инструмент способен регулировать степень пластической деформации поверхностного слоя обработанных поверхностей.

Указанные преимущества ротационных инструментов в конечном итоге способствуют повышению режимов резания и, соответственно, повышению производительности. Последнее наиболее актуально для обработки труднообрабатываемых материалов: жаропрочных и высокопрочных сплавов, в том числе на основе титана и никеля, закаленных сталей и сталей с износостойкими покрытиями, а также различных композитных материалов.

Существующие разработки по применению ротационных режущих инструментов (РРИ) в основном направлены на формирование простых поверхностей (цилиндрических, плоских). Однако современные и перспективные изделия имеют детали с фасонными поверхностями, которые зачастую обеспечивают плавность работы, хорошее зацепление. К таким изделиям следует отнести шарико-винтовые пары, компрессоры с винтовыми парами, роторные насосы и т.п. Кроме этого, как правило, другие детали имеют различные винтовые канавки как по расположению относительно оси (прямолинейные, винтовые), так и в поперечном сечении. Поэтому необходимо исследовать РРИ для получения фасонных поверхностей.

Для обеспечения работы ротационных инструментов необходимо, во-первых, определить их рабочие параметры, во-вторых, назначить параметры установки режущего элемента относительно заготовки. Одновременное соблюдение этих требований накладывает определенный отпечаток на используемые конструкции инструментов конкретных типов ротационных инструментов с учетом обрабатываемых поверхностей. Для упрощения выбора конструкции разработана обобщенная классификация ротационных инструментов [1]. Параметры установки режущих элементов определяется

формой фасонной поверхности и схемой резания (для РРИ приняты первая схема – стружка сходит по торцовой плоскости режущего элемента и вторая – стружка перемещается по периферии режущего элемента).

Примером комплексной конструкции РРИ является ротационный резец [2], способный проводить обработку, как по первой, так и по второй схеме резания. Резец имеет возможность расположения режущего элемента выше или ниже оси детали по любой схеме резания, а также устанавливать угол наклона режущего элемента относительно оси детали в пределах от -90 до +90º. Такое конструктивное исполнение позволяет осуществлять обработку фасонных поверхностей практически любого профиля.

Одной из особенностей ротационного инструмента является применение режущих элементов с круглой или винтовой режущей кромкой. В первом случае режущая кромка представляет собой окружность, которая в процессе контакта с заготовкой при наличии отличного от нуля угла ее наклона относительно оси цилиндрической заготовки трансформируется в эллипс. Последний в большинстве случаев и будет профилировать фасонный участок поверхности заготовки. В зависимости от формируемого профиля следует учитывать резание большой или малой дугами эллипса, образуемого установкой режущего элемента относительно заготовки.

Для обеспечения формирования фасонных поверхностей, углубленных относительно поверхности детали, режущие элементы в виде усеченного конуса зачастую не могут проводить обработку в связи с затиранием задней поверхности режущего элемента о формируемую фасонную поверхность. Поэтому особенностью обработки фасонных поверхностей РРИ является использование затылованных режущих элементов [3].

Таким образом, обработка фасонных поверхностей РРИ обуславливает комплексный учет взаимосвязанных условий, который исходит из характера фасонной поверхности и особенностей применения РРИ. К последнему следует отнести применение затылованных режущих элементов, их установку относительно детали в зависимости от назначение схемы резания, профиля фасонной поверхности, обрабатываемого материала.

Библиографический список

1. Попов, М.Ю. Выбор параметров ротационных режущих инструментов для обработки фасонных поверхностей на основе обобщенной классификации / М.Ю. Попов, С.Н. Евтухов, Д.А. Алексеенко // «Новые технологии». – М.: РАН, 2012.

2. Устройство для ротационного резания. Патент на полезную модель № 132009. Заявка № 2013112358 от 19.03.2013г.

3. Режущий элемент для обработки фасонных поверхностей методом ротационного точения. Патент на полезную модель № 131321. Заявка № 2013112361 от 19.03.2013г.

К содержанию

ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ (КОПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ)

УДК 697.1/.5:658.562 + 681.536.015.8

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В.В. Абдуллин

В статье рассматривается система управления отоплением здания с коррекцией управляющего воздействия по прогнозной оценке температуры воздуха в помещениях. Вычисление прогнозной оценки производится на основе идентификации тепловых параметров здания в реальном времени. Описана концепция предлагаемой системы, приведена структурная схема. Показана возможность практического применения метода путем проверки на реальных данных.

Ключевые слова: идентификация; экспоненциальная фильтрация; тепловые параметры здания; реальное время; отопление.

Повышение эффективности систем отопления является важной задачей энергосбережения. Вместе с тем необходимо понимать, что первоочередной задачей модернизации систем отопления является обеспечение комфортного микроклимата, и лишь затем – экономия потребляемых ресурсов.

Для целей улучшения комфортности и повышения эффективности теплопотребления корпуса 3БВ ЮУрГУ была смонтирована автоматизированная система управления и контроля качества отопления корпуса 3БВ, включающая в себя подсистему регулирования теплопотребления и подсистему мониторинга качества отопления [1].

Для создания подсистемы мониторинга качества отопления в корпусе 3БВ ЮУрГУ создана сеть датчиков для мониторинга температуры воздуха в помещениях. На первом этапе в различных помещениях здания установлены 24 цифровых сенсора температуры *Dallas 18B20*, объединенных сетью *MicroLan* (*1-wire*). Второй этап (III квартал 2014 г.) предполагает установку до 30 дополнительных датчиков, объединенных в беспроводную сенсорную сеть *WirelessHART* [2–4].

Подсистема регулирования теплопотребления представляет собой оборудование АИТП, установленное в тепловом узле здания. Для реализации алгоритмов управления был установлен свободно-программируемый контроллер *Segnetics SMH-2G*.

Управление отоплением осуществляется по трехуровневой схеме. Нижний и средний уровни реализованы с использованием стандартных алгоритмов: соответственно, ПИД-регулятор по уставке прямой воды в контуре отопления и температурный график зависимости температуры прямой воды от температуры наружного воздуха. На верхнем уровне предусмотрена коррекция выхода температурного графика отопления, при этом величина коррекции формируется посредством идентификации тепловых характеристик здания в реальном времени.

Структурная схема системы управления с идентификацией в реальном времени

Температура воздуха в помещениях здания $T_{пом}$ зависит от его объема, типа ограждающих конструкций, количества подаваемой тепловой энергии $Q_{ист}$, действия внутренних и внешних возмущающих факторов, включающих температуру наружного воздуха $T_{нар}$, солнечную радиацию $J_{рад}$, ветровое воздействие $V_{вет}$, внутреннее тепловыделение $Q_{внут}$ и аккумулируемую в здании теплоту $Q_{ак}$ (рис. 1).

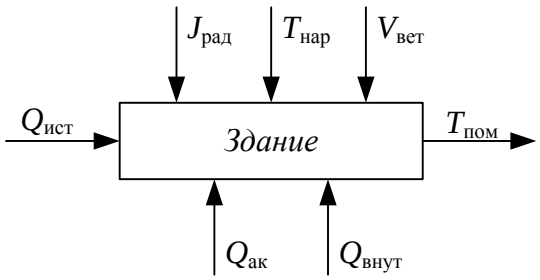


Рис. 1. Факторы, влияющие на температуру воздуха в помещении

Представленные на рис. 1 сигналы $T_{пом}$, $Q_{ист}$ и $T_{нар}$ доступны непосредственному измерению в реальных условиях, в отличие от сигналов $J_{рад}$, $V_{вет}$, $Q_{внут}$ и $Q_{ак}$, непосредственное измерение которых на практике затруднительно.

В работе предложен подход, основанный на оценке обобщенного температурного воздействия, которое характеризует интегральное действие указанных выше факторов. Применение данного подхода к идентификации тепловых режимов здания подробно изложено в работе [5].

Результатом идентификации является оценка прогнозного (упреждающего) значения температуры воздуха в помещении, учитывающего динамику тепловых процессов в здании. При этом горизонт прогноза определяется тепловой инерцией изменения температуры в здании в результате возмущающих факторов. В итоге, схема управления процессом принимает вид, представленный на рис. 2.

На рисунке: Q – тепловая мощность, измеряемая теплосчетчиком, $T_н$ – температура наружного воздуха, измеряемая датчиком АИТП, T_1 – температура прямой воды, T_1^* – уставка температуры прямой воды, ΔT_1 – ошиб-

ка рассогласования температуры прямой воды, $T_{\text{п}}$ – температура воздуха в помещении, $\tilde{T}_{\text{п}}$ – прогнозное значение температуры воздуха в помещении, T_1^* – уставка температуры воздуха в помещении, $\Delta T_{\text{п}}$ – ошибка рассогласования температуры воздуха в помещении, T_{z} – обобщенное температурное воздействие, $u = u_1 + u_{\text{п}}$ – сигнал управления, Б.Р. – базовый регулятор, К.Р. – корректирующий регулятор, Т.Г. – температурный график отопления, реализующий зависимость $T_1(T_{\text{н}})$, М – блок «модель», реализующий модель объекта управления и алгоритм идентификации тепловых параметров здания в реальном времени, О.У. – объект управления.

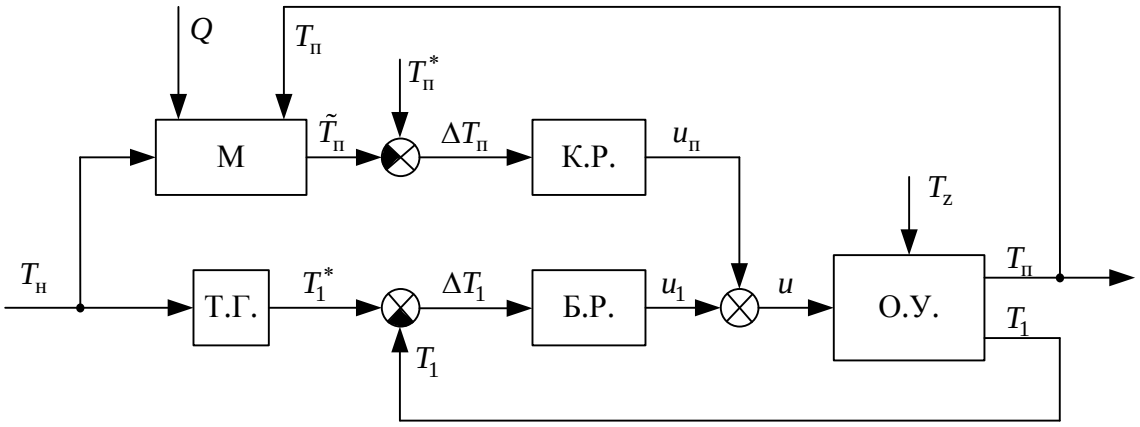


Рис. 2. Структурная схема системы управления отоплением
с идентификацией тепловых параметров здания в реальном времени

Предложенная схема имеет 2 контура управления: базовый контур осуществляет регулирование подачи тепла в зависимости от температурного графика (базовый регулятор), корректирующий контур осуществляет коррекцию подачи тепла в здание в зависимости от прогнозного значения температуры воздуха в помещении, учитывающего действие возмущающих факторов, рассчитанное по модели в реальном времени.

Положительным свойством предложенной структуры является возможность построения системы управления с учетом действия возмущающих факторов без необходимости непосредственного измерения, что делает возможным ее широкое применение на практике. Дальнейшее развитие системы возможно за счет внедрения пофасадного и индивидуального регулирования: так, внедрение пофасадного регулирования в предложенной системе позволяет компенсировать суточные колебания температуры, вызванные изменением положения Солнца за окном.

Моделирование на реальных данных

Описанный в источнике [5] метод был проверен на модели с использованием реальных данных, собранных в корпусе 3БВ ЮУрГУ в ходе отопительного сезона 2013/2014. В качестве входных данных модели использовались показания теплосчетчика $Q_0(t)$ с поправкой на расход тепла на

подготовку ГВС, а также регистрируемая контроллером АИТП температура наружного воздуха $T_н(t)$ (рис. 3). Для получения значений третьего входного параметра – температуры воздуха в помещении $T_п(t)$ – в различных помещениях здания были установлены электронные самописцы *Dallas DS1921*. На основе данных с самописцев вычислена средняя температура воздуха по зданию (рис. 4, серая тонкая линия), из которой посредством цифровой фильтрации выделяется базовый тренд (рис. 4, черная толстая линия), отражающий только влияние $Q_0(t)$ и $T_н(t)$. Выбранный метод фильтрации – экспоненциальная фильтрация в гармоническом базисе, однако допустимо использовать иные методы фильтрации с малыми значениями сдвига выходного сигнала.

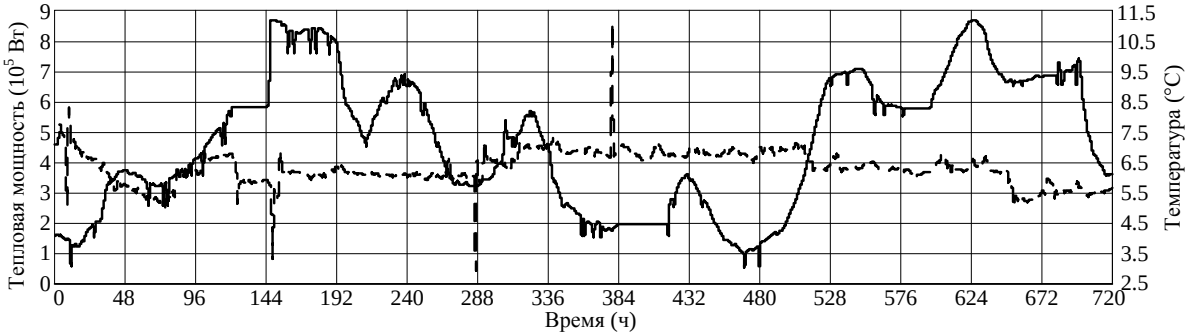


Рис. 3. Входные сигналы. $Q_0(t)$ (Вт) – пунктир;$T_{out}(t)$ (°C) – сплошная линия

Сигналы q_0 и $T_z(t)$ вычисляются в соответствии с методом, представленным в источнике [5]. Расчетное значение и прогнозная оценка удельных теплопотерь приведены на рис. 5. Как видно из графика, флуктуации прогнозной оценки весьма велики и в разные моменты времени существенно отличаются от расчетного значения. Флуктуации обусловлены влиянием различных внешних факторов (рис. 1), их можно снизить путем дополнительной фильтрации входных сигналов $Q_0(t)$ и $T_н(t)$. Это также позволяет уменьшить величину обобщенного температурного возмущения $T_z(t)$ (рис. 6).

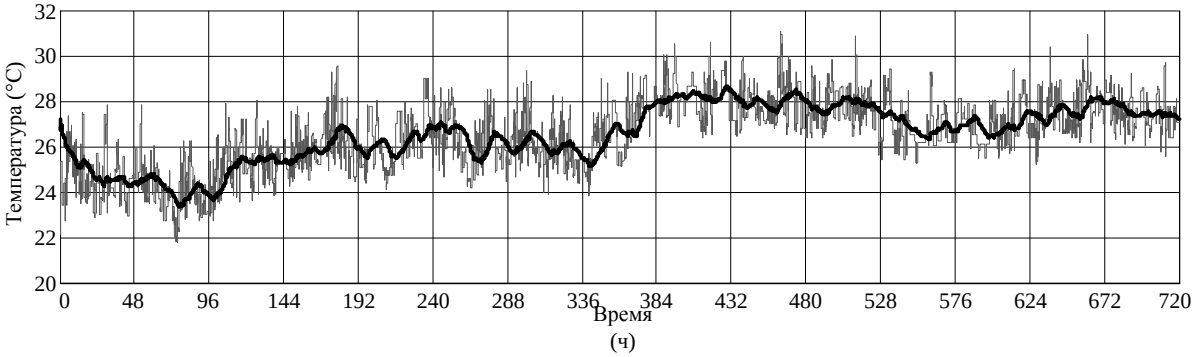


Рис. 4. Среднее значение $T_н(t)$. Тонкая серая линия – до фильтрации; жирная черная линия – после фильтрации

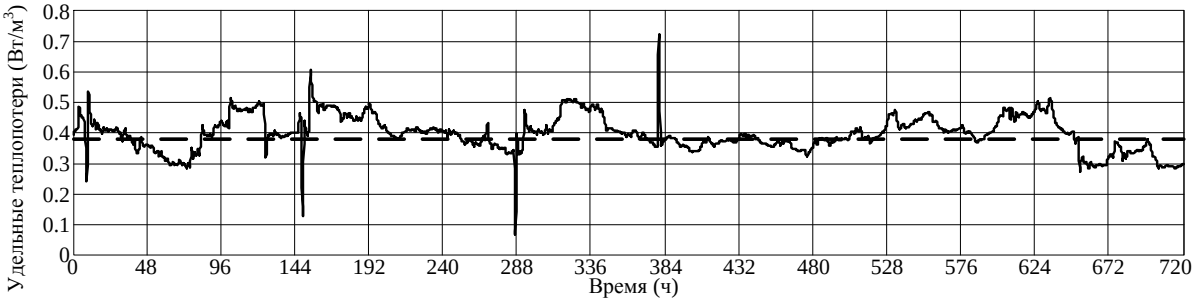


Рис. 5. Удельные теплопотери. Расчетное значение (среднее) – пунктир; прогнозная оценка – сплошная линия

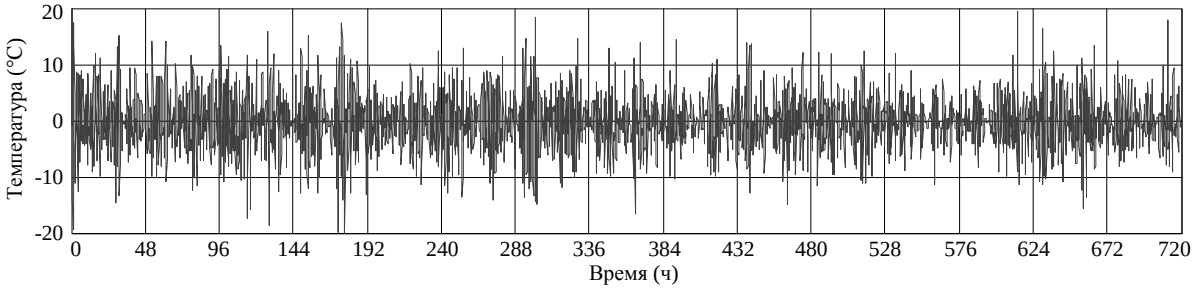


Рис. 6. Обобщенное температурное возмущение

На рис. 7 изображена ошибка идентификации $T_{\text{п}}(t)$. Как видно из графика, ошибка идентификации не превышает ±0,5°C, что является приемлемым значением и согласуется с теоретическими расчетами [5].

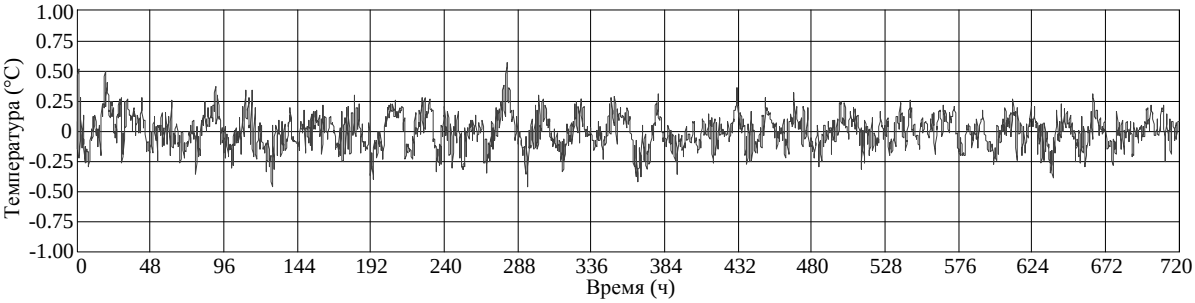


Рис. 7. Ошибка идентификации для $T_{\text{н}}(t)$

Выводы и дальнейшие исследования

На текущий момент выполнена программно-аппаратная реализация (средствами контроллера) базового контура регулирования. Работа блока «модель» корректирующего контура проверена на реальных данных, полученных с объекта.

В ходе проведенных экспериментов на реальных измеренных данных в целом установлена работоспособность предложенного ранее в [5] метода идентификации и возможность его практического применения.

Предложенную систему также возможно использовать для целей ана-

лиза: оценки энергоэффективности (как здания в целом, так и отдельных помещений), выявления перетопов и недотопов, автоматической балансировки стояков, выявления недобросовестных жильцов и т.д.

Выбранное здание – учебно-лабораторный корпус университета – является типичным представителем многоэтажных зданий [4], таким образом, полученные результаты могут быть распространены на большинство жилых и офисных многоэтажных зданий.

Следующий этап – программно-аппаратная реализация корректирующего контура (блоки «модель», «корректирующий регулятор») для работы на объекте в реальном времени. Цель – энергосбережение при условии обеспечения стабильной комфортной температуры воздуха в здании с учетом влияния на систему постоянных и переменных факторов (возмущений).

Дальнейшие этапы исследования также предполагают размещение дополнительных датчиков и построение распределенной сети интеллектуальных устройств на базе беспроводной сенсорной сети стандарта *WirelessHART*.

Библиографический список

1. Шнайдер, Д.А. Подход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий / Д.А. Шнайдер, В.В. Абдуллин, А.А. Басалаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 13. – № 2(219). – С. 70–73.

2. Абдуллин, В.В. Применение сетей стандарта WirelessHART в системах автоматизированного энергоменеджмента зданий / В.В. Абдуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 13. – № 23(282). – С. 210–212.

3. Абдуллин, В.В. Экспериментальное исследование сетей стандарта WirelessHART в системах автоматизированного энергоменеджмента / В.В. Абдуллин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 13. – № 35(294). – С. 110–114.

4. Shnayder, D.A. A WSN-based system for heat allocating in multiflat buildings / D.A. Shnayder, V.V. Abdullin // 2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP) Proceedings. – July 2–4, 2013. Rome, Italy. – pp. 181–185.

5. Abdullin, V.V. Method of Building Thermal Performance Identification Based on Exponential Filtration / V.V. Abdullin, D.A. Shnayder, L.S. Kazarinov // Proceedings World Congress on Engineering 2013. Volume III. – July 3–5, 2013. London, U.K. – pp. 2226–2230.

К содержанию

УДК 697.3 + 681.515

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, РАСХОДУЕМОЙ НА ОТОПЛЕНИЕ И ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ

А.А. Басалаев

В статье рассматривается комбинированный подход к прогнозированию потребления тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения в многоквартирных жилых домах. Предложенный подход позволяет решать задачу нормирования для оперативного контроля потребления тепловой энергии на основании показаний общедомовых приборов учёта и управляющих контроллеров.

Ключевые слова: теплоснабжение, водоснабжение, прогнозирование, метод опорных векторов.

Введение

Развитие и активное внедрение систем диспетчерского контроля и управления в сфере жилищно-коммунального хозяйства требует развития методов анализа состояния систем теплоснабжения [0, 2]. При этом одним из важнейших направлений анализа является нормирование значений параметров сложных систем, поскольку, чтобы определить, вышло ли значение того или иного параметра за допустимые пределы, необходимо сначала рассчитать эти пределы.

Для различных параметров пределы изменения могут нелинейно зависеть от режимов работы и многочисленных факторов, некоторые из которых или не измеряются, или не могут быть измерены. Поэтому для расчёта пределов параметров в сложных системах необходимо применять непараметрические методы прогнозирования.

Определение пределов изменения технологических параметров является задачей нормирования потребления различных энергоресурсов. При этом для оперативного анализа в системах диспетчерского контроля и управления инструментом расчёта норм потребления должны являться непараметрические методы прогнозирования, поскольку характеристики потребления различных энергоресурсов сильно различаются как по законам регулирования расхода, так и по влияющим на расход факторам, которые изменяются во времени.

В нормативной документации нормы потребления энергоресурсов представлены в расчёте на одни сутки [3], чего недостаточно для нужд оперативного анализа. Однако с уменьшением периода нормирования потребления увеличивается количество влияющих факторов, что усложняет процедуры расчёта и может увеличить погрешность прогнозирования.

Чтобы оценить возможность почасового нормирования потребления энергоресурсов, рассмотрим пример прогнозирования потребления тепловой энергии, расходуемой на отопление и горячее водоснабжение (ГВС) в жилом многоквартирном здании.

Комбинированный подход к прогнозированию

В качестве исходных данных для прогнозирования используется выборка архивов среднечасовых значений температуры наружного воздуха (от -20 °С до 0 °С) и часового потребления тепловой энергии на отопление и ГВС суммарно одного из многоквартирных домов города Челябинска в период с 15 ноября 2013 года по 1 февраля 2014 года. Температуры наружного воздуха в течение периода выборки считывались с электрон-ного контроллера с погодной компенсацией температуры теплоносителя ECL-310. Архив суммарного потребления тепловой энергии считывались с теплосчётчика Теплокон-01. Накопление данных производилось програм-мно-техническим комплексом «ПолиТЭР».

Модель системы была построена с использованием ПО RapidMiner 5. В качестве метода прогнозирования был выбран регрессионный анализ с использованием метода опорных векторов с ядром в виде радиальной базисной функции [4, 5].

Для выделения из суммарных показаний потребления тепловой энергии на ГВС разобьём процесс прогнозирования на следующие этапы:

1. Построение прогноза потребления тепловой энергии на отопление по выборке суммарного потребления с минимальным потреблением ГВС.

2. Построение прогноза потребления тепловой энергии на ГВС по разности выборок факта суммарного потребления и прогноза потребления тепловой энергии на отопления.

3. Построение прогноза потребления тепловой энергии по сумме прогнозов потребления тепловой энергии на отопление и ГВС.

Построение прогноза потребления тепловой энергии на отопление

Для построения прогноза потребления тепловой энергии на отопление из исходного массива данных необходимо выбрать значения с минимальным потреблением тепловой энергии на ГВС. Для этого построим распределение потребления суммарной тепловой энергии по часам суток за весь период выборки.

Далее разобьём выборку температур наружного воздуха на несколько диапазонов. Для данной выборки оптимальным оказалось разбиение на 5 диапазонов с шириной диапазона 4 °С. В соответствии с разбиением выборки температур наружного воздуха разобьём выборку потребления суммарной тепловой энергии и рассчитаем средние значения потреблений тепловой энергии для полученных диапазонов для каждого часа суток. Результат представлен на рис. 1.

Согласно полученному результату для каждого из диапазонов температур наружного воздуха и соответствующих им диапазонов потребляемой тепловой энергии суммарное потребление тепловой энергии минимально в 5 часов утра, т.е. в 5 часов утра составляющая ГВС в суммарном потреблении тепловой энергии минимальна.

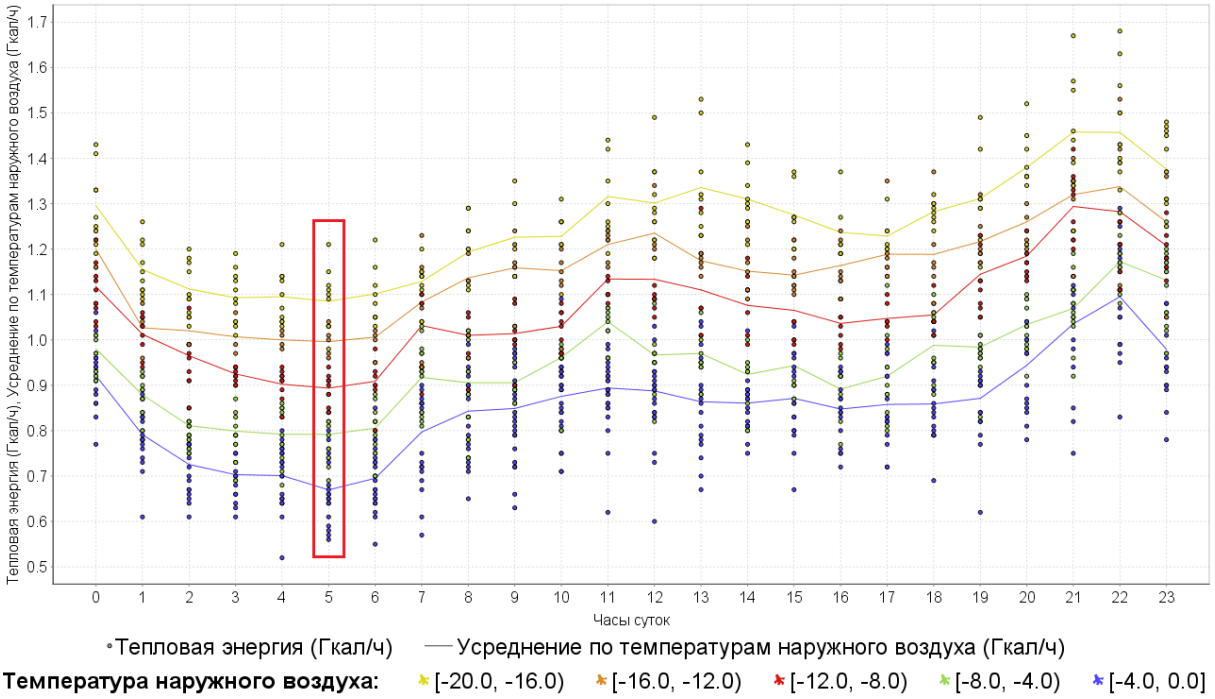


Рис. 1. Распределение суммарного потребления тепловой энергии на отопление и ГВС по часам суток

Далее осуществим выборку показаний суммарного потребления тепловой энергии и температур наружного воздуха на 5 часов утра и используем полученную выборку в качестве обучающего множества для построения эмпирической зависимости потребления тепловой энергии на отопление от температуры наружного воздуха.

Результат прогноза для используемой выборки представлен на рис. 2. Абсолютная погрешность составила 0,025±0,029 Гкал/ч. Относительная погрешность – 3,17±3,94 %.

Построение прогноза потребления тепловой энергии на ГВС

Для построения прогноза потребления тепловой энергии на ГВС необходимо:

1. На основании эмпирической зависимости, построенной на предыдущем шаге, рассчитать потребление тепловой энергии на отопление для всех значений исходной выборки.

2. Из соответствующих значений суммарного потребления тепловой энергии исходной выборки вычесть значения потребления тепловой энергии на отопление.

3. Использовать полученную разностную выборку в качестве обучающего множества для построения эмпирической зависимости потребления тепловой энергии на ГВС от времени суток и дня недели.

Результат прогноза для используемой выборки представлен на рис. 3. В качестве примера представлен прогноз для понедельника, четверга и воскресенья. Абсолютная погрешность составила 0,055±0,046 Гкал/ч. Относительная погрешность – 42,60±41,35 %.

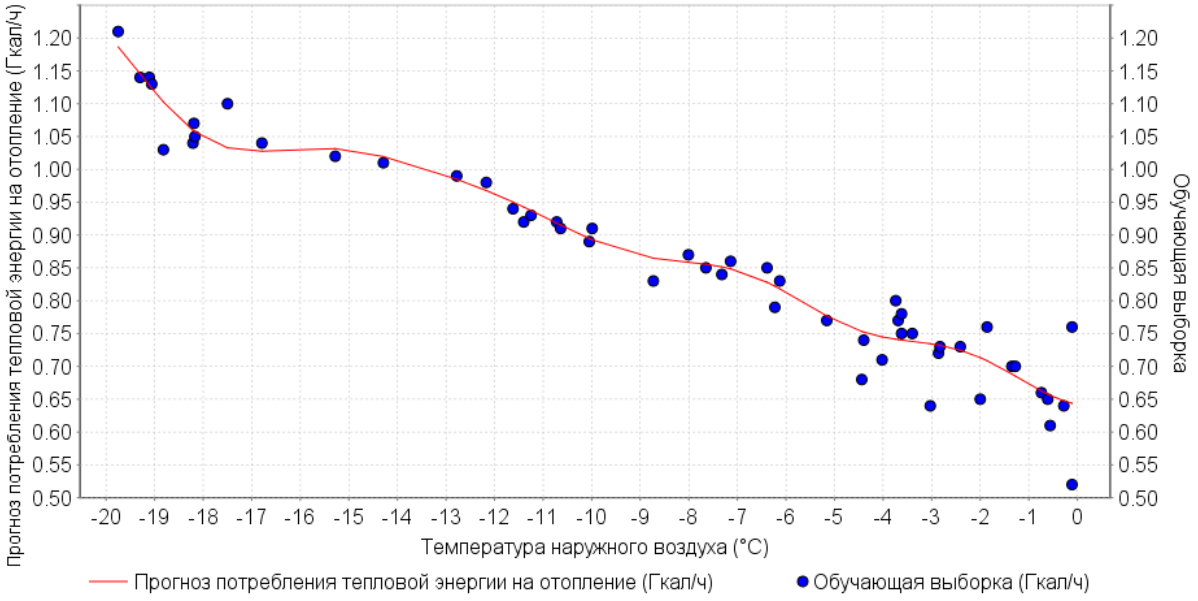


Рис. 2. Эмпирическая зависимость потребления тепловой энергии на отопление от температуры наружного воздуха

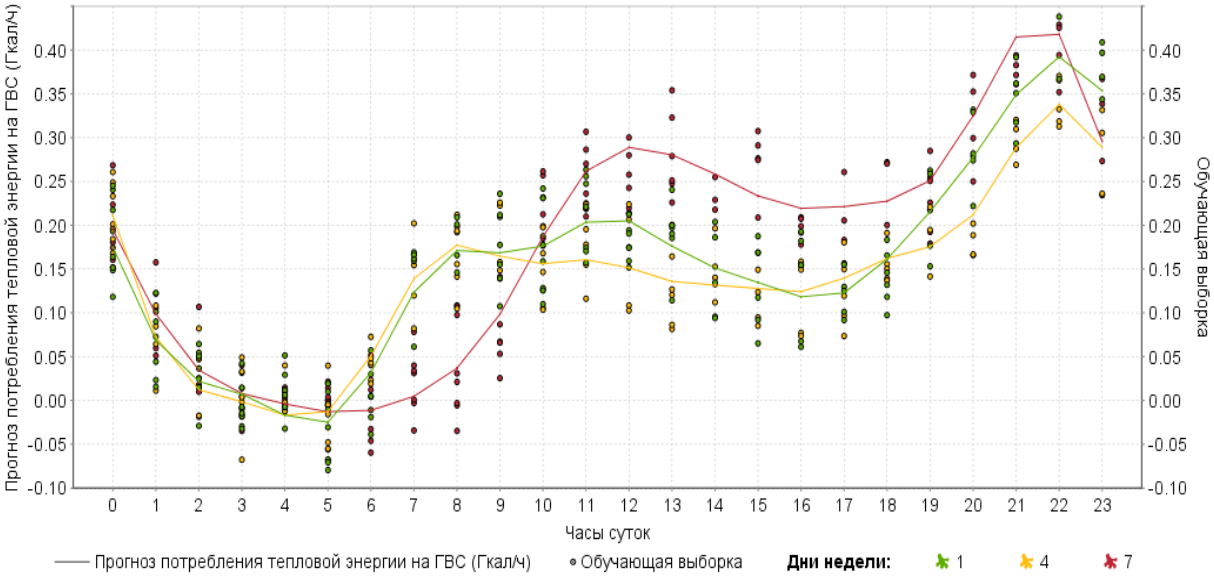


Рис. 3. Эмпирическая зависимость потребления тепловой энергии на ГВС от времени суток и дня недели для среды и воскресенья

Построение прогноза суммарного потребления тепловой энергии

Для построения прогноза суммарного потребления тепловой энергии необходимо сложить соответствующие значения прогнозов потребления тепловой энергии на отопление и ГВС.

Результат прогноза для используемой выборки представлен на рис. 4. В качестве примера представлены дни с 16 по 22 декабря 2013 года. Абсолютная погрешность составила 0,055±0,046 Гкал/ч. Относительная погрешность – 5,37±4,37 %.

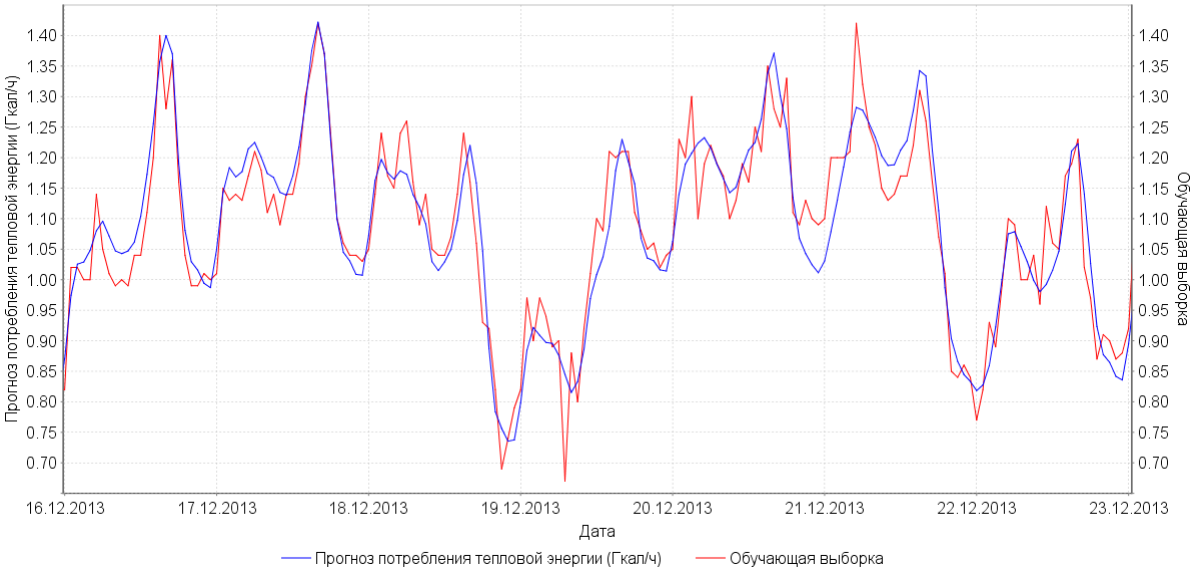


Рис. 4. Эмпирическая зависимость суммарного потребления тепловой энергии на отопление и ГВС

Заключение

Предложенный подход позволяет решать задачу нормирования для оперативного контроля потребления тепловой энергии, расходуемой на отопления и ГВС в многоквартирных жилых домах. Преимуществом представленного подхода является то, что исходными данными в прогнозировании потребления тепловой энергии для здания являются показания тепловычислителей и контроллеров, установленных в этом здании.

Подход также позволяет, используя данные по суммарному потреблению тепловой энергии, разделить эти показания на тепловую энергию для нужд отопления и для нужд ГВС, а также совмещать различные методы прогнозирования этих показаний.

Библиографический список

1. Шнайдер, Д.А. Подход к оперативному анализу эффективности теплоснабжения зданий / Д.А. Шнайдер, В.В. Абдуллин, А.А. Басалаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 13. – № 2(219). – С. 70–73.

2. Басалаев, А.А. Оперативный анализ энергетической эффективности теплоснабжения зданий в автоматизированных системах диспетчеризации и управления / А.А. Басалаев, Д.А. Шнайдер, А.Р. Хасанов // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – Т. 11. – № 1. – С. 16–23.

3. Об утверждении требований энергетической эффективности зданий, строений, сооружений: проект приказа Федерального агентства по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству от 11 сентября 2013 г. – URL: http://static.consultant.ru/obj/file/doc/gosstroj_110913.rtf.

4. Drucker, H. Support Vector Regression Machines / H. Drucker, C. Burges, L. Kaufman, A. Smola, V. Vapnik // Advances in Neural Information Processing Systems. – 1996. – № 9. – Pp. 155–161.

5. Scholkopf, B. Comparing Support Vector Machines with Gaussian Kernels to Radial Basis Function Classifiers / B. Scholkopf, K. Sung, C. Burges, F. Girosi, P. Niyogi, T. Poggio, V. Vapnik // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1997. – № 45. – Pp. 2758–2765.

К содержанию

УДК 621.1:681.521.6 + 681.521.6

ИНТЕГРИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Т.А. Барбасова

В работе рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности сложных теплоэнергетических комплексов в металлургическом производстве на основе разработки и внедрения методологии интегрированного управления в рамках многоуровневых АСУ теплоэнергетическими комплексами, позволяющей в оперативном режиме оптимальным образом согласовывать динамику подсистем и принятие управленческих решений.

Ключевые слова: интегрированное управление, энергетическая эффективность, многоуровневое управление.

Технологические теплоэнергетические комплексы металлургических предприятий представляет собой сложные энергетические системы, включающие электрические станции, технологические паровые сети, котельные и технологических потребителей. Особенность данного комплекса является то, что функционирование происходит при мощных возмущающих воздействиях. Источниками мощных возмущений являются:

– вторичные источники топливных ресурсов, таких как доменный газ, параметры которых могут меняться в больших пределах от нагрузки доменного производства;

– наличие вторичных тепловых ресурсов, работающих в переменном режиме;

– технологические потребители металлургического производства представляют собой мощную нагрузку, работающую в резко переменных режимах.

Наличие многочисленных источников мощных возмущений приводит к динамической несогласованности работы подсистем технологического комплекса, что приводит к нерациональному расходу энергетических ресурсов, например, выброс избыточного количества доменного газа, технологического пара и др. на свечу в атмосферу. Для пояснения ежемесячное потребление топливных энергетических ресурсов на ОАО «ММК» составляет около 381 248 406 тыс. $м^3$, потребление природного газа – 380 000 000 тыс. $м^3$, потребление доменного газа – 1 068 243 тыс. $м^3$, потребление коксового газа – 180 163 тыс. $м^3$[1-3].

Достижение динамической согласованности подсистем технологического комплекса препятствует также организационная структура подразделений, ведущих эксплуатацию отдельных подсистем: электрических станций, паровых сетей, отдельных потребителей.

Вследствие большого масштаба теплоэнергетического комплекса металлургического производства представляется проблематичным обычный подход к управлению подобными системами без учета организационной структуры управления.

При этом возникает масштабная проблема системного согласования локальных управляющих подсистем подразделений с целью достижения оптимального функционирования всего теплоэнергетического комплекса как единой динамической системы.

Проблемам управления в сложных многоуровневых иерархических системах в настоящее время посвящена литература, начиная с пионерской работы М. Месаровича, Д. Мако, И. Такахара до работ Прилуцкого М.Х., Новикова Д.А., Силича М.П., Карканици А.В., Морозова С.А., Манжула В.Г., Федосеева С.В., Дуэля М.А., Приходько А.В.

Данные работы заложили основы построения многоуровневой иерархической структуры управления сложными динамическими системами с учетом организационной структуры управления. Однако практическое использование общих принципов, развитых в указанных работах, применительно к конкретной предметной области промышленного производства требует значительных дополнительных исследований, применительно к специфике рассматриваемой отрасли.

В течение последнего десятилетия отечественными и зарубежными авторами опубликовано значительное количество работ, рассматривающих вопросы применения различных методов повышения эффективности энергопотребления на промышленных предприятиях. Существенный вклад

в развитии работ по данному направлению внесли: Баскаков А.П., Башмаков Н.А., Султангузин И.А., Будковский А.Г., Данилов Н.И., Дегтярёв В.В., Закиров Д.Г., Заславец Б.И., Казаринов Л.С., Кудрин Б.И., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Лоскутов А.Б., Никифоров Г.В., Олейников В.К., Плетнев Г.П., Праховник А.В., Розен В.П., Сазанов Б.В., Ситас В.И., Фокин В.М., Чоджой М.Х., Щелоков Я.М. и др.

Однако рассмотрение управления крупномасштабными комплексами с учетом организационной структуры управления в существующей литературе рассмотрено не достаточно.

Без проведения подобных работ является проблематичным достижение системного эффекта оптимизации управления эффективности сложных теплоэнергетических комплексов в целом.

Целью работы является повышение энергетической эффективности сложных теплоэнергетических комплексов в металлургическом производстве на основе разработки и внедрения методологии интегрированного управления в рамках многоуровневых АСУ теплоэнергетическими комплексами (АСУ ТЭК), позволяющей в оперативном режиме оптимальным образом согласовывать динамику подсистем и принятие управленческих решений.

Энергетические комплексы металлургических предприятий включают подсистемы выработки, распределения, аккумулирования и потребления энергетических ресурсов (ЭР) [4]. Режимы работы данных подсистем определяются режимами работы технологического оборудования основного металлургического производства и характеризуются существенными колебаниями в выработке и потреблении ЭР. Вместе с тем объемы потребления ЭР и утилизации вторичных энергоресурсов (ВЭР) напрямую определяют энергоемкость металлургического производства, а технические параметры ЭР – качество выпускаемой продукции. Отсюда важной практической задачей является организация эффективного управления энергетическими комплексами металлургических предприятий, учитывающего динамику процессов выработки, распределения, аккумулирования и потребления ЭР, а также влияние отклонений параметров ЭР на качество производимой продукции.

Ведущую роль в повышении эффективности энергетических комплексов металлургического производства, в частности распределенных сетей паро- и водоснабжения, играют автоматизированные системы управления (АСУ). Базовым требованием к построению подобных систем является формирование текущей информации о технико-экономических параметрах технологических процессов. Перспективным подходом, позволяющим значительно повысить эффективность автоматизированного управления технологическими процессами по сравнению с существующим уровнем, является введение упреждающего управления по критериям энергетической эффективности и реализация на его основе соответствующих систем автоматизированного управления [5–14].

На рис.1 и 2 приведена структура потребления доменного газа и потребления пара энергетического комплекса металлургического предприятия, состоящая из типовой структуры котельных, теплоэнергетических станций, основных технологических потребителей пара и источника доменного газа – доменного цеха.

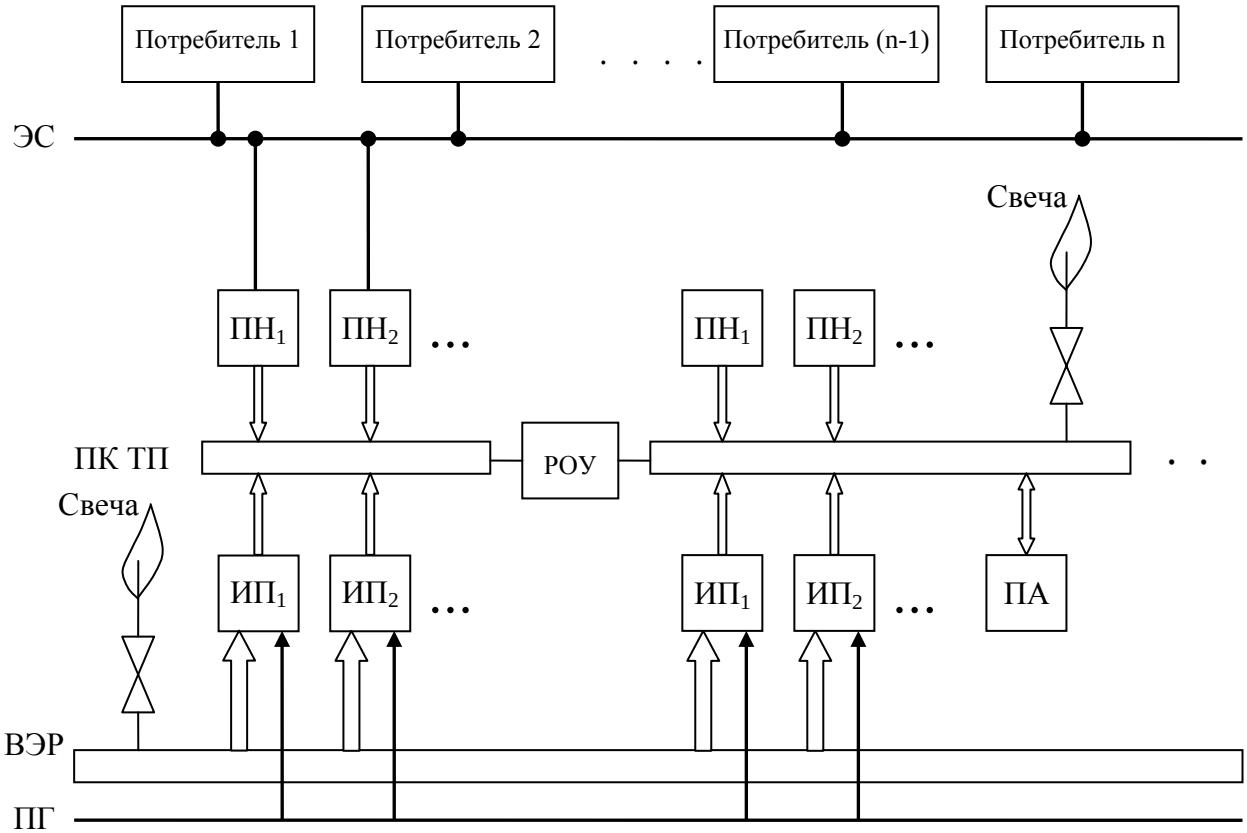


Рис. 1. Обобщенная структура энергетического комплекса промышленного предприятия

Здесь *ПН* – паровая нагрузка (потребители пара), *ИП* – источники пара, *ПА* – паровой аккумулятор, *ПК ТП* - паровой коллектор, РОУ – редукционно-охладительное устройство. На источники пара подаются природный *ПГ* и вторичные энергетические ресурсы (ВЭР) – доменный, коксовый газы. ЭС – электрическая сеть. Кроме того на схеме на паровом коллекторе представлена «свеча», через которую сбрасывается избыток выработанного пара. В «свече» на магистрали вторичных энергетических ресурсов происходит сжигание доменного газа.

Типовая структура теплоэнергетической станции состоит из блока параллельно работающих энергетических котлов, вырабатывающих пар на общий паровой коллектор, к которому подключены потребители пара - турбогенераторы.

Типовая структура теплоэнергетической станции состоит из блока параллельно работающих энергетических котлов, вырабатывающих пар на общий паровой коллектор, к которому подключены потребители пара -

турбогенераторы. Типовая структура котельной состоит из блока параллельно работающих энергетических котлов, вырабатывающих пар на общий паровой коллектор для технологических потребителей.

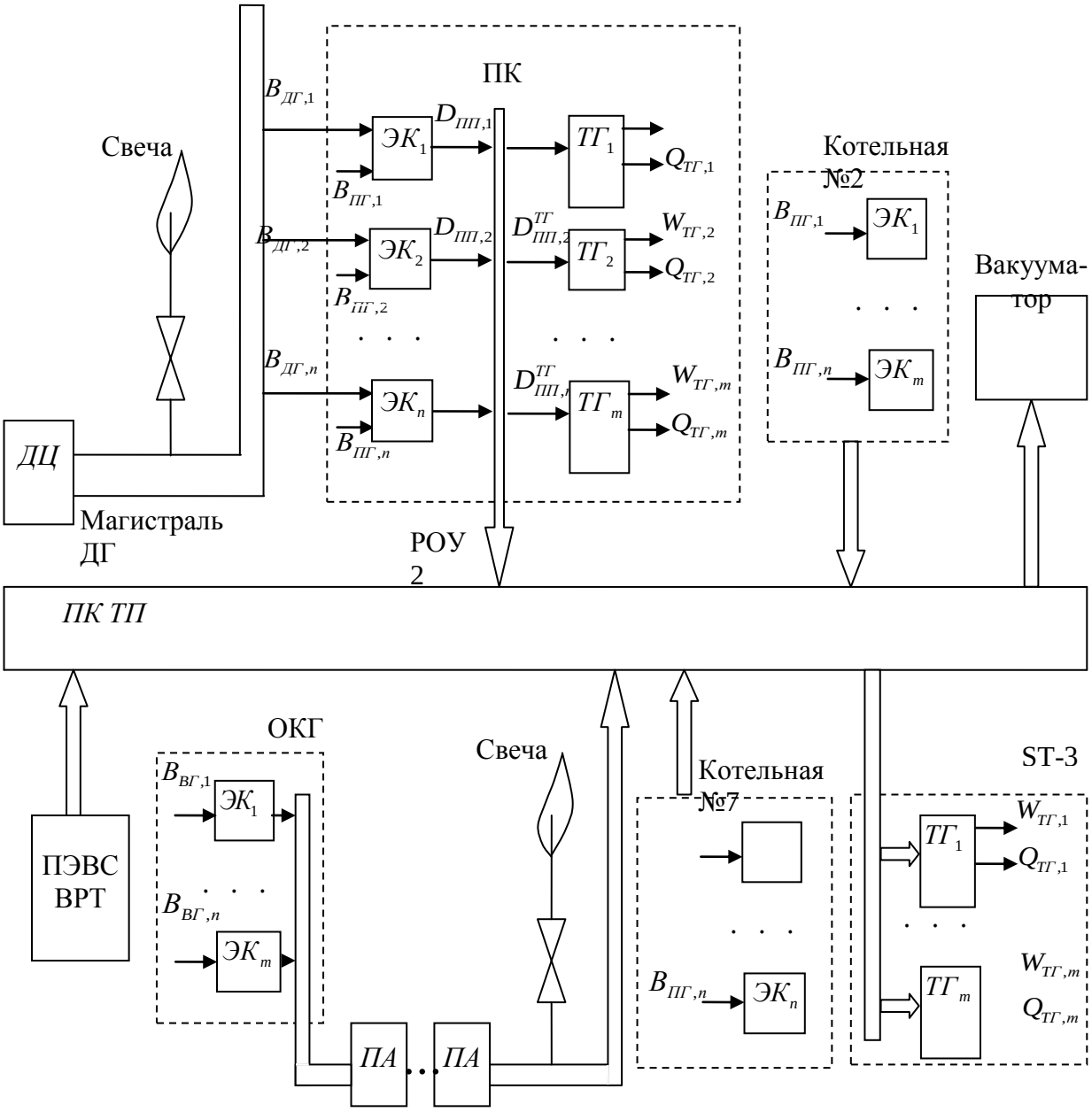


Рис. 2. Организационная структура энергетического комплекса промышленного предприятия

Здесь $ЭК_m$ – котел теплоэнергетического комплекса, $ТГ_m$ – турбогенератор, $W_{ТГ,m}$ – выработка электрической энергии, $Q_{ТГ,m}$ – тепловая энергия, $B_{ПГ,n}$ – объем потребления природного газа, $B_{ВГ,n}$ – объем потребления вторичных топливных газов, $B_{ДГ,n}$ – объем потребления доменного газа, $D_{ПП,n}$ – выработка пара котлоагрегатами.

В реальных условиях система пароснабжения промышленных предприятий характеризуется большими колебаниями производительности источников и большими колебаниями потребления пара.

Тем самым работа потребителей пара, создает существенное ограничение на пароснабжение потребителей металлургического предприятия, так как резко переменные режимы пароснабжения приводят как к недогрузке энергетического оборудования и недовыработке электрической энергии, так и недорасходу пара. Потери обусловлены выбросами пара на «свечу».

Поэтому необходимо разрабатывать и внедрять автоматизированную систему интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами промышленной площадки промышленного предприятия предназначенную для планирования и управления ресурсами в энергетическом комплексе промышленной площадки и потребителей тепловой и электрической энергии. Указанная автоматизированную система интегрированного планирования и управления энергетическими ресурсами промышленной площадки промышленного предприятия для достижения системного эффекта энергосбережения обеспечивает энергоэффективное интегрированное управление генерирующими и потребляющими мощностями энергетического комплекса металлургического предприятия.

Библиографический список

1. Никифоров, Г.В. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 480 с.

2. Копцев, Л.А. Технико-экономические проблемы управления энергосбережением: энергоемкость продукции и экономическая эффективность / Л.А. Копцев // Электрика. – 2005. – № 1. – С. 18–28.

3. Копцев, Л.А. Возможности энергосбережения в ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»: энергоемкость продукции и экономическая эффективность / Л.А. Копцев, В.В. Зуевский, С.В. Седельников // Промышленная энергетика. – 2006. – № 11. – С. 16–22.

4. Автоматизированные системы управления в энергосбережении (опыт разработки): монография / Л.С. Казаринов, Д.А. Шнайдер, О.В. Колесникова, Т.А. Барбасова и др.; под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 228 с.

5. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 5–13.

6. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирующего управления энергетической эффективностью промышленного предприятия / Л.С. Казаринов,

Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 2. – С. 12–24.

7. Казаринов, Л.С. Система диспетчеризации и оперативного управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 2. – С. 53–63.

8. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – № 1 (том 13). – С. 90–94.

9. Казаринов, Л.С. Регуляризация некорректно поставленных задач упреждающего управления в энергосберегающих технологиях / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2013. – № 1, Т. 11. – С. 5–16.

10. Барбасова, Т.А. Автоматизированная система энергетического менеджмента промышленного предприятия / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2013. – № 2 (30). – С. 23–28

11. Казаринов, Л.С. Упреждающее управление энергетической эффективностью предприятий / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 35 (294). – С. 85–98.

12. Барбасова, Т.А. Введение системы энергетического менеджмента предприятий для повышения энергетической эффективности челябинской области / Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Экономика промышленности. – 2012. – № 3. – С. 42–46.

13. Казаринов, Л.С. Автоматизированная информационная система поддержки принятия решений по контролю и планированию потребления энергетических ресурсов / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 23. – С. 118–122.

14. Казаринов, Л.С. Система управления энергетическими потоками в теплоэнергетическом комплексе металлургического предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 23. – С. 21–25.

К содержанию

УДК 681.513.6 + 621.31:681.513.6

АДАПТИВНЫЕ СИСТЕМЫ МНОГОЗОНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Е.В. Вставская

В работе рассматривается метод построения адаптивных систем многозонального управления энерготехнологическими объектами на базе оценки зональных характеристик в порядковых шкалах. Предложенный метод позволяет повысить энергетическую эффективность систем управления, что является перспективным направлением в области энергосбережения в настоящее время.

Ключевые слова: адаптивное многозональное управление, порядковые шкалы, дискриминантная функция, энерготехнологический объект, оценка качества.

Перспективным направлением развития энерготехнологических комплексов в настоящее время является их построение в виде адаптивных реконфигурируемых структур, позволяющих решать задачи энергосбережения и надежности при нестационарных режимах работы. Данные направления определены как перспективные в Федеральном законе от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные Законодательные акты Российской Федерации», п.24 «Перечня научных исследований и опытно-конструкторских разработок», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.12.2008 № 988 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 6 февраля 2012 г. № 96).

Указанное направление развития представляет собой серьезную техническую проблему не только с энергетической точки зрения, но и с точки зрения построения адаптивных систем управления указанными энерготехнологическими объектами [1].

Распределенный энерготехнологический объект представляет собой многосвязный объект с распределенными параметрами [2]. Особенностью управления таким объектом является то, что каждая выходная величина характеризуется не конкретным значением, а некоторой зоной распределения значений, представленной в виде зональной характеристики. Управление распределенным энерготехнологическим объектом осуществляется с помощью изменения вектора входных управляющих воздействий. Причем изменение даже одного управляющего воздействия из распределенного набора приводит к изменению всех выходных зональных характеристик. Поэтому необходимо говорить о многозональном управлении, формирующем вектор входных управляющих воздействий на основании анализа выходных зональных характеристик и внешних условий.

В общем случае распределенный энерготехнологический объект можно представить структурной схемой, представленной на рис. 1.

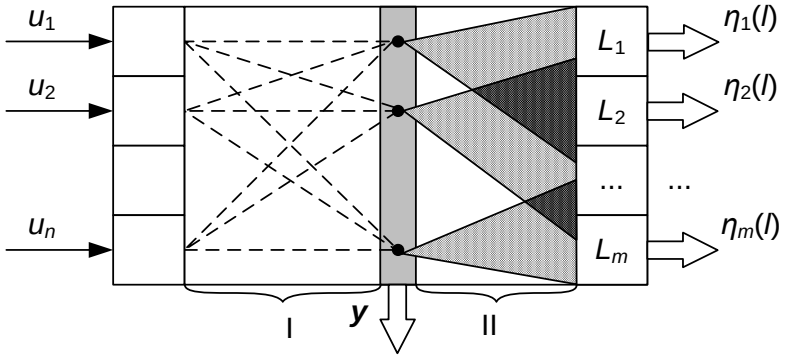


Рис. 1. Структура распределенного энерготехнологического объекта

$\mathbf{u} = (u_1;\ u_2;\ ...;\ u_n)^T$ – вектор силовых управляющих воздействий; y – вектор измеряемых режимных параметров; l – пространственная характеристика зон; L_i – метрическая область i-ой зоны; $\boldsymbol{\eta}(l) = (\eta_1(l);\ \eta_2(l);\ ...;\ \eta_n(l))^T$ – вектор режимных параметров.

В общем случае распределенный энерготехнологический объект можно представить в виде двух областей. Область I определяет взаимосвязь между силовыми управляющими воздействиями и измеряемыми режимными параметрами. Данная область характеризуется связями с сосредоточенными параметрами. Область II характеризуется связями с распределенными параметрами. Она определяет воздействие режимных параметров на формирование распределенных зональных характеристик.

Система многозонального управления распределенным энерготехнологическим объектом содержит два контура регулирования (рис. 2).

Внутренний контур автоматического регулирования обеспечивает точное слежение режимных параметров объекта **y** за оптимальным значением $\mathbf{y}_0$. Внешний контур оперативного регулирования на основе оперативного принятия решений по оптимизации режимных параметров объекта задает оптимальные значения режимных параметров $\mathbf{y}_0$ на основе анализа показателей качества технологического процесса на объекте в порядковых шкалах.

Для оценки качества многозонального энерготехнологического объекта вводятся качественные показатели, принимающие значения на множестве порядковых оценок, например:

$$p_i \in H,\ H = \{\text{отлично; хорошо; допустимо; недопустимо}\},\ i \in I_Z, \quad (1)$$

где I_Z – индексное множество зон.

Метод принятия эффективных решений в порядковых шкалах основан на введении зональных дискриминантных функций качества в форме:

$$q_i(\mathbf{a}_i; \mathbf{y}) \geq 0;\qquad i \in I_Z, \quad (2)$$

где $\mathbf{a}_i$ – вектор структурных параметров дискриминантной функции; $\mathbf{y}$ – вектор режимных параметров объекта.

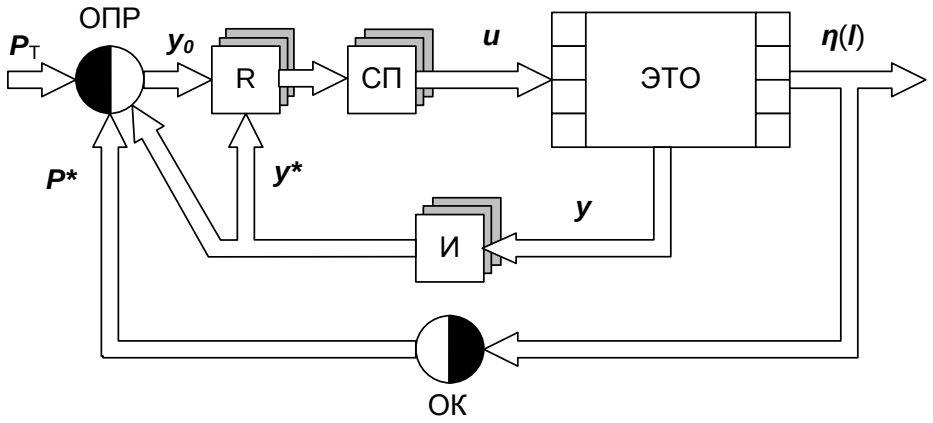


Рис. 2. Система многозонального управления распределенным энерготехнологическим объектом: ЭТО – энерготехнологический объект; СП – силовые преобразователи; И – измерители; R – локальные регуляторы; ОК – оперативный контроль; ОПР – оперативное принятие решений

Порядковые оценки связаны с дискриминантными функциями неравенствами. Например, для порядковых оценок (1) оценочные неравенства имеют вид:

$$\begin{aligned} q_i(\mathbf{a}_i;\mathbf{y}) \ge q_{отл} \quad &\Rightarrow \quad p_i =< отл >, \\ q_i(\mathbf{a}_i;\mathbf{y}) \ge q_{хор} \quad &\Rightarrow \quad p_i =< хор >, \\ q_i(\mathbf{a}_i;\mathbf{y}) \ge q_{доп} \quad &\Rightarrow \quad p_i =< доп >, \\ q_i(\mathbf{a}_i;\mathbf{y}) < q_{доп} \quad &\Rightarrow \quad p_i =< нд >. \end{aligned} \tag{3}$$

Дискриминантные функции определяются базовыми граничными значениями $q_{отл}$, $q_{хор}$, $q_{доп}$,. В общем случае порядковая градация качества режимных параметров распределенного энерготехнологического объекта может быть другой.

Задача идентификации дискриминантных функций формулируется на основе данных эксплуатации, представленных в виде протоколов

$$(\mathbf{y}_s, \{p_{is}\}), \quad s \in S, \tag{4}$$

где S – индексное множество протоколов с данными эксплуатации.

В соответствии с данными эксплуатации составляется система неравенств:

$$\begin{cases} q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) \ge q_{отл}, & s \in S_{отл} \\ q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) \ge q_{хор}, & s \in S_{хор} \\ q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) \ge q_{доп}, & s \in S_{доп} \\ q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) < q_{доп}, & s \in S_{нд}; \quad i \in I_Z. \end{cases} \tag{5}$$

Для решения системы неравенств (5) определяем квадратичную невязку решения:

$$Q_i = \sum_{s\in S_{отл}} \left(q_{отл} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \sum_{s\in S_{хор}} \left(q_{хор} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \\ + \sum_{s\in S_{доп}} \left(q_{доп} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \sum_{s\in S_{нд}} \left(q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) - q_{доп}\right)^{+2} \to \min \quad (6)$$

где индекс «+» означает, что рассматриваются только положительные компоненты, отрицательные компоненты обнуляются.

При совместном решении системы неравенств (5) по критерию (6) возникает вопрос о сходимости решения. Поскольку данные эксплуатации могут быть неполными, решение системы неравенств (5) может быть неоднозначным. В этом случае отсутствует сходимость рекуррентных алгоритмов минимизации невязки (6). С целью обеспечения сходимости рекуррентных алгоритмов минимизации невязки (6) вводится дополнительное условие:

$$\left\|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{iH}\right\|^2 \to \min, \quad (7)$$

где $\mathbf{a}_{iH}$ – номинальное значение вектора структурных параметров *i*-ой дискриминантной функции. Номинальное значение вектора структурных параметров $\mathbf{a}_{iH}$ определяется на основе специальных исследований номинальных режимов работы энерготехнологического объекта при наладке автоматизированной системы управления. Введение дополнительного условия (7) осуществляет регуляризацию постановки задачи минимизации квадратичной невязки (6) решения системы неравенств (5).

С учетом составляющей регуляризации (7) целевая функция при решении задачи идентификации будет иметь вид:

$$Q_i = \sum_{s\in S_{отл}} \left(q_{отл} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \sum_{s\in S_{хор}} \left(q_{хор} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \\ + \sum_{s\in S_{доп}} \left(q_{доп} - q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s)\right)^{+2} + \sum_{s\in S_{нд}} \left(q_i(\mathbf{a}_i;\ \mathbf{y}_s) - q_{доп}\right)^{+2} + \lambda\left\|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_{iH}\right\|^2 \to \min \quad (8)$$

Для минимизации целевой функции (8) можно использовать рекуррентное соотношение градиентного метода:

$$\mathbf{a}_{i,k} = \mathbf{a}_{i,k-1} + \lambda\left(\mathbf{a}_{i,k-1} - \mathbf{a}_{Hi}\right) + \gamma\left(\sum_{s\in S_{отл}} \left(q_{отл} - q_i(\mathbf{a}_{i;k-1};\mathbf{y}_s)\right)^{+}\nabla q_i\left(\mathbf{a}_{i,k-1};\mathbf{y}_s\right) + \right. \\ + \sum_{s\in S_{хор}} \left(q_{хор} - q_i(\mathbf{a}_{i;k-1};\mathbf{y}_s)\right)^{+}\nabla q_i\left(\mathbf{a}_{i,k-1};\mathbf{y}_s\right) + \sum_{s\in S_{доп}} \left(q_{доп} - q_i(\mathbf{a}_{i;k-1};\mathbf{y}_s)\right)^{+} \times \\ \left. \times\nabla q_i\left(\mathbf{a}_{i,k-1};\mathbf{y}_s\right) - \sum_{s\in S_{нд}} \left(q_i(\mathbf{a}_{i;k-1};\mathbf{y}_s) - q_{доп}\right)^{+}\nabla q_i\left(\mathbf{a}_{i,k-1};\mathbf{y}_s\right)\right), \quad (9)$$

где γ, λ – коэффициенты релаксации, $\gamma \ge 0$, $\lambda \ge 0$, $\gamma + \lambda = 1$.

Коэффициенты релаксации выбираются из условия сходимости рекуррентной процедуры (9). При указанных условиях рекуррентная процедура (9) сходится к искомому решению задачи идентификации.

Нахождение оптимальных значений режимных параметров нестационарного энерготехнологического объекта осуществляется на основе последовательного решения двух задач. На первом этапе решается задача оптимального построения области допустимых значений режимных параметров в порядковых шкалах. Данная задача сводится к нахождению максимально совместных подсистем взвешенных неравенств, определяемых дискриминантными функциями. На втором этапе в построенной области допустимых значений режимных параметров определяется оптимальное значение параметров по критерию минимума потребления энергии. Более подробно решение указанной задачи изложено в [2, 3].

В итоге будет получено значение вектора режимных параметров, которое обеспечивает для подмножества наиболее важных зон энерготехнологического объекта уставку с порядковой оценкой «отлично». Для менее важного подмножества зон обеспечивается порядковая оценка качества «хорошо», для наименее критичного подмножества зон – порядковая оценка качества «допустимо».

В целом решаемая задача формирует эффективную область допустимых значений режимных параметров энерготехнологического объекта.

Постановка задачи оптимизации режимных параметров многозонального энерготехнологического объекта основана на использовании критерия минимума энергетических затрат на управление. Данный критерий можно сформулировать, например, в следующем виде:

$$C_E = \|\mathbf{u}\|^2, \tag{10}$$

где $\mathbf{u}$ – вектор силовых управляющих воздействий.

Искомое решение – вектор оптимальных значений $\mathbf{y}_{opt}$ режимных параметров $\mathbf{y}$. Для решения данной задачи необходимо определить зависимость вектора силовых управляющих воздействий $\mathbf{u}$ от уставок $\mathbf{y}_0$ автоматической системы регулирования значений режимных параметров $\mathbf{y}$ (рис. 2). Данная зависимость является статической, поскольку динамика процесса регулирования определяется при проектировании указанной следящей системы. Дополнительные энергетические потери, возникающие вслід-ствие динамики процесса регулирования, минимизируются повышением точности автоматической системы регулирования, которая обеспечивается известными методами.

С учетом сказанного для решения поставленной задачи необходимо определить зависимость

$$\mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y}). \tag{11}$$

Зависимость (11) может быть получена экспериментально на основе обработки статистики наблюдений за поведением автоматической системы регулирования режимных параметров энерготехнологического объекта.

В результате постановка задачи оптимизации будет иметь следующий вид:

$$\min_{\mathbf{y}} C_E(\mathbf{u}), \quad \mathbf{u} = \mathbf{f}(\mathbf{y}) \tag{12}$$

$$\begin{cases} q_i(\mathbf{y}) \geq q_{отл}, & i \in I_Z^{отл} \\ q_i(\mathbf{y}) \geq q_{хор}, & i \in I_Z^{хор} \\ q_i(\mathbf{y}) \geq q_{доп}, & i \in I_Z^{доп}. \end{cases} \tag{13}$$

Здесь ограничения (13) представляют собой решение задачи формирования эффективной области допустимых значений режимных параметров.

Задача (12)–(13) является типовой задачей математического программирования и решается известными методами, изложенными, например, в [4].

Особенностью функциональных характеристик многозональных энерготехнологических объектов является наличие областей с сосредоточенными параметрами и областей с параметрами, распределенными по зонам. Вследствие сложности определения характеристик областей с параметрами, распределенными по зонам, оперативное управление подобными объектами представляет серьезную проблему. Одним из подходов к решению данной проблемы является применение методов управления, основанных на использовании порядковых оценок качества.

Библиографический список

1. Вставская, Е.В. Построение систем управления сложными комплексами наружного освещения / Е.В. Вставская, Т.А. Барбасова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2011. – Вып. 14. – № 23 (240). – С. 98–102.

2. Вставская, Е.В. Метод адаптивного многозонального управления энерготехнологическими объектами в порядковых шкалах / Е.В. Вставская, Л.С. Казаринов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13. – № 4. – С. 94–102.

3. Вставская, Е.В. Комитетный метод настройки технологических процессов в порядковых шкалах / Е.В. Вставская, Л.С. Казаринов // Приборостроение: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 117–120.

4. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление (когнитивный подход): научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

К содержанию

УДК 658.26:621.31 + 620.9.004.18

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

А.А. Захарова

В работе описана модель электропотребления, которая включает в себя характеристики периодических нагрузок, общих для любого типа перерабатывающей промышленности, вследствие чего может быть использована для всех отраслей промышленности, использующих временные тарифы. В соответствии с предлагаемой методикой построен почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия.

Ключевые слова: график электропотребления, энергетическая эффективность, управление электропотреблением.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ от 04.05.2012 № 442 определены шесть ценовых категорий для потребителей электроэнергии в зависимости от применяемого в расчетах тарифа. В целях стимулирования предприятий внедрять почасовой учет и почасовое планирование электропотребления с 1 июля 2013 г. для крупных потребителей (с максимальной мощностью не менее 670 кВт) был введен запрет на применение в расчетах первой и второй ценовых категорий, что привело к резкому росту цены электроэнергии для многих предприятий.

Внедрение почасового учета и почасового планирования электропотребления позволит применять в расчетах за потребленную электрическую энергию пятую или шестую ценовую категорию, которые являются наиболее выгодными для потребителя, а также повысить эффективность использования электрооборудования.

Грамотно составленный график загрузки оборудования позволяет получить технико-экономический эффект за счет снижения затрат на приобретение электрической энергии вследствие переноса электропот-ребления в более льготный ценовой диапазон. График нагрузки энерго-системы представляет собой сумму множества графиков нагрузки потре-бителей, и поэтому выровнять его можно только с помощью потребителей-регуляторов, способных к ограничению или переносу части своей электрической нагрузки с одних часов суток на другие или с рабочих дней на выходные в зависимости от типа регулирования (суточное или недельное).

Исходным пунктом расчета электропотребления является расписание производственных циклов [5]. Примерная форма расписания производственных циклов представлена на рисунке 1.

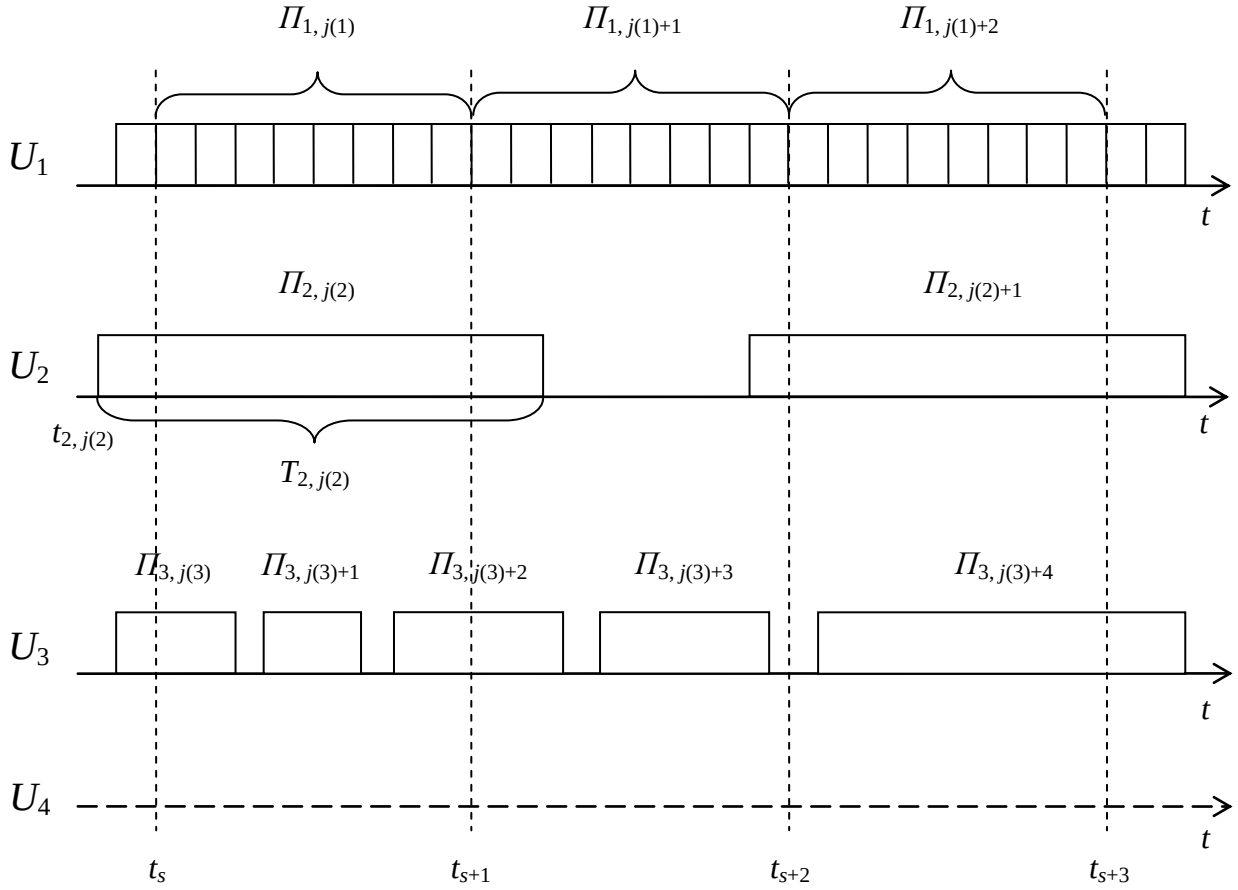


Рис. 1. Примерная форма расписания производственных циклов
U_1,…, U_4 – номера производственных участков - потребителей электроэнергии

Работа каждого участка планируется по расписанию, где соответствующие производственные циклы упорядочены по времени. Каждый производственный цикл (i, j) имеет свое плановое задание выпуска продукции $П_{ij}$ (i –группы агрегатов, j – индекс соответствующего цикла) и может быть разбит на временные интервалы k, продолжительность которых определяется технологией процесса.

Электроэнергия в кВт·ч, потребленная оборудованием за k-й интервал при производстве продукции n определяется соотношением:

$$E_{kin} = \sum_{k=1}^{K} W_{kin} \cdot I_{kin} \cdot t \qquad (1)$$

где W_{kin} – электрическая мощность оборудования i за интервал k при производстве продукции n:

$$W_{kin} = \frac{A_i \cdot R_{kin}}{\eta_{kin}},$$

R_{kin} – переменная, характеризующая режим работы оборудования i в интервале k при производстве n-го продукта, R_{kin}, как правило, представляет собой коэффициент снижения мощности оборудования, основанный на ситуационных условиях, режимах нагрузки и ограничениях;

η_{kin} – эффективность оборудования m на интервале k, получаемая на основе характеристик эффективности, соответствующих нагрузке в процентах;

I_{kin} – переменная, такая что: $I_{kin}=1$ – в случае, когда оборудование начало цикл производства во временном интервале k, $I_{kin}=0$ – в другом случае;

t – временной промежуток, ч.

Целью стратегии управления электропотреблением является минимизация общих эксплуатационных расходов, которые включают в себя затраты на потребленную энергию (постоянный или почасовой тариф), затраты на зарегистрированную пиковую нагрузку, и добавочные эксплуатационные расходы в связи со смещением нагрузок, если таковые имеются [6].

Целевая функция минимизации месячных производственных расходов:

$$\left(\min\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{I}\sum_{n=1}^{N}\left(\left(E_{kin}\cdot C_k\right)+\left(C_{add}\cdot I_{add}\right)\cdot t\right)\right)\cdot d+C_M\cdot M \qquad (2)$$

с учетом особенностей производства, ограничений по оборудованию, где

I – агрегаты (группа агрегатов);

N – общее число видов производимой продукции

E_{kin} – электроэнергия в кВт·ч, потребленная оборудованием i за k-й временной интервал при производстве продукции n;

C_k – стоимость электроэнергии за 1 кВт·ч в интервале времени k;

C_{add} – добавочная стоимость, связанная с деятельностью по управлению электропотреблением на интервале k. К добавочной стоимости можно отнести дополнительные затраты на оплату труда рабочих, возникшие в связи с перестройкой графика загрузки оборудования.

I_{add} – переменная, такая что: $I_{add}=1$ – при осуществлении действий по управлению электропотреблением, $I_{add}=0$ – в другом случае.

d – число рабочих дней в месяце;

C_M – стоимость пикового потребления за месяц;

M – заявленное пиковое потребление электроэнергии предприятием.

Вышеприведенное выражение рассчитывает общую стоимость электропотребления, состоящую из затрат на электроэнергию и затрат на пиковое потребление.

Капитальная стоимость дополнительных установок, если таковые имеются, или другая добавочная стоимость для включения в программу управления электропотреблением отражаются в величине C_{add}.

Решение задачи минимизации производственных расходов (2) при учете существующих ограничений может быть получено в формулировке задачи целочисленного программирования. Результатом является оптимальная характеристика при данном объеме выпуска продукции в условиях почасового тарифа на оплату электроэнергии.

Детерминированное расписание производственных работ для сложных производств, каким, например, является металлургическое производство,

на практике реализовать невозможно из-за большого количества случайных факторов, влияющих на электропотребление [3]. Особенно это относится к почасовому планированию работ. Устранить данную неопределенность можно путем выделения в производственном процессе всего предприятия потребителей-регуляторов, изменяя электропотребление которых можно добиться управления электропотреблением всего предприятия в заданных пределах. Для металлургического предприятия обычно подобными потребителями являются дуговые сталеплавильные печи, прокатные станы и другие энергоемкие потребители.

В соответствии с предлагаемой методикой построен почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия. Построение модели проводилось на основе данных почасо-вого потребления электрической энергии агрегатами электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны в период за октябрь 2013 г., а также с учетом индексу равновесных цен на продажу электроэнергии, полученных с сайта компании ОАО «АТС».

Текущий график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха представлен на рисунке 2.

В качестве потребителей-регуляторов в каждой из четырех независимых групп агрегатов в рамках данного производственного процесса была выделена дуговая сталеплавильная печь номинальной емкостью 20 т, 35 т, 15 т и 45 т соответственно.

При построении оптимального графика почасовой загрузки оборудования была соблюдена технология процесса [1],[2],[4], в том числе требование по величине перерывов в работе оборудования.

Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха, построенный путем решения задачи минимизации месячных производственных расходов представлен на рисунке 3.

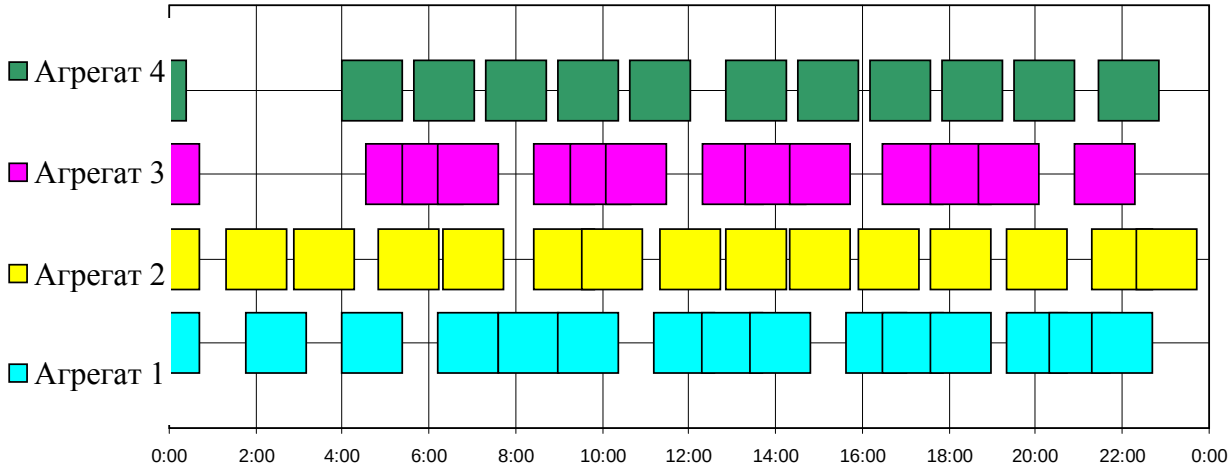


Рис. 2. Почасовой график загрузки оборудования электросталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны

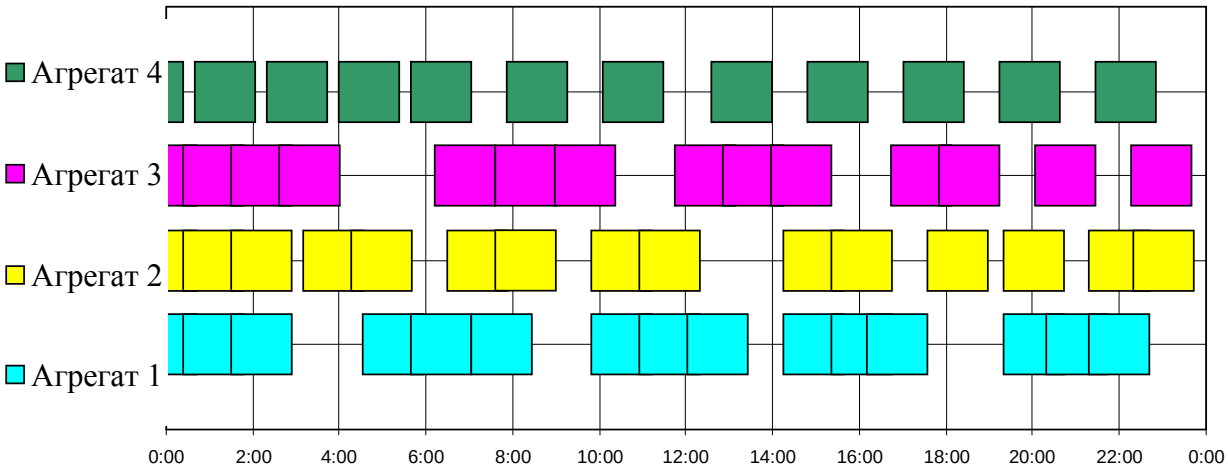


Рис. 3. Оптимальный почасовой график загрузки оборудования электро-сталеплавильного цеха металлургического предприятия 1-й ценовой зоны

Таким образом, полученный почасовой график позволяет снизить затраты на приобретение электрической энергии при осуществлении выпуска продукции и других необходимые операции за счет переноса электропотребления в более льготный ценовой диапазон.

Библиографический список

1. Вагин, Г.Я. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве: учебник / Г.Я. Вагин, В.А. Коровин, И.О. Леушин, А.Б. Лоскутов. – М.: Форум, 2012. – 272 с.

2. Гудим, Ю.А. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы: монография / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зиннуров, А.Д. Киселев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 547 с.

3. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышлен-ного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 1. – С. 5–13.

4. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления топливных газов на металлургическом производстве / Л.С. Казаринов, Л.А. Копцев, И.А. Япрынцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 24 – 26.

5. Казаринов, Л.С. Системные исследования и управление (когнитивный подход): научно-методическое пособие / Л.С. Казаринов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; Издатель Т. Лурье, 2011. – 524 с.

6. Ashok, S. Peak-load management in steel plants / S. Ashok // Applied Energy. – 2006. – № 83. – pp. 413–424.

К содержанию

УДК 658.265 + 681.518.2

МЕТОД НОРМИРОВАНИЯ И ПРОГНОЗА ПОТРЕБЛЕНИЯ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ОБОРОТНОГО И ТЕХНИЧЕСКОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Л.С. Казаринов, О.В. Колесникова, Т.А. Барбасова, А.Р. Хасанов

Рассмотрен метод нормирования потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия, основанный на определении удельного расхода воды отдельного производственного участка. Задачу норми-рования предлагается решать на основе кластеризации и регуля-ризации экспериментальных данных по удельному расходу воды. Приводится форма представления отчетной информации по использованию воды производственными участками за месяц.

Ключевые слова: нормирование; прогнозирование; потребление воды; водоснабжение; ресурсосбережение.

Нормирование и прогноз потребления технической воды осуществляется с целью снижения потерь воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия. Экономия технической воды приводит к снижению затрат электрической энергии на перекачку воды.

Задача нормирования и прогноза потребления энергетических ресурсов, в частности технической воды, электроэнергии, для промышленных предприятий рассмотрена в работах многих авторов, например, [1–7].

В данной работе предлагается метод нормирования и прогноза потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия, основанный на определении удельного расхода воды отдельного производственного участка. Для нормирования и прогноза потребления воды принимается отчетный период – месяц.

Удельный расход воды *i*-го производственного участка:

$$g_i = \frac{G_i}{P_i}, \qquad (1)$$

где g_i - удельный расход воды, т/единица продукции; G_i – полное потребление воды, т; P_i - количество продукции, произведенной *i*-ым производственным участком, единица продукции.

Следует отметить, что значения расхода воды в системе оборотного и технического водоснабжения характеризуются большим разбросом, что связано с нерациональным потреблением и потерями воды. В связи с этим при нормировании водопотребления необходимо предварительно проводить кластеризацию экспериментальных данных по удельному расходу воды производственного участка на регулярные данные и аномальные выбросы [8, 9].

Далее на регулярных экспериментальных данных методом наименьших квадратов определяется средний уровень удельного расхода воды – допустимая граница удельного водопотребления. На данных, находящихся ниже допустимой границы, также методом наименьших квадратов определяется номинальная граница удельного водопотребления.

Данные, находящиеся выше допустимой границы удельного водопотребления свидетельствуют о недопустимом уровне расхода воды. Данные, находящиеся на допустимой границе, а также между допустимой и номинальной границами свидетельствуют о допустимом расходе воды. Данные, находящиеся на оптимальной границы удельного водо-потребления, а также ниже нее – об экономии расхода воды.

Рис. 1 наглядно иллюстрирует приведенное выше разделение набора регулярных экспериментальных данных на указанные группы.

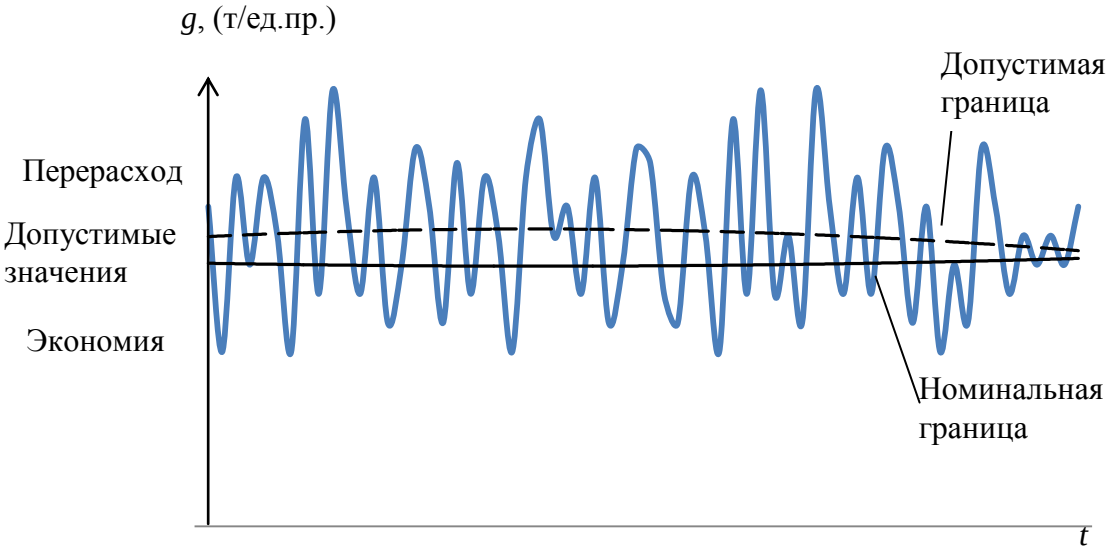


Рис. 1. Разделение набора данных

Далее на регулярных экспериментальных данных, свидетельствующих о допустимом и номинальном расходе воды, можно построить зависимость удельного расхода воды от количества произведенной продукции производственным участком.

Общий вид указанной зависимости:

$$g_i = f(P_i). \qquad (2)$$

Зависимость (2) в частном случае может быть представлена в экспоненциальном виде:

$$g_i = \exp\left(a_{i0} + a_{i1} P_i\right), \qquad (3)$$

где a_{i0}, a_{i1} – коэффициенты, определяемые для каждой зависимости.

Построение зависимостей (3) для отдельного производственного участка будем осуществлять по критерию точности и регуляризующему критерию на двух наборах данных: экспериментальных и регуляризующих. Экс-

периментальные данные отражают результаты наблюдений реальных значений по расходу вода. Регуляризующий набор данных является дополнительным и используется для восполнения недостающей информации, которой не содержится в данных реальных наблюдений. В качестве регуляризующего набора данных могут быть использованы нормативные данные.

Запишем критерий точности:

$$\sigma_i^2 = \sum_{t \in T} \left(g_{it} - \exp\left(a_{i0} + a_{i1} P_{it} \right) \right)^2 , \quad (4)$$

где g_{ti} – расход воды i-го производственного участка на момент наблюдения t, т; P_{ti} - фактическое значение количества продукции, произведенной i-ым производственным участком на момент наблюдения t, единица продукции; T - множество моментов наблюдения.

Регуляризующий критерий:

$$R_i^2 = \sum_{j=0,1} \left(a_{ij} - a_{ij}^{н} \right)^2 , \quad (5)$$

где $a_{ij}^{н}$ - нормативные значения коэффициентов a_{ij}.

Целевая функция представляет собой функцию Лагранжа:

$$Q_L = (1 - \alpha_R)\sigma^2 + \alpha_R R^2 \to \min , \quad (6)$$

где $\alpha_R \in [0;\ 1]$ - регуляризующий множитель.

При этом значение регуляризующего множителя α_R выбирается из следующих условий. При $\alpha_R = 0$ задача решается только на экспериментальных данных и в общем случае является некорректно поставленной. При $\alpha_R = 1$ задача решается только на регуляризующих данных и по определению является корректно поставленной. Однако при этом получаемое решение не отражает реальные экспериментальные данные. Поэтому при выборе значения α_R необходимо задавать минимально возможное значение, при котором сохраняется корректность постановки задачи.

С целью облегчения процедуры нормирования потребления воды должно быть разработано программное обеспечение, позволяющее централизованно хранить данные о фактическом удельном расходе воды и объемах произведенной продукции помесячно за неограниченный промежуток времени для каждого производственного участка, настраивать права доступа персонала к наборам данных, выполнять расчет зависимостей для получения коэффициентов a_{i0} и a_{i1}, отображать на экране и выводить на печать графики зависимостей. В программе должно быть предусмотрено создание зависимостей вида (3) для зимнего и летнего периодов.

Прогноз объемов потребления воды отдельным производственным участком может осуществляться на основе построенных зависимостей вида (3) и плановых объемов производства продукции для отдельного производственного участка на месяц по соотношению:

$$G_i^{пр} = g_i P_i^{пл} , \quad (7)$$

где $G_i^{пр}$ - прогнозный объем потребления воды отдельным производственным участком, т; $P_i^{пл}$ - плановый объем производства продукции для производственного участка на месяц, единица продукции.

Таким образом, для нормирования и прогноза потребления воды в системе оборотного и технического водоснабжения промышленного предприятия необходима отчетная информация по итогам за месяц об объемах произведенной продукции и фактических удельных расходах воды на каждый вид продукции в соответствии с принятой структурой учета воды для производственных участков, а также информация по плановому объему производства продукции для производственных участков на месяц. Форма представления отчетной информации по использованию воды производственными участками за месяц может иметь вид, представленный таблицей.

Таблица

Анализ использования воды подразделениями

Наименование участка	Наименование продукции	Выработка продукции, единица продукции	Удельный расход воды, т/ед. продукции			Полный расход воды, т		Экономия (–) Перерасход (+)	
			расчетный		фактический	расчетный	фактический	т	%
			доп.	ном.					

В таблице кроме фактических значений по выработке продукции, полному и удельному расходу воды указываются расчетные значения: полного расхода воды, определяемого по соотношению (7), удельного допустимого и удельного номинального расходов воды, определяемых по соотношению (3) на соответствующих наборах данных (допустимых и номинальных).

Библиографический список

1. Казаринов, Л.С. Метод прогнозирования электропотребления промышленного предприятия / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова, А.А. Захарова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14. – № 1. - С. 5–13.

2. Казаринов, Л.С. Оптимальное прогнозирование потребления энергетических ресурсов по стоимостному критерию / Л.С. Казаринов, Т.А. Барбасова, А.А. Захарова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Т. 13. - № 1. - С. 90–94.

3. Копцев, Л.А. Нормирование и прогнозирование потребления электроэнергии на промышленном предприятии / Л.А. Копцев, А.Л. Копцев // Промышленная энергетика. – 2011. - № 1. - С. 18–23.

4. Гринев, А.В. Комбинированный метод расчета норм потребления топливно-энергетических ресурсов / А.В. Гринев // Энергосбережение и водоподготовка. - 2011. - № 6. - С. 42–44.

5. Кудрин, Б.И. О теоретических основах и практике нормирования и энергосбережения / Б.И. Кудрин // Промышленная энергетика. - 2000. - № 6. - С. 33–36.

6. Пермин, С.М. Планирование, учет, нормирование и повышение эффективности использования энергоресурсов на Астраханском ГПЗ / С.М. Пермин, И.В. Долотовский, Е.А. Ларин, Н.В. Долотовская // Газовая промышленность. - 2010. - № 10. - С. 25–28.

7. Щелоков, Я.М. О нормировании энергетических показателей / Я.М. Щелоков // Промышленная энергетика. - 2007. - № 10. - С. 50–53.

8. Казаринов, Л.С. Методика идентификации производственных характеристик на основе кластеризации данных / Л.С. Казаринов, О.В. Попова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7(79). – С. 27–28.

9. Крянев, А.В. Математические методы обработки неопределенных данных / А.В. Крянев, Г.В. Лукин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 216 с.

К содержанию

УДК 628.971:681.51

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ НАРУЖНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ

Е.И. Крахмалев

В статье предложена математическая модель расчета освещенности для осветительных установок с учетом различных кривых силы света. Также представлены результаты моделирования круглосимметричного осветителя.

Ключевые слова: освещение, автоматизированные системы управления уличным освещением, АСУ НО.

Применение новых технологий контроля и управления в системах уличного освещения позволяет достичь значительного снижения потребление энергии и эксплуатационных затрат. Так, проведенные исследования имеющегося отечественного и зарубежного опыта показывают, что потенциал экономии денежных средств при комплексном внедрении современных энергосберегающих технологий в системах уличного освещения составляет более 50 %.

Учитывая приоритетность политики энергосбережения, проводимой в настоящее время в Российской Федерации на базе современного контроллерного и коммуникационного оборудования возможно создание энергоэффективных систем управления наружным освещением, обеспечивающих максимальную экономию электроэнергии, снижение эксплуатационных расходов и обеспечение высокого качества освещения для комфортности проживания граждан и безопасности дорожного движения [1].

Постепенная эволюция осветительных приборов в системах наружного освещения привела к наличию разнородных осветителей, применяемых в системах наружного освещения, а различие их характеристик к существенным отличиям действительным значениям освещенности по сравнению с проектными значениями. Развитие в данном направлении затруднено отсутствием методов расчета светотехнических характеристик светодиодных осветительных установок и систематизированной информации по световой эффективности светодиодов. Известная применяемая проектными организациями методология [2] устарела, что вызвано недостаточным прогрессом в российской стандартизации и наличием дефицита в специальном измерительном оборудовании. В этой связи актуальной является задача моделирования светотехнических характеристик различных осветителей на стадии проектирования. Актуальность данного направления также подтверждается высокой интенсивностью исследований в области создания осветительных установок на основе светодиодных источников света с перспективой полной замены светодиодными световыми приборами применяемых на сегодняшний день ламп накаливания, дуговых ртутных и ламп высокого давления.

Для расчета освещения осветительных установок в системах наружного освещения на практике имеет интерес моделирование кривых света различных осветителей с учетом совокупного влияния их на освещаемую поверхность.

Математический аппарат, применяемый в трехмерной компьютерной графике можно использовать для анализа освещенности в системах наружного освещения с некоторыми допущениями. Модели обычно задаются набором плоских выпуклых граней, хотя большинство реальных трёхмерных предметов имеют гладкие криволинейные поверхности. Таким образом, криволинейная поверхность рисуется как ребристая полигональная сетка. Для того, чтобы эта сетка выглядела гладкой, используется тот или иной метод интерполяции освещённости вершин полигональной сетки.

Для расчета освещенности в многосвязной структуре применим модель затенения Фонга [3]. Пусть заданы: точечный источник света, расположенный в некоторой точке, поверхность, которая будет освещаться и наблюдатель. Будем считать, что наблюдатель точечный. Каждая точка поверхности имеет свои координаты и в ней определена нормаль к поверхности. Её освещенность складывается из трех компонент: фоновое освещение, рассеянный свет и бликовая составляющая. Свойства источника определяют мощность излучения для каждой из этих компонент, а свойства материала поверхности определяют её способность воспринимать каждый вид освещения.

В общем виде модель Фонга выглядит как:

$$I = K_a + K_d\left(\vec{n},\vec{l}\right) + K_s\left(\vec{n},\vec{h}\right)^p, \quad (1)$$

где $\vec{n}$ – вектор нормали; $\vec{l}$ – направление проецирования; K_a – коэффициент фонового освещения; K_s – коэффициент зеркального освещения; K_d – коэффициент диффузного освещения.

Однако такая модель не учитывает особенности кривой силы света (КСС) осветительной установки. В общем виде КСС может быть представлена как:

$$I(\alpha) = I_0 \cdot \cos^{\mathrm{n}}(\alpha) \quad (2)$$

или

$$I(\alpha) = I_{B0} \cdot (\cos^{\mathrm{n}}(\alpha - \alpha_0) + \cos^{\mathrm{n}}(\alpha + \alpha_0)) \quad (3)$$

для светодиодных источников света.

Для векторов и углов, использованных при задании локальных моделей освещения, будут применяться обозначения, представленные на рисунке и в следующей таблице.

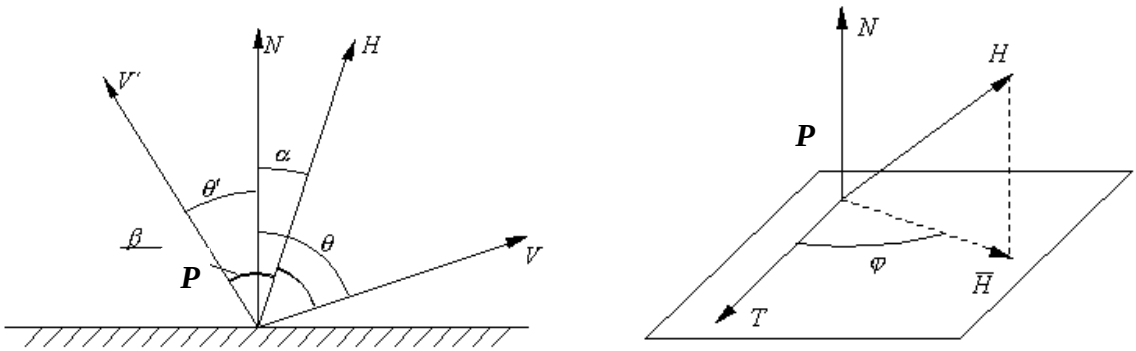


Рис. 1. Углы и вектора для моделей локального освещения
V – исходящее направление света; V' – входящее направление света;
N – нормаль к поверхности; T – касательный вектор к поверхности

Таблица

Углы между векторами

$t = (H \cdot N)$	$\alpha = \arccos t$
$u = (H \cdot V)$	$\beta = \arccos u$
$v = (V \cdot N)$	$\theta = \arccos v$
$v' = (V' \cdot N)$	$\theta' = \arccos v'$
$w = (T \cdot \overline{H})$	$\varphi = \arccos w$

Взаимодействие света и поверхности обычно описывается отношением входящего и исходящего светового потока в заданной точке P поверхности. Для теоретических моделей освещенности такой процесс описывается функцией $R_\lambda(P, V, V')$ – двунаправленной функцией отражательной способности (ДФОС). Для эмпирических моделей по аналогии можно ввести функцию $S_\lambda(P, V, V')$ – двунаправленную функцию закраски (ДФЗ).

Для моделей отражения отношение между входящим и исходящим потоком света описывается выражением:

$$L_\lambda(P,V) = \int_{2\pi} R_\lambda(P,V,V')\, L_\lambda(P,-V')(NV')dV' , \quad (4)$$

где $L_\lambda(P,V)$ – световой поток, отраженный от поверхности в точке P в направлении V; $L_\lambda(P,-V')$ – световой поток, падающий на точку поверхности P с направления $-V'$; $R_\lambda(P,V,V')$ – значение ДФОС в точке поверхности P, для направлений V и V'; dV' – элементарный телесный угол вдоль направления V'.

Поскольку V, V', N единичные вектора, (NV') – косинус угла между векторами N и V'.

Значение количества отраженного света, таким образом, принимается за интеграл по всем возможным направлениям (то есть по полусфере над поверхностью материала) значений количества света падающего на поверхность, умноженный на значение ДФОС и проекцию вектора V' на нормаль.

ДФОС имеет два важных свойства, которые напрямую вытекают из физики света. Первое свойство это симметричность R_λ относительно направлений V и V', то есть:

$$R_\lambda(P,V,V') = R_\lambda(P,V',V) \text{ , при } \forall V \text{ и } \forall V' \quad (5)$$

Второе свойство вытекает из закона сохранения энергии. Согласно этому свойству R_λ удовлетворяет следующему соотношению:

$$\int_{2\pi} R_\lambda(P,V,V)\,(NV)dV \le 1, \text{ при } \forall V \quad (6)$$

Для моделей закраски, отношение между входящим и исходящим количеством свет задается в следующем виде:

$$L_\lambda(P,V) = \sum_{i=1}^{n} S_\lambda(P,V,V_i) L_\lambda(P,-V_i) \quad (7)$$

где $L_\lambda(P,V)$ – световая энергия, отраженная от поверхности в точке P и в направлении; $L_\lambda(P,-V_i)$ – световая энергия, падающая на точку поверхности P из направления $-Vi$; $R_\lambda(P,V,V')$ – значение ДФОС в точке поверхности P, для направлений V и V_i.

Таким образом, количество отраженного света вычисляется как дискретная сумма значений количества света с n различных направлений, взвешенных двунаправленной функцией закраски. Такая формулировка хорошо работает для алгоритмов построения изображения, в которых принимаются во внимание лишь ограниченное количество точек пространства и применима для вычисления нормируемых параметров освещенности и яркости на моделируемой поверхности.

На основании предложенной математической модели была написана программа на языке C++. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Таким образом, предложенная модель позволяет моделировать освещенность по известным КСС для различных источников освещения. Последующая модернизация алгоритма позволит учитывать естественную освещенность, а так же освещенность, создаваемую соседними источниками освещения. Применяя данную модель можно вычислить минимальную освещенность, создаваемую несколькими источниками, и впоследствии, оптимизировать их яркость и достичь минимума эксплуатационных расходов.

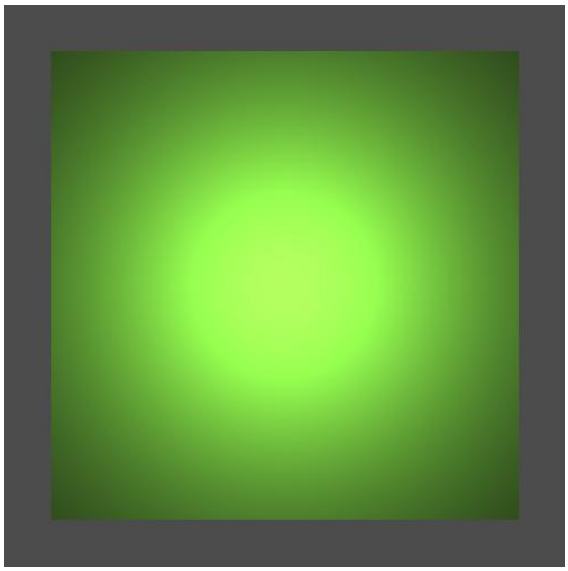


Рис. 2. Результаты моделирования

Библиографический список

1. Автоматизированные системы управления энергоэффективным управлением / под ред. Л.С. Казаринова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; издатель Т. Лурье, 2011. – 200 с.

2. Справочник для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг. – Л. :Энергия, 1976. – 384 с.

3. Illumination for computer generated pictures / B.T. Phong // Communications of ACM 18 (1975), no. 6, pp. 311–317.

К содержанию

УДК 628.93:681.515 + 628.941:681.515

ПОДХОД К ВНЕДРЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ УЛИЧНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

Е.И. Крахмалев

В статье предложен подход к оценке факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики распеределенных систем освещения. Также предложена математическая модель потребления электрической мощности в системе освещения с учетом факторов, влияющих на искусственную освещенность и технический ресурс элементов системы.

Ключевые слова: освещение, автоматизированные системы управления уличным освещением, АСУ НО.

По статистике, в современном муниципальном хозяйстве на уличное освещение приходится до 38 % энергопотребления, для снижения которого требуется техническая модернизация городских систем освещения [1]. Важно заметить, повышение энергетической эффективности не только уменьшает затраты на покупку электроэнергии, но и снижает объемы выбросов углекислого газа, связанных с выработкой электроэнергии на нужды уличного освещения.

По этой причине становится актуальной разработка интеллектуальной системы управления сетями уличного освещения на основе комплексного подхода, основанного на использовании различных технологий связи, включающей беспроводные сенсорные сети, технологию передачи данных по питающей линии, волоконно-оптические линии связи, мобильные сети и др., которая решает следующие задачи:

1. Снижается энергопотребление и, как следствие, снижение выбросов диоксида углерода в атмосферу.
2. Достигается высокое качество освещения для обеспечения комфортности граждан и безопасности дорожного движения.
3. Повышается технический ресурс элементов системы освещения, усиливая при этом экономических эффект.

Со светотехнической точки зрения появление большого количества конкурирующих производителей осветительных приборов привело к ошибочному пониманию взаимозаменяемости различных типов осветителей. Любой осветительный прибор, помимо суммарного светового потока обладает рядом параметров, таких как: цветовая температура, диаграмма направленности, потребляемая мощность, спектральная характеристика и т.д. Все эти характеристики влияют на общую освещенность и зачастую при непосредственной замене «устаревших» светильников на новые происходит нарушение нормируемых параметров.

Согласно действующим сводом правил [2] нормируются параметры освещенности, создаваемой осветителем:

$E_{ср}$ – средняя освещенность дорожного покрытия;

$L_{ср}$ – средняя яркость дорожного покрытия;

$E_{мин}/E_{ср}$– равномерность распределения освещенности дорожного покрытия;

$L_{мин}/L_{ср}$ – равномерность распределения освещенности дорожного покрытия;

$L_{мин}/L_{макс}$ – продольная равномерность распределения яркости дорожного покрытия.

Однако занижение рабочих параметров влияют на результирующую освещенность. Она с одной стороны ограничена действующим СП, с другой стороны может быть определена как технический ресурс системы освещения.

Технический ресурс – показатель долговечности, характеризующий запас возможной наработки объекта. Согласно [3] ресурсом называют наработку объекта от начала или возобновления эксплуатации до наступ-ления предельного состояния.

Таким образом, увеличение ресурса представляет серьезный резерв для экономии средств, материалов, энергии и трудовых затрат. Ресурс в значительной степени зависит от нагрузок, действующих на осветители или коммуникационные элементы системы. Правильный выбор элементной базы и корректный расчет – основные источники повышения ресурса без значительного удорожания. Поскольку прогнозирование ресурса включает установление зависимости его от всех внешних и внутренних факторов, разработку методов прогнозирования следует рас-сматривать как одну из неотъемлемых частей общей проблемы ресурса.

Особое место занимает прогнозирование ресурса на стадии эксплуатации. В отличие от стадии проектирования, когда прогнозу подлежит ресурс генеральной совокупности еще не созданных технических объектов, прогнозирование на стадии эксплуатации выполняют для конкретных объектов. При этом оценке подлежат остаточный ресурс и (или) остаточный срок службы.

Индивидуальное прогнозирование ресурса открывает дополнительные пути для получения экономического эффекта и не только позволяет предупреждать возможные отказы и непредвиденные достижения предельных состояний, но и более правильно планировать режимы эксплуатации, профилактические мероприятия и снабжение запасными частями. Более того, переход к индивидуальному прогнозированию ведет к увеличению среднего ресурса объектов системы и требует выбора оптимального срока эксплуатации.

Поэтому можно рассматривать прогнозирование индивидуального остаточного ресурса как систему управления процессом эксплуатации и технического обслуживания.

Внедрение индивидуального прогнозирования требует дополнительных расходов на программно-технические средства диспетчеризации и анализа, однако технически выполнимы современными аппаратными средствами и позволяют получить значительный экономический эффект.

Можно формализовать экономический и качественный фактор в виде системы уравнений и неравенств:

$$\begin{cases} \text{Р} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{осв}} \cdot K_{\text{дим}} + P_{\text{ПЛ}} + P_{\text{Пдим}} \\ \prod \; = \prod_{i=1}^{n} K_{\text{эл}} + E\left\{\rho_{ij}^{max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^{k} \in m_{ij}} \left(1 - \rho_{ij}^{k}\right)\right\} \\ \begin{cases} \Ф > 20Лк, L > 0.4, \;\; \text{при условии категории выше А4'} \\ \dots \\ \Ф > 6Лк, L > 0.35, \;\; \text{при условии категории выше В3} \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

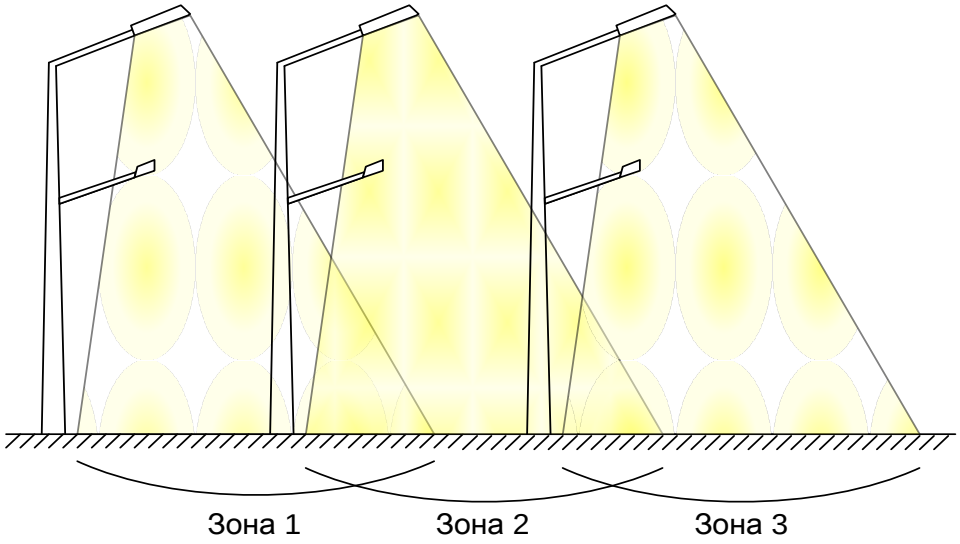
где уравнение $\text{Р} = \sum_{i=1}^{n} P_{\text{осв}} \cdot K_{\text{дим}} + P_{\text{ПЛ}} + P_{\text{Пдим}}$ показывает суммарное энергопотребление системы освещения; $\sum_{i=1}^{n} P_{\text{осв}} \cdot K_{\text{дим}}$ – суммарное потребление осветителями с учетом коэффициента диммирования; $P_{\text{ПЛ}}$ – мощность потерь в линии; $P_{\text{Пдим}}$– мощность потерь в диммирующих устройствах; уравнение $\prod \; = \prod_{i=1}^{n} K_{\text{эл}} + E\left\{\rho_{ij}^{max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^{k} \in m_{ij}} \left(1 - \rho_{ij}^{k}\right)\right\}$ – оценивает технический ресурс элементов системы и связи, а система неравенств:

$$\begin{cases} \Ф > 20Лк, L > 0.4, \;\; \text{при условии категории выше А4} \\ \dots \\ \Ф > 6Лк, L > 0.35, \;\; \text{при условии категории выше В3} \end{cases}$$

описывает требования к качеству освещения.

Решения системы будет оптимальным с точки зрения минимизации экономических расходов, обеспечения долговечности и требуемого качества освещения. Кроме того систему освещения следует рассматривать как распределенный энерготехнологический объект, который представляет собой многосвязный объект с распределенными параметрами. Особенностью управления таким объектом является то, что каждая выходная величина характеризуется не конкретным значением, а некоторой зоной распределения значений, представленной в виде зональной характеристики. Управление распределенным энерготехнологическим объектом осуществляется с помощью изменения вектора силовых управляющих воздействий. Причем изменение даже одного управляющего воздействия из распределенного набора приводит к изменению всех выходных зональных характеристик.

Поэтому необходимо говорить о многозональном управлении, формирующем вектор силовых управляющих воздействий на основании анализа выходных зональных характеристик (рис. 1) и внешних условий.



Зоны освещенности

Оценка зональных характеристик освещенности может быть точно измерена на основании инструментальных средств. Однако для крупномасштабных объектов, таких как комплексы освещения городов, измерить все зональные характеристики представляет собой необозримую задачу. Поэтому на практике точная оценка характеристик зон производится выборочно. Для остальных зон оценка осуществляется эксплуатационным персоналом эмпирически в порядковых шкалах.

Безусловно, все мероприятия по энергосбережению связаны с экономической окупаемости таких мероприятий. Поэтому, замена всех компонент системы должна быть просчитана как с технической стороны, так и с точки зрения окупаемости затрат.

Библиографический список

1. Интеллектуальное уличное освещение по технологии Echelon: двукратное снижение энергопотребления, повышение безопасности и улучшение экологии. – San Jose, CA: Echelon Corp., 2008. – URL: http://www.echelon-lon.ru/news/street-lighting.html.

2. СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*».

3. ГОСТ Р 27.601-2011 Надежность в технике. Управление надежностью. Техническое обслуживание и его обеспечение.

К содержанию

УДК 658.265:628.1 + 628.1:658.011.56

ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Р. Хасанов, Т.А. Барбасова, О.В. Колесникова

Предложен подход к расчету систем водоснабжения на основе построения макромоделей, позволяющих осуществлять моделирование динамических и статических режимов систем водоснабжения произвольной структуры, исходя из требуемого уровня детализации и наличия исходных данных по характеристикам сети.

Ключевые слова: моделирование; макромоделирование; система водоснабжения; подход; агрегирование.

Современные подходы к повышению энергетической эффективности систем снабжения энергоресурсами основаны на построении математических моделей сетей, позволяющих производить расчеты в статических и динамических режимах [1]. Данные расчеты связаны с составлением и решением системы дифференциальных и алгебраических уравнений. В связи со сложностью подобных систем уравнений, составляемых для крупных распределенных объектов, их решение целесообразно проводить численными методами с применением ЭВМ.

Подобное численное решение системы алгебраических уравнений может проводиться с использованием различных программных продуктов (например, ГИС Zulu, MS Excel, Matlab и т.д.). Однако в большинстве случаев это требует жёсткого задания уравнений рассматриваемой системы, в результате чего в процессе решения будет получено частное решение для одной конкретной конфигурации системы. При изменении конфигурации для перерасчёта требуется заново записать и ввести в программу уравнения изменённой системы, что значительно затрудняет расчёт.

Другой важной особенностью проведения расчетов крупных промышленных систем водоснабжения является ограниченный объем информации по детализации элементов распределительных сетей и потребителей, доступной для практического использования. Данная особенность требует использования специальных методов макромоделирования, не требующих чрезмерной детализации характеристик сети, с достаточной для практического применения точностью.

Для преодоления указных недостатков предлагается подход к составлению и решению системы гидравлических уравнений на основе построения макромодели системы водоснабжения предприятия, не требующей чрезмерной детализации характеристик сетей и позволяющей проводить расчет и анализ режимов водоснабжения с достаточной для практического применения точностью [2, 3].

Суть подхода к построению макромодели гидравлических режимов системы водоснабжения состоит в представлении реальной водяной сети в виде многоуровневой структуры с выделенными сетевыми районами, отдельными крупными потребителями и соединяющими их магистральными водопроводами (рис. 1).

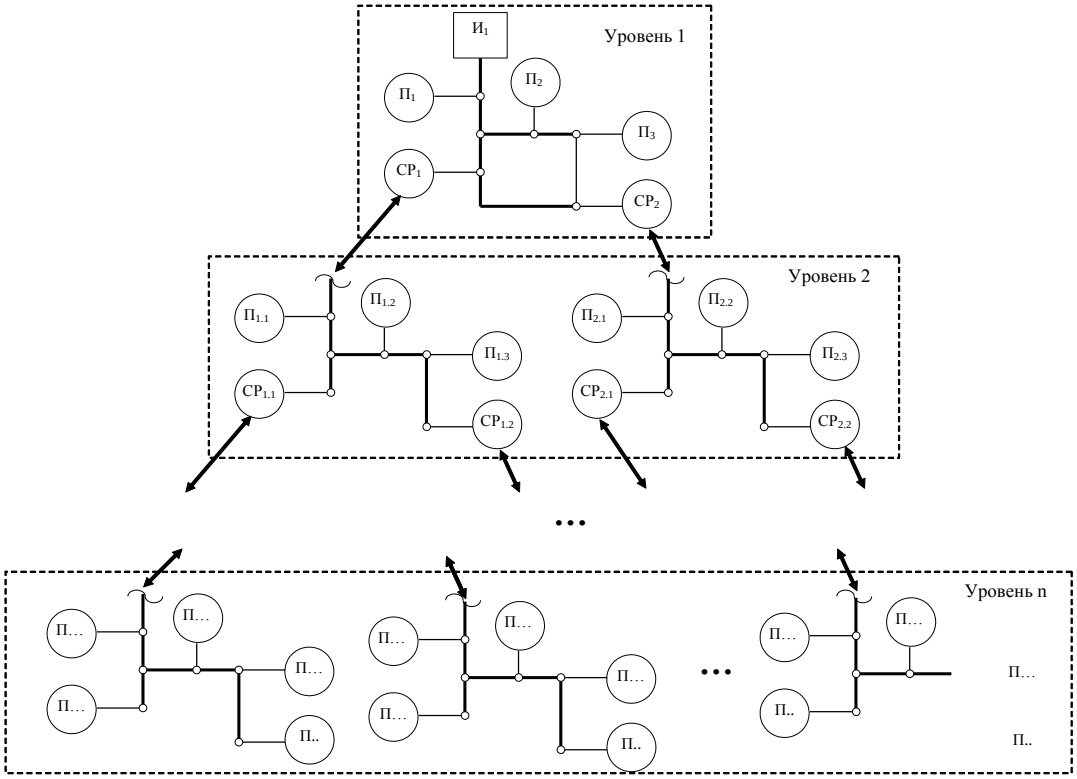


Рис. 1. Многоуровневая структура системы водоснабжения

В основу построения макромодели системы водоснабжения положены следующие принципы:

1) сетевые районы ($СР_i$) со сложной схемой сетевых соединений, содержащие большое количество относительно маломощных потребителей, рассматриваются как единый эквивалентный потребитель;

2) потребители ($П_j$), подключенные непосредственно к магистральной сети, рассматриваются как таковые;

3) при необходимости более подробного рассмотрения параметров гидравлических режимов внутри отдельных сетевых районов может быть осуществлен переход на следующий уровень макромодели, отражающий состояние потребителей ($П_{i.k}$) и вновь выделенных сетевых районов ($СР_{i,j}$) внутри сетевого района $СР_i$. При этом объект $СР_i$, являющийся потребителем на верхнем уровне макромодели, выступает в роли источника для сетевого района $СР_{i\,j}$.

Описанный подход дает возможность построить адекватную математическую макромодель сложной распределенной производственной системы водоснабжения предприятия в условиях ограниченного объема исходных данных.

Разработка программной математической макромодели гидравлических режимов системы водоснабжения промплощадки предприятия должна основываться на результатах обследований, которые включают в себя данные о параметрах и режимах работы оборудования насосных станций, а также данные о структуре, параметрах и режимах работы основных водопроводов и потребителей системы.

С учетом изложенного выше подхода составление и решение гидравлических уравнений предлагается осуществлять в среде моделирования и визуализации VisSim. Указанный программный продукт обладает целым рядом возможностей, позволяющих значительно упростить и ускорить процесс расчёта:

1) ввод уравнений путём выбора и соединения стандартных блоков (сумматоров, коэффициентов, интеграторов, нелинейных элементов и т.д.);

2) возможность объединения нескольких блоков в составной блок;

3) решение как дифференциальных, так и алгебраических уравнений в реальном или ускоренном времени;

4) возможность передавать по соединениям кроме скалярных сигналов также вектора и матрицы;

5) наличие в наборе стандартных блоков, а также блоков переключения сигналов и регистров-защёлок, позволяющих оперативно менять структуру уравнений;

6) возможность объединять в одной диаграмме и решать совместно уравнения, описывающие различные процессы, протекающие в системе.

При гидравлическом расчёте в большинстве случаев требуется рассчитать напоры и расходы воды в каждой точке системы. При расчёте режимов системы водоснабжения исходными данными для расчёта являются:

1) конфигурация гидравлической системы;

2) гидравлические сопротивления участков системы;

3) расходные характеристики и степени открытия регулирующих клапанов;

4) технические и нагрузочные характеристики насосов.

В среде моделирования VisSim все связи между блоками однонаправленные – от блока-источника сигнала к одному или нескольким блокам-потребителям сигнала. Таким образом, на верхнем уровне представления гидравлической схемы выделяются отдельные функциональные элементы в виде составных блоков (труба, задвижка, обратный клапан, насос и т.д.). Каждый такой элемент содержит в себе все уравнения, описывающие протекающие в нём процессы с заданным приближением. Направление соединения соответствует положительному направлению течения потока (расход $G > 0$).

При таком представлении соединения между блоками ассоциируются с физическим подключением элементов друг к другу (т.е. с отрезком трубы).

Для облегчения соединения элементов между собой и контроля возможных ошибок при наборе схемы по каждому из соединений передается вектор из двух параметров $[H\ G]^T$. Эти параметры представляют собой напор H [м] и расход G [м^3/ч].

При этом принимаются следующие допущения:

1) вода является несжимаемой жидкостью;

2) гидравлические потери напора на участке между элементами системы отсутствуют.

Среда VisSim не может решать алгебраические уравнения, записанные в явном виде (с образованием алгебраических циклов). Это связано с особенностями расчёта схем средой VisSim. При обнаружении алгебраических циклов выдаётся сообщение об ошибке и моделирование прекращается. Поэтому для задания в диаграмме системы алгебраических уравнений она должна быть «разорвана» при помощи специальных блоков “unknown” и “constraint”.

Для решения алгебраических уравнений в среде VisSim они должны быть записаны в виде *f(x)=0*. При этом на каждом шаге моделирования VisSim будет находить такие значения элементов вектора *x*, которые обеспечивают равенство функции *f(x)* нулю с заданной точностью. Решение производится методом Ньютона-Рафсона.

При задании в диаграмме уравнений вида *f(x)=0* неизвестные параметры вектора *x* должны представляться в виде блока “unknown”. На вход этого блока подается начальное значение, с которого начинается решение алгебраических уравнений. Результат вычисленной по значениям выходов блоков “unknown” функции *f(x)* должен быть подан на вход одного (для скалярного случая) или нескольких блоков “constraint”. При этом процесс решения алгебраических уравнений средой VisSim можно представить как подбор на каждом шаге моделирования выходов блоков “unknown” до достижения всех входов блоков “constraint” нулевого значения (с заданной точностью).

Для того чтобы избежать алгебраических циклов в системе *f(x)=0* в качестве неизвестных величин выбираются значения расходов, а в качестве результата функции *f(x)* – ошибку вычисления давления в определенных точках схемы или ошибку вычисления расхода воды, поступающей на потребителя.

Пример построения системы водоснабжения в среде моделирования Vissim приведён на рисунке 2.

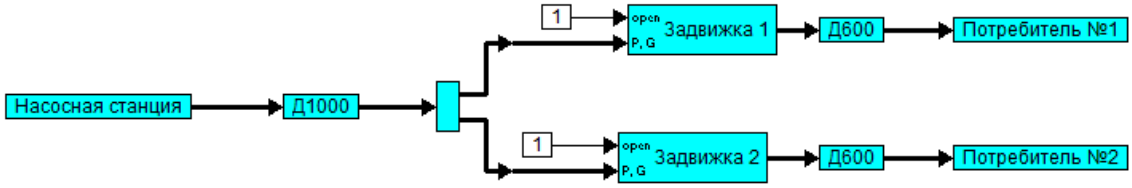


Рис. 2. Пример построения системы водоснабжения в среде VisSim

Представленная на рисунке 2 система водоснабжения состоит из двух ветвей (присутствует деление потока), поэтому система уравнений $f(x)=0$ содержит два уравнения (1):

$$\begin{cases} G_{1p}^2 - G_1^2 = 0 \\ G_{2p}^2 - G_2^2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $G_{1p}=H_1/s_1$, $G_{2p}=H_2/s_2$ – расчетные значения расходов воды, поступающей на потребители №1 и №2 соответственно; H_1, H_2 – фактические значения напоров воды на входах потребителей №1 и №2 соответственно; s_1, s_2 – гидравлические сопротивления потребителей №1 и №2 соответственно; G_1, G_2 – фактические значения расхода воды, поступающей на потребители № 1 и № 2 соответственно.

Заметим, справедливость выражения (2):

$$G_2 = G - G_1, \quad (2)$$

где G – суммарный расход воды, поступающей на вход блока «деление потока».

С учетом соотношения (2) система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{cases} G_{1p}^2 - G_1^2 = 0 \\ G_{2p}^2 - (G - G_1)^2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

В качестве неизвестных величин в системе уравнений (1.3) являются расходы G_1 и G, которые в среде Vissim задаются с помощью блока “unknown”.

Таким образом, получаем, что схема водоснабжения, представленная на рисунке 2, описывается системой (3) из двух алгебраических уравнений с двумя неизвестными G_1 и G.

Одними из центральных задач создания макромодели системы водоснабжения, являются:

1) информационная поддержка принятия решений по оперативному диспетчерскому управлению;

2) анализ эффективности гидравлических режимов функционирования системы водоснабжения;

3) планирование энергосберегающих мероприятий, направленных на совершенствование работы системы водоснабжения.

Для решения поставленных задач предложен подход к построению макромодели гидравлических режимов системы водоснабжения промплощадки предприятия. Особенностью макромодели, построенной на основе предложенного подхода, по сравнению с традиционными методами проведения гидравлических расчетов водяных сетей является отсутствие необходимости чрезмерной детализации характеристик сетей и потребителей при обеспечении достаточной для практического использования точности моделирования в условиях ограниченного объема исходных данных.

Библиографический список

1. Каганович, Б.М. Расчет сложных тепловых сетей / Б.М. Каганович, М.К. Такайшвили, С.В. Сумароков и др. // Водоснабжение и сан. техника. 1974. – № 4. – С. 18–19.

2. Гойтина, Е.В. Подход к автоматизированному анализу эффективности режимов теплоснабжения на основе макромоделирования / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – Вып. 5. – № 7 (79). – С. 9–11.

3. .Гойтина, Е.В. Методика идентификации параметров модели тепловой сети по данным эксплуатации / Е.В. Гойтина, Д.А. Шнайдер // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 9. – С. 20–22.

К содержанию

УДК 002:004.056 + 004.056.5 + 34.03:004.056.5

ПРОБЛЕМА РАЗВИТИЯ КУЛЬТУРЫ ИНФОРМАЦИОННО-ПСИХОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БУДУЩЕГО СПЕЦИАЛИСТА ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИИ В ПРАВООХРАНИТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ

А.А. Ахметвалиева

В статье проблема обеспечения информационно-психологической безопасности специалиста по защите информации в правоохранительной сфере анализируется с педагогической позиции; выявляются преимущества и недостатки существующих подходов к проблеме информационно-психологической безопасности личности; на основе функционально-деятельностного подхода уточняется понятие информационно-психологической безопасности, также опираясь на принципы системного, деятельностного, культурологического подходов, формулируется понятие «культура информационно-психологической безопасности личности» и определяется методология развития данного типа культуры у специалистов по защите информации в правоохранительной сфере.

Ключевые слова: культура; информация; безопасность; специалист по защите информации; правоохранительная деятельность.

В настоящее время содержание образования в России определяется стандартами, новое поколение которых разрабатывается на компетентностной основе. Под компетенцией понимается способность применять знания, умения и личностные качества для успешной деятельности в определенной области. Специфика профессиональной деятельности специалиста по защите информации в правоохранительной сфере в условиях информационного общества поставила перед высшей школой задачу выявить и

сформировать такие значимые компетенции, которые позволят ему с учетом реалий конкурентной рыночной среды и информационного противоборства наиболее эффективно осуществлять профессиональную деятельность.

Актуальность проблемы развития культуры информационно-психологической безопасности специалиста по защите информации в правоохранительной сфере отражается в нормативных документах об образовании. Так, согласно новым требованиям к результатам освоения основных образовательных программ, отраженных в государственных образовательных стандартах нового поколения, современный специалист по защите информации в правоохранительной сфере должен владеть технологиями противодействия деструктивным и негативным информационно-психологическим воздействиям. Область профессиональной деятельности специалистов включает решение задач по обеспечению безопасности информационных технологий в правоохранительной сфере, информационно-аналитическому и информационно-психологическому обеспечению правоохранительной деятельности в условиях существования угроз в информационной сфере [2].

В настоящее время прилагаются определенные усилия в решении обозначенных задач в педагогической науке и практике. Однако проблема остается острой, так как попытки носят преимущественно технологический характер, поскольку предпринимаются в контексте обучения студентов вуза технологиям защиты от негативного информационного воздействия. Между тем, вместе с культурными социально-информационными трансформациями должна меняться и культура выпускников вуза, неотъемлемой частью которой является культура информационно-психологической безопасности.

В процессе изучения различных подходов к определению безопасности (Д.А. Александров, Я.В. Бузанова, Ю.Н. Дерюгин, Н.Н. Рыбалкин, А.А. Тер-Акопов, В.И. Ярочкин и др.), информационной безопасности (Л.В. Астахова, А.И. Алексенцев, М.Д. Левашов, Е. Чернов и др.), психологической безопасности (И.А. Баева, М.Р. Душкина, М.А. Куртышева, Т.И. Колесникова, Л.А. Михайлов, Т.В. Маликова, В.П. Соломина, О.В. Шатровой и др.), информационно-психологической безопасности (А.В. Брушлинский, Г.В. Грачев, Е.Л. Доценко, С.Г. Кара-Мурза, В.В. Лепский, Т.А. Малых, И.Н. Панарин, С.Ю. Решетникова, Д.С. Синицын, Г.Л. Смолян, А.В. Федоров, Т.В. Харлампьева) нами были выявлены наиболее важные моменты, которые позволили сформулировать понятие информационно-психологической безопасности личности как состояние субъекта информационного взаимодействия, при котором он защищен от негативных информационно-психологических воздействий (осознает себя объектом воздействия, способен выявить угрозы информационно-психологической безопасности, владеет технологиями защиты от них), а также безопасно преобразует информационную среду (осознает себя воз-

можным субъектом негативного информационно-психологического воздействия, защищает других субъектов, создает, формирует информационное пространство, согласно принципам безопасной информационной среды).

Современная педагогическая наука в последние годы обогатилась многими теоретическими исследованиями в области культуры безопасности. И.А. Баева, И.М. Быховская А.П. Еперин, Ю.А. Каташова, Ф. Карамзинов В.Н. Кузнецов, В.Н. Мошкин, Н. Ниджеп, О.Н. Русак, В.В. Чебан рассматривают различные аспекты культуры безопасности. Однако в представленных работах культура информационно-психологической безопасности как специфический компонент культуры безопасности рассмотрен недостаточно: обозначаются вопросы актуаль-ности информационного воздействия на психологической здоровье чело-века, мировоззренческая, нравственная, психологическая готовность к безопасной жизнедеятельности, но понятие культура информационно-психологической безопасности не формулируется.

Культурологический подход к информационной безопасности рассматривается в педагогике через формирование информационной куль-туры личности (А.М. Атаян, О.В. Артюшкин, Л.В. Астахова, Н.И. Гендина, А.В. Петрущенкова и др.) и формирование культуры информационной безопасности личности (Л.В. Астахова, В.П. Лось, А.А. Малюк, В.В. Мельникови др.). В исследованиях, посвященных вопросам формиро-вания информационной культуры в процессе вузовской подготовки сту-дента, неосвещенными остаются проблемы формирования качеств лич-ности, способностей, обеспечивающих именно информационно-психоло-гическую безопасность, вопросы специфики негативного информационно-психологического воздействия. В рамках развития культуры информаци-онной безопасности личности информационно-психологическая безопас-ность рассматривается либо в контексте защиты информации от субъектов информационных отношений, либо – умения распознавания негативных информационных воздействий.

На основе сформулированного Л.В. Астаховой понятия «культура информационной безопасности» [1], опираясь на системный подход, функционально-деятельностный подход к культуре, системно-деятельностное видение личности, деятельностный и культурологический подходы к проблемам безопасности, мы определяем культуру информационно-психологической безопасности как способ организации и развития жизнедеятельности субъекта информационного взаимодействия, представленный системой личностных духовно-нравственных ценностных ориентаций в информационной сфере, при котором субъект, с одной стороны, способен защитить себя как объекта негативного информационного воздействия, а с другой, – не способен целенаправленно оказывать негативные информа-ционный воздействия на других субъектов информационных отношений. Особенность уточненного понятия заключается в использовании

функцио-нально-деятельностного подхода, позволившего выделить условия безо-пасного функционирования субъекта в информационной среде как объекта и субъекта информационных воздействий.

Целостность и системность процесса развития культуры информационно-психологической безопасности будущего специалиста по защите информации в правоохранительной сфере мы отразили с помощью метода моделирования. Разработанная структурно-содержательная модель развития культуры информационно-психологической безопасности отражает концептуальную основу, содержание и методическую составляющую рассматриваемого процесса, позволяет спрогнозировать данный процесс, наметить стратегию и тактику дальнейших действий. Особенность данной модели заключается в том, что она отражает процесс с точки зрения двух основных функциональных компонентов культуры информационно-психологической безопасности (защитного и преобразующего). Научно-теоретическую основу модели составляют принципы системного подхода, единство деятельностного, личностного и полисубъектного подходов, культурологического, цивилизационного, аксиологического и психо-семантического подходов.

Таким образом, в теории и практике профессиональной деятельности специалиста по защите информации в правоохранительной сфере остро стоит проблема обеспечения информационно-психологической безопасности. Несмотря на то, что вуз является одним из главных субъектов данного обеспечения, мы видим, что в теории и методике профессионального образования отсутствует комплексный подход к решению данного вопроса.

Теоретический анализ существующих направлений разрешения данной проблемы позволил нам сформулировать понятие «культура информационно-психологической безопасности личности», разработать модель развития культуры информационно-психологической безопасности, реализация которой позволит обеспечить необходимое качество подготовки студентов, будущих специалистов по защите информации в правоохранительной сфере с учётом уровня развития современных информационных и коммуникационных технологий, реалий конкурентной рыночной среды и информационного противоборства.

Библиографический список

1. Астахова, Л.В. Сущность понятия «Культура информационно-психологической безопасности» и ее формирование у студентов ВУЗА / Л.В. Астахова // Экономика. Информатика. Безопасность: сборник научных трудов региональной научно-практической конференции, 29 апреля 2006 г. / редколлегия: В.А. Киселева (гл. ред.) и др. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 93 – 99.

2. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки (специальности) «090915 Безопасность информационных технологий в правоохранительной сфере» (квалификация (степень) «специалист») (утв. приказом Министерства образования и науки РФ от 1 февраля 2011 г. N 132) [Электронный ресурс].

К содержанию

УДК 537.86 + 537.874.7 + 621.371

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЛОКАЛИЗАЦИИ И ОСЛАБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКИ

И.С. Антясов, А.Н. Соколов

Исследованы принципы локализации и ослабления электромагнитных волн в замкнутом пространстве альтернативной измерительной площадки (АИП) для проведения специальных исследований технических средств. Локализация электромагнитных волн внутри АИП достигается путем ее экранирования, а ослабление реализуется в три этапа – путем экранирования, радиопоглощения и применения радиочастотных фильтров. Проанализированы особенности экранирования для создания целостного контура защиты от индустриальных электромагнитных излучений. Выполнен расчет глубины проникновения электромагнитного поля в материал экрана, эквивалентной толщины сетчатого материала и эффективности экранирования выбранного сетчатого материала в диапазоне частот. Проведен обзор радиопоглощающих материалов с учетом их преимуществ и недостатков. Показано, что предпочтительнее использовать композитные радиопоглощающие материалы, так как они более широкополосные и имеют меньшую массу и габариты.

Ключевые слова: альтернативная измерительная площадка (АИП); канал утечки информации; коэффициент стоячей волны (КСВ), побочные электромагнитные излучения и наводки (ПЭМИН); радиопоглощение; радиопоглощающий материал (РПМ); специальные исследования (СИ); индустриальные помехи; экранирование; экран; электромагнитная волна.

В процессе проведения специальных исследований (СИ), – при выявлении возможных технических каналов утечки защищаемой информации, используются так называемые альтернативные измерительные площадки (АИП). Основными характеристиками АИП являются эффективности экранирования и поглощения. Экранирование порождает проблему стоячих волн внутри АИП, препятствующих проведению измерений. Тем не менее, при недостаточном экранировании внешние индустриальные помехи затрудняют проведение СИ. Поэтому при построении АИП актуальной является проблема выбора экранирующих и поглощающих материалов [1].

Под экранированием понимают локализацию электромагнитной энергии в определенном пространстве за счет ограничения распро-странения ее всеми возможными способами [2]. В понятие экрана могут входить как детали механической конструкции, так и электромеханические детали фильтрующих цепей и развязывающих ячеек: только их совместное действие приводит к ожидаемому результату. В связи с этим, мероприятия по ослаблению побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) можно разделить на три этапа: экранирование, радиопоглощение и применение радиочастотных фильтров [3].

1. Локализация и ослабление электромагнитных волн внутри АИП путем ее экранирования. Поскольку в большинстве случаев при измерениях приходится иметь дело с переменными (может быть, слабо флуктуирующими) полями, достаточным при построении АИП является применение электромагнитного экранирования.

С точки зрения волновых представлений эффект экранирования проявляется из-за многократного отражения электромагнитных волн от поверхности экрана и затухания энергии волн в его металлической толще [4]. Энергия отраженной волны тем больше, чем больше разница волновых сопротивлений граничащих сред.

В металле электромагнитная волна затухает по экспоненциальному закону. Мерой скорости этого процесса является глубина проникновения волны или толщина поверхностного слоя δ. При прохождении волны через толщину поверхностного слоя δ она ослабевает в e раз. Если же толщина будет равной d, она будет ослабевать в $e^{d/\delta}$ раз. Эффективность поглощения при этом определяется выражением

$$Э_{погл} = 16{,}7\ d\ \sqrt{\frac{\mu_r f}{\rho}}, (дБ) \qquad (1)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость материала экрана, ρ – его удельное сопротивление [Ом·м], f – частота [МГц].

Из (1) видно, что чем выше частота и толще экран, тем больше величина экранного затухания за счет поглощения.

Эффективность отражения по амплитуде для экрана с относительной магнитной проницаемостью μ_r составляет:

$$Э_{отр} = 5{,}5 + 10\ lg\ \frac{Z_0}{f\mu_r}, (дБ) \qquad (2)$$

где Z_0 – волновое сопротивление пространства, в котором распространяется волна [Ом].

Из (2) видно, что эффективность отражения уменьшается с увеличением частоты. Из формул (1) и (2) также следует, что экранирование за счет отражения преобладает на низких частотах, а за счет поглощения – на высоких частотах.

Для решения задачи эффективного экранирования и поглощения в заданном диапазоне (от 30 МГц до 2000 МГц) используется два экрана. Внешний экран применен с целью максимального экранирования (для отражения посторонних ЭМИ), а внутренний – с целью максимального поглощения (для успешного выполнения норм по затуханию).

Для обеспечения надежного экранирования необходимо обеспечить хороший электрический контакт по швам в местах соединений. Длина щелей при этом не должна превосходить 0,01 – 0,001 длины волны [3]. Использование листового материала при этом крайне неудобно, так как тяжело обеспечить целостность контура экрана в местах стыковки и изгибов металлических листов. Более практичными с технологической точки зрения являются сетчатые материалы.

Глубина проникновения ЭМП в материал экрана в [4, с.42] определена выражением:

$$\delta = 0{,}52\sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}. \text{(дБ)} \qquad (3)$$

На рис. 1 представлена зависимость глубины проникновения ЭМП от частоты для стального экрана с $\mu_r = 150$, $\rho = 1{,}5 \cdot 10^{-7}$ *Ом·м*. Из рисунка видно, что с ростом частоты глубина проникновения ЭМП резко падает.

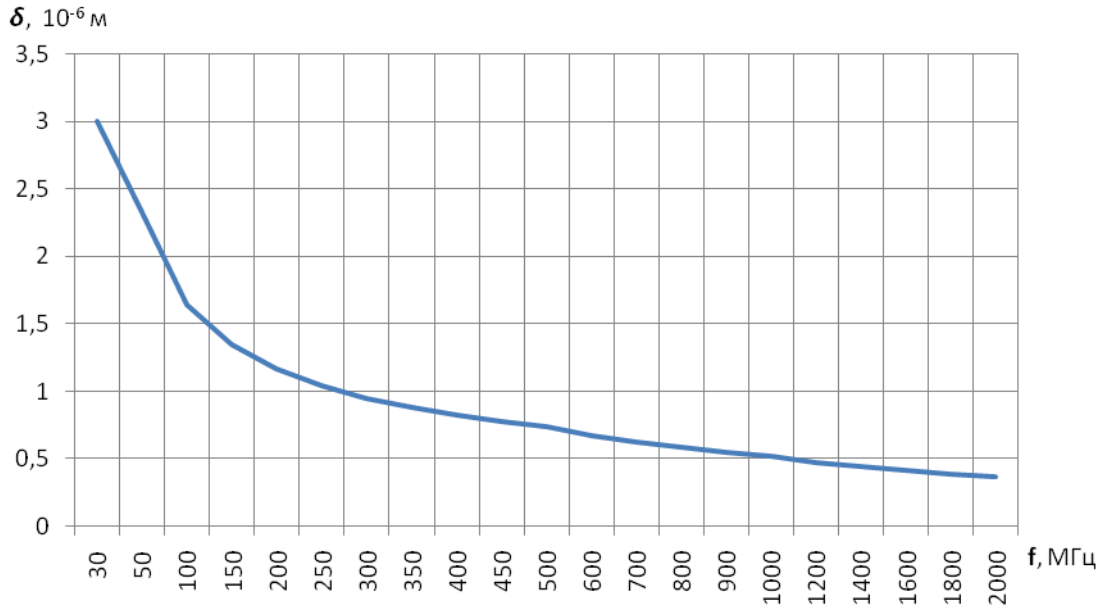


Рис. 1. Глубина проникновения электромагнитного поля в материал экрана

Для электрически толстого экрана, его толщина d должна быть больше глубины проникновения: $d > \delta$. Поэтому, с учетом рассматриваемого диапазона частот возможно использование распространенной стальной сетки (рис. 2) с радиусом проволоки 0,05 мм и шагом сетки 1 мм.

Эквивалентная толщина $d_э$ сетчатого экрана в [4, с.56] определена формулой:

$$d_э = \pi r_s^2 / s, \quad (4)$$

где s – шаг сетки (размер ячеек), r_s – радиус проволоки.

На рис. 2 представлена зависимость от размера ячеек эквивалентной толщины сетки с радиусом проволоки 0,05 мм.

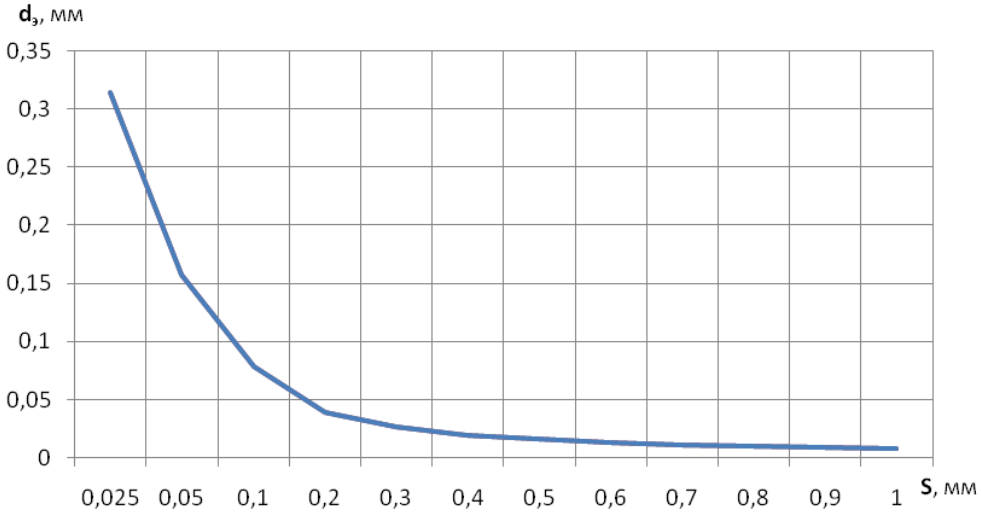


Рис. 2. Эквивалентная толщина сетчатого материала

Эффективность экранирования сетки в зависимости от частоты в [4, с. 140] определена формулой:

$$Э_{пл} = (d_э \frac{Z_0}{p})^{1/2} (\frac{\lambda}{R_э})^{1/3} (1 - \pi \frac{m}{\lambda})^6 \exp(\frac{\pi d_s}{S - d_s}), \quad (5)$$

где Z_0 – волновое сопротивление пространства распространения волны [Ом]; m – наибольший размер технологических отверстий – щелей [м]; $R_э$ – эквивалентный радиус экрана [м]; d_s – диаметр провода сетки [м].

На рис. 3 представлена эффективность экранирования сетки с радиусом проволоки 0,05 мм и шагом 1 мм в диапазоне частот.

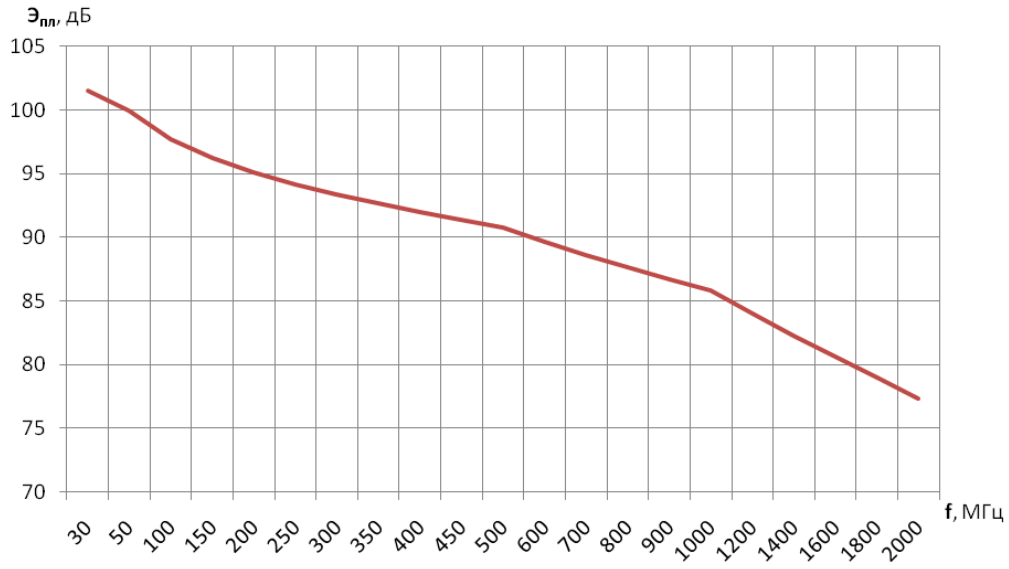


Рис. 3. Эффективность экранирования стальной сетки

Лучшими экранирующими свойствами обладают материалы с меньшим поверхностным сопротивлением, такие как медь, латунь, серебро. Но они, как правило, имеют высокую себестоимость.

Количество границ разделов существенно увеличивает эффективность отражения. Поэтому оптимально использовать два стальных, разнесенных в пространстве экрана, чем один медный. Эффект экранирования при этом будет выше, а себестоимость примерно в три раза меньше. Поскольку коррозия может существенно снизить эффективность экранирования, экраны дополнительно покрывают антикоррозийным лаком.

2. Ослабление электромагнитных волн внутри АИП путем применения РПМ. При оснащении помещения АИП необходимо обеспечивать радиопоглощение электромагнитных волн с целью минимизации стоячих волн, возникающих в следствие переотражений от стен экрана.

Для уменьшения КСВ используются особые РПМ. В состав РПМ входят неметаллическая (обычно полимерная или керамическая) матрица и мелкодисперсные порошкообразные или дискретные волокнистые проводящие наполнители (или их сочетание). При взаимодействии электромагнитного излучения с РПМ происходят одновременные процессы поглощения (обусловливающие тепловые потери), рассеяния (вследствие структурной и геометрической неоднородности материала) и интерференции радиоволн.

РПМ имеют несколько типов классификаций:

– по рецептурному составу: немагнитные диэлектрические (в качестве поглощающего наполнителя используются проводящие частицы и волокна на основе модификаций углерода (сажа, графит и др.) и немагнитные металлы (алюминий, медь и др.)), магнитодиэлектрические (мелкодисперсные порошки железа, никеля, кобальта, ферритов в диэлектрической полимерной матрице) и магнитные (ферритовые) материалы;

– по эффективному рабочему частотному диапазону, определяемого обычно коэффициентом отражения электромагнитных волн: широкодиапазонные и частотнонастроенные (или резонансные);

– по структурному признаку: однослойные, интерференционные, градиентные и комбинированные РПМ. Однослойные РПМ, имеющие однородную по толщине структуру и обладающие диэлектрическими и магнитными свойствами, являются узкодиапазонными и обеспечивают эффективное поглощение электромагнитного излучения при толщине, равной четверти длины волны. В интерференционных РПМ, представляющих собой чередование диэлектрических и проводящих слоев, уменьшение уровня отражённого сигнала достигается за счёт противофазного сложения волн, отразившихся от металлической поверхности объекта, диэлектрических прослоек и электропроводящих слоев. Градиентные РПМ – многослойные структуры с плавным или ступенчатым изменением по толщине комплексной диэлектрической (или магнитной) проницаемости. Разновидность РПМ градиентного типа – материалы с геометрическими неоднород-

ностями, имеющие рельеф поверхности в виде пирамид, конусов, трубок, шипов, гофров и т.п., уменьшение коэффициента отражения от которых достигается в результате многократного отражения волны от поверхностных неоднородностей и поглощения энергии при каждом отражении [5].

В РПМ со сложной структурой материалу придается структура или форма, увеличивающая его активную поверхность, обращенную к излучению. Материал делается волокнистым или пористым, со сложной, покрытой пирамидами (рис. 4) или конусами, поверхностью. Падая на такую поверхность, электромагнитная волна многократно отражается и теряет значительно больше энергии, чем при падении на ровную поверхность. Подобного эффекта добиваются, когда слои поглощаемого материала (активированный уголь, сажа, порошок карбонильного железа и т.п.) располагают в порядке возрастания их плотности по мере удаления от внешней поверхности экрана, т.е. при постепенном увеличении концентрации проводящих добавок по мере удаления от поверхности материала. Угол наклона граней пирамиды подбирается таким образом, чтобы максимально уменьшить энергию отраженного сигнала. Экспериментально было обнаружено, что оптимальным является угол около $12{,}5^0$.

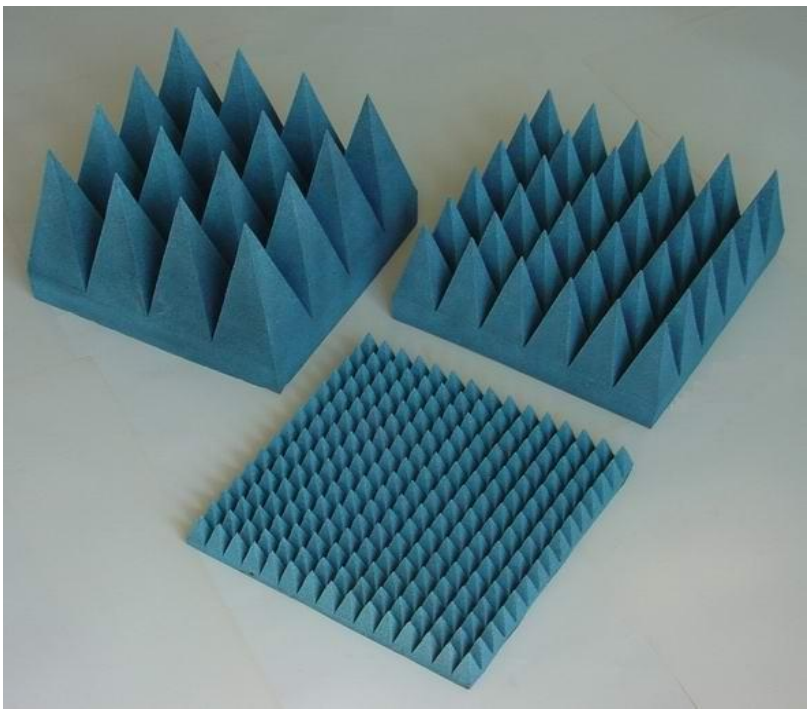


Рис. 4. РПМ пирамидального типа

РПМ со сложно структурой имеют ряд существенных недостатков: они имеют значительные габариты и вес (толщина пропорциональна длине волны), высокую стоимость, неудобство при сборке. Для необходимого нам диапазона частот средняя толщина РПМ пирамидального типа составляет 50 см, что существенно уменьшает полезный объем АИП. Тем не менее, несмотря на перечисленные недостатки, РПМ со сложной геометриче-

ской формой крайне эффективны для узкого диапазона частот, поэтому без их использования в некоторых помещениях невозможно выполнить требования нормативно-технической документации.

Более эффективное поглощение можно реализовать за счет свойств самих материалов (со значениями тангенса угла потерь, большими 1). Это уменьшает общую толщину РПМ. Экраны, выполненные из таких материалов, поглощают электромагнитную энергию в широком диапазоне частот и являются более широкополосными по сравнению с поглотителями резонансного типа, использующими четвертьволновое согласование или специфические особенности материала.

Отдельно можно выделить РПМ на основе бетона. Данные материалы выполнены на основе магнезиально-шунгитовой сухой штукатурной смеси. Их основные достоинства – высокая прочность, огнестойкость, ремонтопригодность. Но РПМ на основе бетона утолщают пол, потолок и стены, как минимум, на 50 см, а возведение таких конструкций обходится довольно дорого.

К наиболее перспективным можно отнести композитные РПМ. Их можно классифицировать по способу получения: спекание смеси порошков, приводящее к синтезу металлокерамики или керметов, и смешение неорганической части со смолами, парафинами, пластмассами. Данные материалы, обладая уникальным составом, при незначительной толщине (порядка нескольких сантиметров) позволяют достичь эффективного поглощения электромагнитной волны в широком диапазоне частот.

3. Ослабление электромагнитных волн внутри АИП путем фильтрации сетей питания. Для целей ослабления индустриальных радиопомех используются сетевые помехоподавляющие фильтры, которые обеспечивают защиту электросетей. Основное значение фильтров – пропускать без значительного ослабления сигналы с частотами, лежащими в рабочей полосе, и подавлять сигналы за пределами полосы. Применение помехоподавляющих элементов позволяет минимизировать или полностью устранить паразитные генерации и побочные излучения, снизить восприимчивость аппаратуры к внешним электромагнитным полям и импульсным сигналам, устранить возможные каналы утечки информации. Чаще всего подобные фильтры представляют собой *n*-звенные пассивные *LC*-фильтры, выполненные в герметичных металлических корпусах [6].

В качестве фильтра, используемого для подавления индустриальных помех, распространяющихся по питающей сети, на вход электропитания помещения устанавливается сетевой фильтр «ФСПК-40» или аналогичный с вносимым затуханием не менее 60 дБ в требуемом диапазоне частот. Он предназначен для защиты информации от утечки по однофазным двухпроводным сетям электропитания и подавления напряжений внешних помех питающей сети. Для эффективной работы помехоподавляющих фильтров необходимо предусмотреть их качественное заземление.

Библиографический список

1. Антясов, И.С. Особенности валидации альтернативной измерительной площадки для проведения специальных исследований технических средств / И.С. Антясов, Н.И. Войтович, А.Н. Соколов // Вестник УрФО. Безопасность в информационной сфере. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2014. – № 1(11). – С. 10–15.

2. Богуш, В.А. Электромагнитные излучения, методы и средства защиты / В.А. Богуш, Т.В. Борботько, А.В. Гусинский. – Мн.: Бестпринт, 2003. – 406 с.

3. Петров, И.С. Локализация и ослабление побочных электромагнитных излучений от средств вычислительной техники путем экранирования электромагнитных волн / И.С. Петров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 23. – С. 189–191.

4. Полонский, Н.Б. Конструирование электромагнитных экранов для радиоэлектронной аппаратуры / Н.Б. Полонский. – М.: Сов. радио, 1979. – 216 с.

5. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищев. – М.: Большая Российская Энциклопедия. – 1994. – Т. 1. – 736 с.

6. Зайцев, А.П. Технические средства и методы защиты информации / А.П. Зайцев, А.А. Шелупанов. – М.: Машиностроение, 2009. – 507 с.

К содержанию

УДК 621.396.663

СПОСОБ КОМПЕНСАЦИИ НЕИДЕНТИЧНОСТЕЙ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛОВ ПРИЁМНИКА В МАЛОГАБАРИТНЫХ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ФАЗОВЫХ РАДИОПЕЛЕНГАТОРАХ

И.И. Заляцкая

В статье представлен один из способов компенсации неидентичности фазовой характеристики каналов приёма в малогабаритных широкодиапазонных фазовых пеленгаторах, которой позволяет автоматически избавиться от паразитных фазовых набегов без применения дополнительных пеленгационных антенных элементов и каналов приёма.

Ключевые слова: неидентичность каналов приёма, фазовый пеленгатор.

Введение

Сегодня задача вычисления углового направления на источники радиоизлучения (ИРИ) в широком частотном диапазоне от сотен мегагерц до десятков гигагерц актуальна при разработке систем радиолокации, радионавигации, радиомониторинга, радиотехнической разведке [1–3].

Однако решение данной задачи осложнено наличием следующих обстоятельств.

Во-первых, при вычислении пеленга ИРИ в частотном диапазоне от сотен мегагерц до десятков гигагерц характеристики антенн, СВЧ-трактов, приёмников фазовых пеленгаторов неконтролируемо меняются в широких пределах, что порождает неидентичность характеристик каналов интерферометра и приводит к значительным ошибкам в определении пеленга ИРИ.

Во-вторых, из-за широкого диапазона частот радиосигналов излучаемых ИРИ их длины волн меняются от единиц сантиметров до нескольких метров, что не позволяет на объектах ограниченного размера разместить антенную систему фазового пеленгатора с достаточно большим числом баз необходимого электрического размера [4]. Поэтому задача уменьшения количества пеленгационных антенных элементов, и соответственно, количества приёмных СВЧ-трактов стоит достаточно остро.

Существуют системы компенсации неидентичностей характеристик каналов приёма, основанные на вычислении калибровочных коэффициентов.

Например, в радиопеленгаторе [5] осуществляет компенсацию неидентичности фазовых характеристик приемных каналов за счет использования гармоничного калибровочного сигнала, формируемого калибровочным генератором. Формируется калибровочная таблица фазовых сдвигов, значения которых используются для компенсации неидентичности фазовых характеристик. В этом методе необходимо достаточно точно вычислять частоту ИРИ, иначе вычисленные калибровочные значения не позволят компенсировать паразитные фазовые набеги, обусловленные неидентичностью фазовых характеристик каналов приёмника пеленгатора.

В фазовом радиопеленгаторе [6] для устранения неидентичности фазовых характеристик приемных каналов организовано два канала приёма – сигнальный и опорный, посредством которых проводится измерение калибровочных значений. В этом случае увеличивается сложность устройства, обусловленная введением дополнительного антенного элемента и дополнительного приемного тракта.

Общим недостатком пеленгаторов с компенсацией неидентичностей фазовых характеристик каналов с применением калибровочных значений является сложность в эксплуатации, т.к. при замене элементов приёмника необходимо проводить повторное вычисление калибровочных коэффициентов.

1. Постановка задачи

При разработке современных широкополосных малогабаритных радиопеленгаторов необходимо учитывать следующие моменты:

– в составе радиопеленгатора должен присутствовать автоматический универсальный блок устранения неидентичности фазовых характеристик каналов приёмника, не требующий проведения процедуры калибровки;

– необходимо исключить значительное усложнение конструкции и увеличение массогабаритных характеристик пеленгатора;

– радиопеленгатор должен корректно работать в широком диапазоне частот.

2. Устройство устранения неидентичности фазовых характеристик каналов приёмника

Для решения поставленной задачи автором под руководством д.т.н., проф. Ю.Т. Карманова было разработано устройство устранения неидентичности фазовых характеристик каналов приёмника в фазовых радиопеленгаторах.

2.1. Структурная схема устройства

Рассмотрим простейший вариант построения пеленгатора, в котором производится автоматическое устранение паразитных фазовых набегов, без применения дополнительного антенного элемента (АЭ) (рис. 1). Такой пеленгатор содержит:

– два пеленгационных АЭ, разнесенных на известное расстояние d, называемое базой пеленгатора;

– переключающую матрицу 2Х2;

– усилители принятого радиосигнала;

– фазовый детектор;

– блок, где проводится компенсация неидентичности фазовой характеристики каналов приемника;

– блок вычисления пеленга ИРИ.

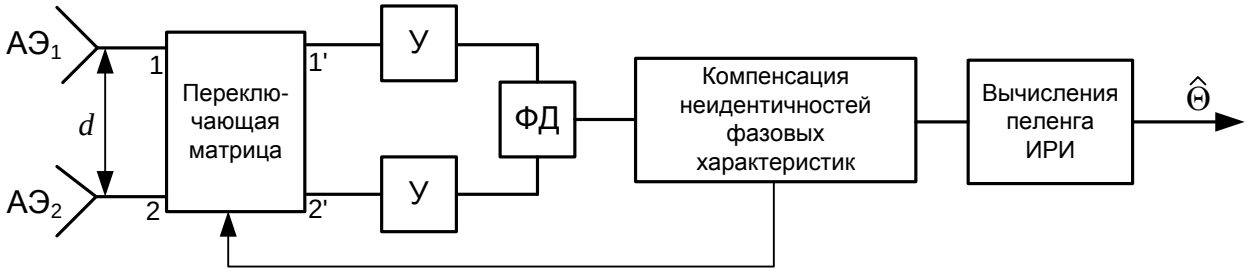


Рис. 1. Структурная схема пеленгатора с устранением неидентичности фазовых характеристик каналов приёмных СВЧ-трактов:
АЭ – антенный элемент, У – усилитель, ФД – фазовый детектор,
$\widehat{\Theta}$ – оценка пеленга на ИРИ

2.2. Описание алгоритма работы устройства

Обработка принимаемого сигнала проходит в два этапа

На первом этапе пеленгационные АЭ принимают сигнал ИРИ с частотой f_c. Положение переключателей переключающей матрицей установлено таким образом, что вход 1 соединен с выходом 1’, а вход 2 соединен с выходом 2’.

Проходя через усилители, полученный сигнал поступает на фазовый детектор (ФД). ФД выделяет разность фаз сигналов, принятых пеленгационными антенными элементами:

$$\Delta\varphi_{12} = 2\pi\frac{d}{\lambda}sin\Theta_{и} + \Psi_1 - \Psi_2 \quad (1)$$

где $\Delta\varphi_{12}$ – разность фазы сигналов принятых пеленгационными антенными элементами, вычисленная на первом этапе;

d – расстояние между пеленгационными антенными элементами 1 и 2;

Ψ_i – паразитный фазовый набег i-ого антенного элемента, i=1,2.

В блоке компенсации неидентичности характеристик каналов приёмника сохраняется полученное значение $\Delta\varphi_{12}$ и на переключающую матрицу подается управляющий сигнал для изменения состояния переключателей. Положение переключателей устанавливается таким образом, что вход 1 соединен с выходом 2’, а вход 2 соединен с выходом 1’.

На втором этапе сигнал ИРИ с частотой f_c также принимается пеленгационными антенными элементами. Проходя через усилители, полученный сигнал поступает на фазовый детектор. Фазовый детектор выделяет разность фаз сигналов, принятых пеленгационными антенными элементами, но значения паразитных фазовых набегов придут уже с противоположным знаком:

$$\Delta\varphi_{21} = 2\pi\frac{d}{\lambda}sin\Theta_{и} + \Psi_2 - \Psi_1 \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_{21}$ – разность фазы сигналов принятых пеленгационными АЭ 1 и 2, вычисленная на втором этапе.

В блоке компенсации неидентичности фазовых характеристик каналов приемника сохраняется полученное значение $\Delta\varphi_{12}$ и производится процедура компенсации паразитных фазовых набегов по формуле (3):

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi_{12}+\Delta\varphi_{21}}{2} = \frac{2\pi\frac{d}{\lambda}sin\Theta_{и}+\Psi_1-\Psi_2+2\pi\frac{d}{\lambda}sin\Theta_{и}+\Psi_2-\Psi_1}{2} = 2\pi\frac{d}{\lambda}sin\Theta_{и} \quad (3)$$

На основании полученного скорректированного значения разности фаз вычисляется оценка на пеленг ИРИ, в простейшем варианте по формуле (4):

$$\widehat{\Theta}_{и} = \arccos\frac{\Delta\varphi\lambda}{2\pi l}. \quad (4)$$

Заключение

Описанное устройство может быть использовано при построении фазовых систем определения угловых координат, принцип действия которых основан на определении фазового сдвига между радиосигналами от двух пеленгационных антенн.

Данный подход имеет ряд преимуществ:

1) возрастает точность вычисления пеленга на ИРИ за счет устранения паразитных фазовых набегов Ψ;

2) компенсация Ψ происходит автоматически и не требует заблаговременного вычисления калибровочных значений;

3) обеспечивает работу в широком диапазоне радиочастот.

Кроме того, данный подход может применяться в системах радиопеленгации с многобазовыми антенными решетками.

Библиографический список

1. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы и средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М: Горячая линяя – Телеком, 2006. – 492 с.

2. Золотарёв, И.Д. Фазовые пеленгаторы в условиях радиоэлектронной борьбы / И.Д. Золотарёв, В.А. Березовский // Омский научный вестник. – 2009. – Т. 83. – № 3. – С. 264–268.

3. Анализ современного состояния и перспективы развития теории и техники антенн, используемых в комплексах радиомониторинга и радиопеленгации / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, А.В. Негробов, Ю.Г. Пастернак, Ю.А. Рембовский // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – № 9. – С. 93–102.

4. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – № 2 (24), ч. 1. – С. 7–15.

5. Денисов В.П. Фазовые радиопеленгаторы / В.П. Денисов, Д.В. Дубинин. – Томск: ТУСУР, 2002. – 251 с.

6. Пат. 2005140529 Российская Федерация, МПК G 01 S 3/48. Фазовый радиопеленгатор / В.И. Дикарев, В.В. Журкович, В.Г. Сергеева, Л.В. Рыбкин. – № 2005140529/09; заявл. 15.12.2005; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20.

7. Пат. 2096797 Российская Федерация. Способ пеленгации радиосигналов и многоканальный пеленгатор / А.М. Рембовский, В.Н. Кондратенко; от 20 ноября 1997 г. с приоритетом от 4 июля 1996 г.

К содержанию

УДК 621.396.621.2 + 621.396

ГЕНЕРАТОР СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ФРАКТАЛЬНОГО СИГНАЛА ДЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

А.Н. Казимиров

Предложено решение актуальной задачи формирования сверхширокополосных сигналов с заданными свойствами. Получена модель генератора, сочетающего цифровой генератор фрактального сигнала и аналоговую часть, формирующую сигнал в определенном частотном диапазоне.

Ключевые слова: фрактальный сигнал, широкополосные радиосигналы, спектр с фрактальной структурой, размерность Хаусдорфа.

Предллагается решение актуальной задачи формирования широкополосных радиосигналов с заданными свойствами. Исследован генератор, сочетающий цифровой генератор фрактального сигнала и аналоговую часть, формирующую сигналы для передачи дискретных сообщений в определенном частотном диапазоне.

Исследование систем связи, использующих такие широкополосные сигналы, как хаотические и фрактальные, осуществляется на основе математических моделей соответствующих колебаний. При использовании известных моделей хаотических колебаний Лоренца, Рёсслера [1] или фрактальных сигналов на основе функций Вейерштрасса [2] с одной стороны эти модели хорошо изучены, но с другой отсутствуют физические генераторы этих колебаний. Ранее был описан и использован для моделирования генератор фрактального сигнала [3, 4]. Он достаточно прост для реализации в виде гибридного цифро-аналогового устройства и способен генерировать сигналы с изменяемыми свойствами. Варьируя параметры генератора можно получить различные значения размерности хаусдорфа и статистические характеристики колебаний. С практической точки зрения представляют интерес сигналы с одинаковой полосой частот и близкими величинами размерности хаусдорфа, а также другими характеристиками с точки зрения традиционных систем связи. Ввод информации будет осуществляться изменением параметров генератора, что отразиться на структуре выходного фрактального сигнала.

Напомним, что представляет собой генератор фрактального сигнала для передачи информации в радиотехнических системах связи [4] (рис. 1).

Это генератор фрактального сигнала с программируемыми свойствами, который содержит двоичный N – разрядный счетчик. В результате работы генератора формируется последовательность чисел с периодом повторения 2^N. Работает генератор следующим образом. Пусть каждый элемент

такого счетчика связан с двухполюсником, который может находиться в двух состояниях. Если в соответствующем разряде счетчика находится «0», то на выходе двухполюсника сигнал равен $b(1+x)$, где x – входной сигнал. Если в этом разряде находится «1», то на выходе двухполюсника сигнал равен $-a(1+x)$. Здесь «*a*» и «*b*» некоторые регулируемые параметры. Все двухполюсники связаны в цепочку, как показано на рисунке. На вход этой цепочки подается сигнал – $x_{вх} = \frac{b}{(1-b)}$. На выходе такой цепочки будет генерироваться сигнал, описываемый рекуррентным соотношением: $x_{2n} = b(1+x_n)$, $x_{2n+1} = -a(1+x_n)$. Здесь «n», – дискретное время, отсчитываемое счетчиком.

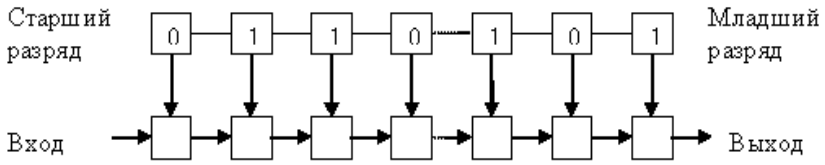


Рис. 1. Генератор фрактального сигнала

Описанный генератор выдает сигнал с известными характеристиками, в частности, величина размерности Хаусдорфа – *D*, генерируемой последовательности, вычисляется из простого соотношения: $a^D + b^D = 1$.

Сформировать сигналы для передачи «0» и «1» в дискретной линии связи предлагается следующим образом. Возьмем счетчик с разрядностью n=10, «0» будет соответствовать сигнал со следующими значениями параметров a=0,85 и b=0,55. При передаче «1» a=0,55 и b=0,85. При этом размерность Хаусдорфа *D* обоих сигналов одинакова и составляет 2,085 (для сравнения размерность Хаусдорфа в модели Лоренца *D*=2,06). На рис. 2, 3 показаны сигналы соответствующие «0» и «1».

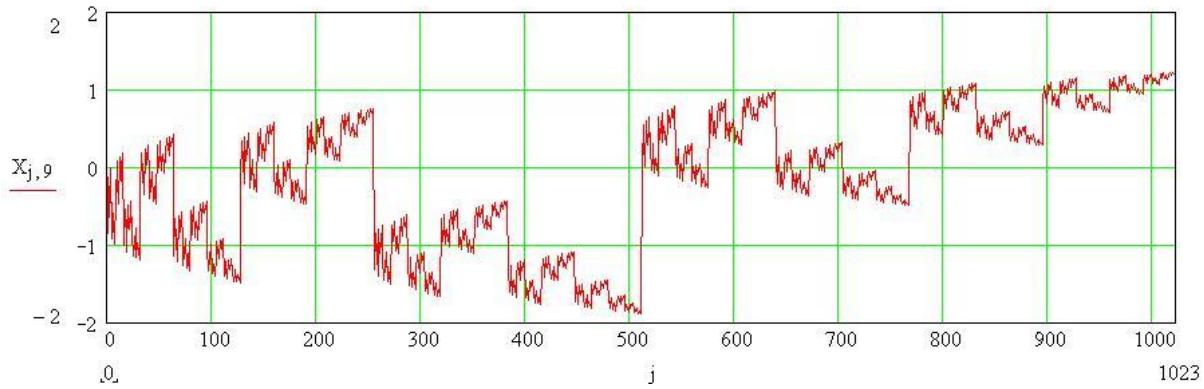


Рис. 2. Выходной фрактальный сигнал «0»

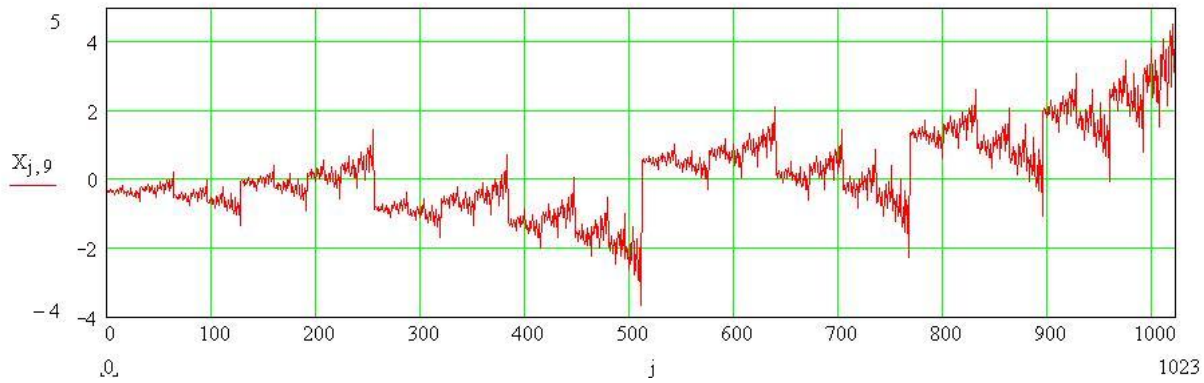


Рис. 3. Выходной фрактальный сигнал «1»

Затем значениями амплитуд выходного колебания осуществляется модуляция длительности прямоугольных импульсов следующих с постоянной частотой. Это необходимо, чтобы сформировать эффективный с энергетической точки зрения сигнал, передаваемый в радиоканал. Минимальная длительность импульса определяется частотными свойствами цифровых элементов. Дискретные широтно-модулированные сигналы (фрагменты), а также их спектры показаны соответственно на рис. 4. и рис. 5.

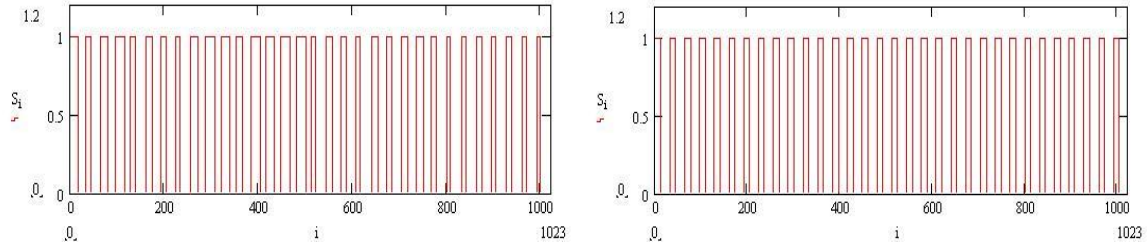


Рис. 4. Выходные дискретные широтно-модулированные сигналы 0 и 1

Спектры дискретных сигналов на одинаковых частотных интервалах имеют схожую фрактальную структуру (рис. 5 и рис. 6).

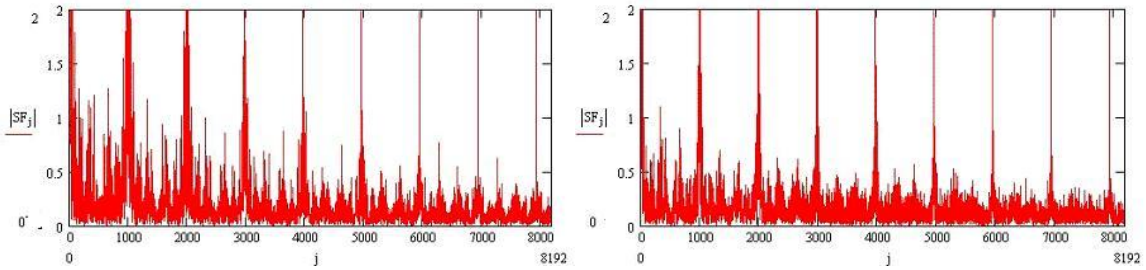


Рис. 5. Спектры дискретных сигналов соответствующих «0» и «1»

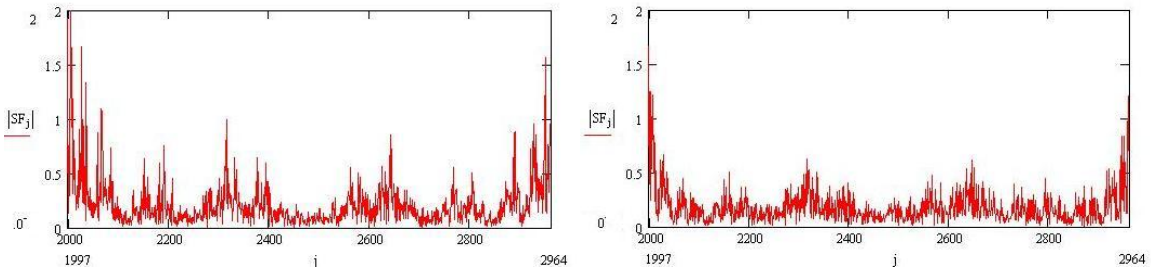


Рис. 6. Фрагменты спектров дискретных сигналов соответствующих 0 и 1

Выбор интервала частот со спектральными составляющими представляет самостоятельную задачу, в выбранных фрагментах спектр имеет фрактальную структуру (рис. 6). Выделить эти спектральные составляющие можно с помощью полосового фильтра из исходного дискретного сигнала. Сигнал на выходе фильтра будет аналоговым и как следует из номеров спектральных составляющих широкополосным (рис. 7).

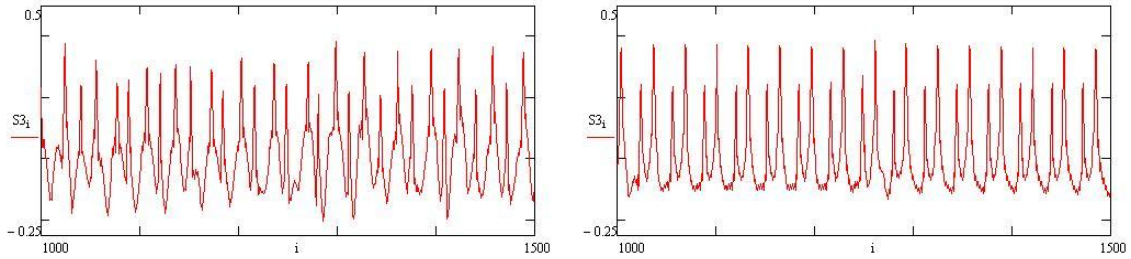


Рис. 7. Фрагменты сигналов соответствующих «0» и «1»

Такой сигнал уже может использоваться для передачи в радиоканал. Коэффициент корреляции сигналов соответствующих «0» и «1» равен 0,318.

Различение сигналов в приемнике производится на основе корреляционного метода. Интерес представляют некогерентные методы приема при различном уровне шумов, которые находятся в стадии исследования.

Библиографический список

1. Андреев, Ю.В. Сверхширокополосные сигналы для беспроводной связи / Ю.В. Андреев, А.С. Дмитриев и др. // Радиотехника. – 2008. – № 8. – С. 83–90.

2. Капранов, М.В. Сигналы с аддитивной фрактальной структурой для передачи информации / М.В. Капранов, А.В. Хандурин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2011. – №2, Т.16. – С. 23–36.

3. Казимиров, А.Н. Генератор фрактальных сигналов для широкополосных радиотехнических систем передачи информации / А.Н. Казимиров // В.Ф. Тележкин Доклады 14-й международной конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2012). – М., 2012. – С. 253–254.

4. Кузнецов, А.П. Генератор фрактального сигнала / А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов // Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18. – Вып. 24. – С. 19–21.

К содержанию

УДК 378.164/.169

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТСО ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СТУДЕНТОВ КАФЕДРЫ ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.Р. Комогорова

В статье рассмотрена возможность использования ТСО для обучения студентов, с целью повышения качества подготовки.

Ключевые слова: ТСО, учебное оборудование, эффективность ТСО.

Ускоряющийся процесс развития науки и техники требует от современных студентов большого объема знаний, умений и навыков. Сочетание традиционных методов обучения с приемами обучения, основанными на использовании технических средств обучения (ТСО), позволяет давать студентам в минимально целесообразный срок необходимый объем научных и практических знаний.

На современном этапе в высшей школе разнообразие ТСО все больше входит в учебный процесс, т.к. новые методы обучения – одно из следствий, и вместе с тем одно из проявлений прогресса в технике и технологии, обновления содержания обучения и обеспечения его высокой эффективности, а также улучшение условий работы преподавателей и студентов [1].

Применение ТСО интенсифицирует передачу информации (т.к. средства обучения являются непосредственными источниками знания); значительно расширяет иллюстративный материал, что обеспечивает осознанность и осмысленность воспринимаемой студентами информации; создает проблемные ситуации и организует поисковую деятельность студентов (т.е. процесс обучения идет через демонстрацию, самостоятельную работу и плавную преемственность знаний); усиливает эмоциональный фон обучения; формирует мотивацию у студентов.

Необходимость ТСО в процессе обучения обусловлена и значительным усложнением объектов обучения: невозможно продемонстрировать сложное техническое устройство, микросхему или технологический процесс только вербальными средствами и с помощью доски и мела. ТСО позволяют сделать видимым то, что невозможно увидеть невооруженным глазом, имитировать любые ситуации.

Поэтому в процессе обучения используются учебно-тренировочные устройства. Использование таких тренажеров в обучении основано на применении специально разработанных программ действий, составляемых на основе процесса моделирования осваиваемой деятельности, а так же определение степени усвоения учебного материала.

НПИ «Учебная техника и технологии» Южно-Уральского государственного университета, который ориентируется на сферу образования, разработал и произвел учебное оборудование – Лабораторный стенд «Ко-

дирование и модуляция информации в системах связи», предназначенный для изучения способов аналогового и цифрового приема в современных системах связи: аналоговый прием, цифровой когерентный/некогерентный, исследования влияния помех на качество работы цифровых и аналоговых приемных блоков с различными вариантами реализации приемника.

Общий вид лабораторного комплекса представлен на Рис. 1. Он состоит из лабораторной установки, на которой расположены передающий блок, приемный блок, блок индикации, источник помех, клавиатура, разъемы для подключения осциллографа [2].

Рис. 1. Общий вид лабораторного комплекса

Технические возможности стенда:

1. Выбор способа кодирования/ манипуляции и декодирования /демодуляции.
2. Ввод числа для кодирования с клавиатуры.
3. Генерация случайного числа (для ручного декодирования по осциллограмме).
4. Запуск передачи/приема в цикле.
5. Добавления шума переменного уровня в линию связи.
6. Непрерывное измерение мощности сигнала или помех на выходе линии связи в относительных единицах.
7. Индикация текущих способов кодирования/декодирования, передаваемого и принимаемого числа, текущее состояние передающего/ приемного блока, количество переданных/принятых байт или мощности сигнала на входе приемного блока.

8. Наличие гнезд для подключения осциллографа для контроля сигнала на входе и выходе линии связи.

Лабораторный стенд позволяет производить и изучить:

1. Бинарное кодирование: NRZ, NRZI, манчестер, дифференциальный манчестер.
2. Тринарное кодирование: RZ, AMI, HDB3, MLT-3, 4B/3T.
3. Тетрарное кодирование: 2B1Q.
4. Кодирование с использованием кодов замещения. 4B/5B.
5. Амплитудную модуляцию.
6. Частотную модуляцию.
7. Фазовую модуляцию.
8. Квадратурную модуляцию, QAM.
9. Влияние помех на различные виды кодирования/модуляции.

На современном этапе ТСО включены в ежедневную практику кафедры «Инфокоммуникационные технологии».

Приобретение данного лабораторного стенда для кафедры «Инфокоммуникационные технологии» позволит проводить лабораторные и практические занятия по следующим дисциплинам, реализуемым на основе федерального государственного образовательного стандарта третьего поколения (ФГОС) [3–6]:

1. Общая теория связи (практика – 36 часов, лабораторные работы – 36 часов) для направления 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы святи.
2. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей (практика – 18 часов, лабораторные работы – 18 часов) для направлений 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, 210400.62 Радиотехника.
3. Радиоприемные устройства РЭС (практика – 32 часов, лабораторные работы – 14 часов) для направления 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы святи.
4. Сети и системы мобильной связи (практика – 36 часов) для направления 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы святи.
5. Средства коммутации сигналов в системах мобильной связи (практика – 72 часов, лабораторные работы – 18 часов) для направления 210700.62 Инфокоммуникационные технологии и системы святи.
6. Радиотехнические цепи и сигналы (практика – 36 часов, лабораторные работы – 36 часов) для направления 210400 Радиотехника, специальности 210601.65 Радиоэлектронные системы и комплексы.
7. Основы теории радиосистем передачи информации (лабораторные работы – 18 часов) специальности 210601.65 Радиоэлектронные системы и комплексы.

8. Основы теории систем и комплексов радиоэлектронной борьбы (лабо-раторные работы – 18 часов) специальности 210601.65 Радиоэлектронные системы и комплексы.

9. Теория построения инфокоммуникационных сетей и систем (практика – 63 часа) для направления 210700.68 Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

Инженерный подход к этому стенду позволит учесть технические особенности процессов, моделировать задания, увеличить вариативность заданий и работ и эффективно трансформировать учебное пространство и время, а также оценить степень усвоения материала.

При совершенствовании самой системы образования, применение новых средств обучения свидетельствует о решении таких задач, как обновление содержания обучения, обеспечение его высокой эффективности и улучшения условий работы преподавателей и студентов [1].

Для обеспечения эффективного функционирования ТСО на кафедре «Инфокоммуникационные технологии» необходима современная материально-техническая обеспеченность, высококачественный дидактический материал, который реализуется с помощью соответствующих приборов, а также педагогически грамотная методика применения ТСО в учебном процессе, поэтому повышение эффективности использования ТСО в учеб-ном процессе лежит на руководителе учебного процесса и преподавателях кафедры.

Таким образом, для повышения качества обучения, в связи с технологизацией всех сфер общественной жизни, использование ТСО просто необходимо, поэтому руководители учебного процесса должны вносить организационную и координационную помощь и в деятельность по созданию дидактических материалов и в процесс повышения квалификации в рамках ТСО.

Библиографический список

1. Коджаспирова, Г.М. Технические средства обучения и методика их использования / Г.М. Коджаспирова, К.В. Петров. – М. Издательский центр «Академия», 2001. – 256 с.

2. ООО НПП «Учтех-Профи». Методические рекомендации по проведению лабораторных работ с использованием лабораторного стенда «Кодирование и модуляция информации в системах связи». – Челябинск, 2013.

3. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

4. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки 210400.62 «Радиотехника».

5. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по специальности 210601.65 «Радиоэлектронные системы и комплексы».

6. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению 210700.68 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

К содержанию

УДК 621.396.91/.96

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ DDS-СИНТЕЗАТОРОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЯХ МАЛЫХ РАССТОЯНИЙ

С.В. Поваляев

Рассмотрены особенности применения DDS-синтезаторов в СВЧ-формирователе зондирующих ЛЧМ-радиосигналов радиолокационного измерителя малых расстояний. Предложен способ повышения девиации частоты зондирующих ЛЧМ-радиосигналов на основе управления квадратурами DDS-синтезатора. Приведены результаты исследования побочных составляющих в спектре сигнала биений, обусловленных эффектами квантования амплитуды и фазы зондирующих ЛЧМ-радиосигналов, синтезированных по DDS-технологии.

Ключевые слова: малые расстояния; ЛЧМ-радиосигнал; DDS-технология; СВЧ-формирователь; сигнал биений.

Введение

Известно [1, 2], что существенное влияние на точность радиолокационного измерителя малых расстояний, реализующего частотный метод измерения расстояния, оказывает структура и параметры сверхвысокочастотного формирователя (СВЧ-формирователя) зондирующих линейно-частотно-модулированных радиосигналов (ЛЧМ-радиосигналов).

Для достижения высокой точности измерения малых расстояний СВЧ-формирователь должен обеспечивать высокую линейность закона изменения частоты и стабильность основных параметров (девиация частоты, период модуляции) зондирующих ЛЧМ-радиосигналов.

Аналоговые методы формирования СВЧ-радиосигналов не могут удовлетворить указанным требованиям без привлечения дополнительных методов коррекции нелинейности закона изменения частоты СВЧ-формирователя и поддержания стабильности параметров модуляции, что ведет к возрастанию стоимости радиолокационного измерителя, усложнению процессов его настройки и эксплуатации.

Интенсивное развитие современной элементной базы в значительной степени способствует широкому применению цифровых методов формирования СВЧ-радиосигналов с линейной частотной модуляцией [3]. Эти методы позволяют оперативно управлять основными параметрами модуляции, обеспечивают высокую стабильность и когерентность формируемых радиосигналов, а также хорошую повторяемость характеристик при серийном производстве.

Цифровой СВЧ-формирователь зондирующих ЛЧМ-радиосигналов в радиолокационном измерителе малых расстояний

Цифровые методы формирования ЛЧМ-радиосигналов в большинстве случаев основаны на использовании метода прямого цифрового синтеза частоты радиосигналов (DDS-технология). В соответствии с этим методом в определенные дискретные моменты времени производится формирование линейно меняющегося во времени цифрового кода, соответствующего амплитуде синтезируемого радиосигнала и преобразование этого кода с помощью цифро-аналогового преобразователя в аналоговую форму [4, 5]. Цифровые устройства, реализующие формирование радиосигналов по DDS-технологии, называют DDS-синтезаторами.

Анализ литературных источников показывает, что наиболее приемлемым методом формирования СВЧ-радиосигналов с линейной частотной модуляцией в радиолокационных измерителях малых расстояний является квадратурный перенос спектра низкочастотных ЛЧМ-радиосигналов, синтезированных по DDS-технологии, в область высоких частот с помощью квадратурного модулятора. Структурная схема СВЧ-формирователя зондирующих ЛЧМ-радиосигналов, реализующая данный метод, приведена на рис. 1.

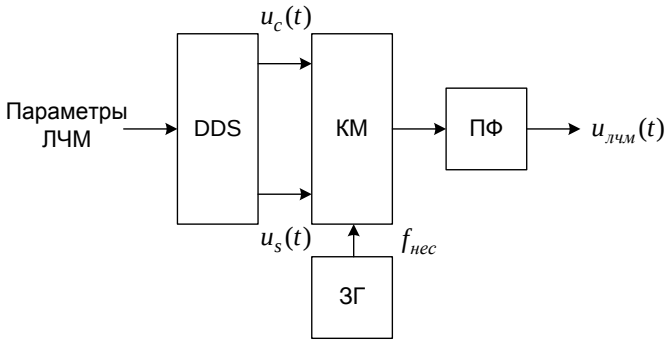


Рис. 1. Структурная схема СВЧ-формирователя зондирующих ЛЧМ-радиосигналов на основе квадратурного переноса спектра низкочастотных ЛЧМ-радиосигналов

В области низких частот DDS-синтезатор (DDS) формирует квадратурные ЛЧМ-радиосигналы, которые подаются на низкочастотные входы квадратурного модулятора (КМ). На высокочастотный вход квадратурного модулятора подается с задающего генератора (ЗГ) СВЧ-радиосигнал частотой $f_{нес}$. На выходе квадратурного модулятора формируется СВЧ-радиосигнал, частота которого изменяется по линейному закону. Полосовой фильтр (ПФ) на выходе квадратурного модулятора предназначен для подавления низкочастотного сигнала DDS-синтезатора и высших гармоник задающего генератора [3].

СВЧ-формирователь зондирующих ЛЧМ-радиосигналов на основе квадратурного переноса спектра низкочастотных ЛЧМ-радиосигналов позволяет добиться высокой линейности и стабильности изменения частоты зондирующих ЛЧМ-радиосигналов, а также обеспечивает возможность перестройки несущей частоты ЛЧМ-радиосигналов путем изменения частоты задающего генератора. Недостатком данного СВЧ-формирователя является невозможность генерирования широкополосных ЛЧМ-радиосигналов с девиацией частоты, превышающей величину, равную половине тактовой частоты f_T DDS-синтезатора.

Метод повышения девиации частоты ЛЧМ-радиосигналов на основе управления квадратурами DDS-синтезатора

Для расширения диапазона значений девиации частоты ЛЧМ-радиосигналов, генерируемых DDS-синтезатором, автором под руководством д.т.н., проф. Ю.Т. Карманова был разработан метод повышения девиации частоты, основанный на управлении квадратурами DDS-синтезатора.

Сущность предлагаемого метода повышения девиации частоты ЛЧМ-радиосигналов заключается в следующем. DDS-синтезатор формирует два квадратурных ЛЧМ-радиосигнала $u_c(t)$ и $u_s(t)$ с симметричным треугольным законом изменения частоты, длительностью T_c и девиацией $F_{дев}$ (рис. 2). Синфазный сигнал $u_c(t)$ поступает на первый низкочастотный вход квадратурного модулятора (КМ), а квадратурный $u_s(t)$ – на вход делителя мощности (ДМ), распределяющего мощность сигнала на два выхода.

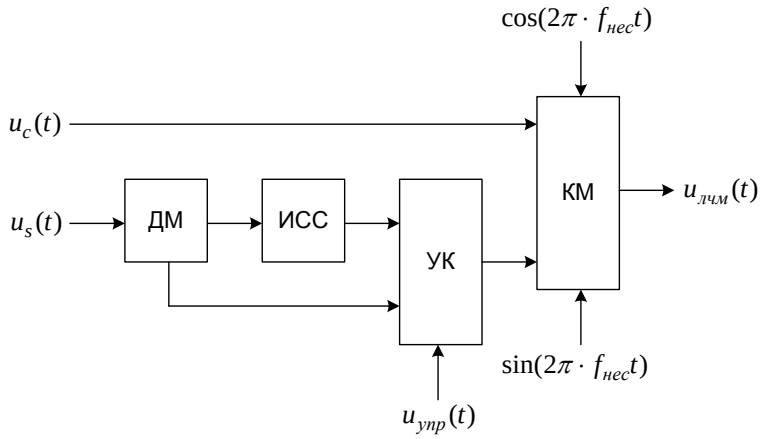


Рис. 2. Структурная схема СВЧ-формирователя зондирующих ЛЧМ-радиосигналов с расширенным диапазоном девиации частоты

Сигнал с первого выхода делителя мощности после прохождения инвертора синусоидального сигнала (ИСС) поступает на первый аналоговый вход управляемого электронного ключа (УК), на второй вход которого подается сигнал со второго выхода делителя мощности. В результате формируются два дифференциальных сигнала $u_s(t)$ и $-u_s(t)$, которые поступают на аналоговые входы управляемого ключа.

Управляемый ключ осуществляет коммутацию одного из входных аналоговых сигналов на второй низкочастотный вход квадратурного модулятора в моменты времени, определяемые управляющим сигналом $u_{упр}(t)$, поступающим от устройства управления:

$$u_{упр}(t) = \begin{cases} -1, iT_c \le t \le (i+0{,}5)T_c, i = 0, 1, 2, \ldots \\ 1, (j+0{,}5)T_c \le t \le (j+1)T_c, \; j = 0, 1, 2, \ldots \end{cases} \quad (1)$$

На высокочастотные входы квадратурного модулятора подаются от задающего генератора квадратуры несущего радиосигнала частотой $f_{нес}$.

В результате на выходе квадратурного модулятора формируется широкополосный ЛЧМ-радиосигнал:

$$u(t) = u_c(t) \cdot \cos(2\pi \cdot f_{нес} t) + u_{упр}(t) \cdot u_s(t) \cdot \sin(2\pi \cdot f_{нес} t) \quad (2)$$

Частота ЛЧМ-радиосигнала (2) изменяется от $f_{нес} - F_{дев}$ до $f_{нес} + F_{дев}$, при этом верхняя граница диапазона девиации частоты ЛЧМ-радиосигнала смещается к значению $(0{,}8 \ldots 0{,}9) f_T$.

Эффекты квантования при формировании зондирующих ЛЧМ-радиосигналов по DDS-технологии

Эффекты квантования амплитуды и фазы, которые имеют место в DDS-технологии, приводят к появлению в спектре формируемого ЛЧМ-радиосигнала побочных составляющих. Поскольку в радиолокационных измерителях малых расстояний с зондирующими ЛЧМ-радиосигналами реализуется частотный метод измерения расстояния, то побочные спектральные составляющие в зондирующем ЛЧМ-радиосигнале приводят к возникновению побочных составляющих в спектре сигнала биений.

Для исследования влияния эффектов квантования амплитуды и фазы ЛЧМ-радиосигнала на характеристики спектра сигнала биений были разработаны две модели зондирующего ЛЧМ-радиосигнала: одна модель учитывала конечную разрядность шины данных преобразователя амплитуда-фаза DDS-синтезатора (квантование амплитуды), другая – усечение кода на выходе аккумулятора фазы DDS-синтезатора (квантование фазы).

Исследование характеристик спектра сигнала биений проводилось путем анализа энергетического спектра сигнала биений, рассчитанного в системе компьютерной математики MATLAB [6].

Анализ полученных результатов показывает, что квантование амплитуды и фазы зондирующего ЛЧМ-радиосигнала в DDS-синтезаторе приводит к появлению в спектре сигнала биений множества побочных спектральных составляющих. Амплитуды побочных составляющих распределены случайным образом, что позволяет рассматривать их как фазовый шум.

В качестве примера на рис. 3 приведены энергетические спектры сигнала биений, полученные при следующих параметрах: девиация частоты 200 МГц, длительность ЛЧМ-радиосигнала 970 мкс, время переключе-

ния частот в DDS-синтезаторе 10 нс, несущая частота 3 ГГц, дальность 23 м, разрядность аккумулятора фазы 14 бит, разрядность шины данных преобразователя фаза-амплитуда 6 бит.

Исследования уровня побочных составляющих в спектре сигнала биений, проведенные при использовании параметров современных DDS-синтезаторов (AD9910, AD9914, AD9958), показывают, что амплитуды побочных спектральных составляющих, обусловленных квантованием фазы и амплитуды зондирующего ЛЧМ-радиосигнала, практически не превосходят уровня боковых лепестков спектра сигнала биений.

На рис. 4 приведены энергетические спектры сигнала биений, рассчитанные при использовании DDS-синтезатора AD9910. Максимальные уровни шумовых составляющих (по отношению к уровню сигнала биений, полученного без учета эффектов квантования ЛЧМ-радиосигнала), при квантовании фазы и амплитуды составляют 1,8 дБ и 1,6 дБ соответственно.

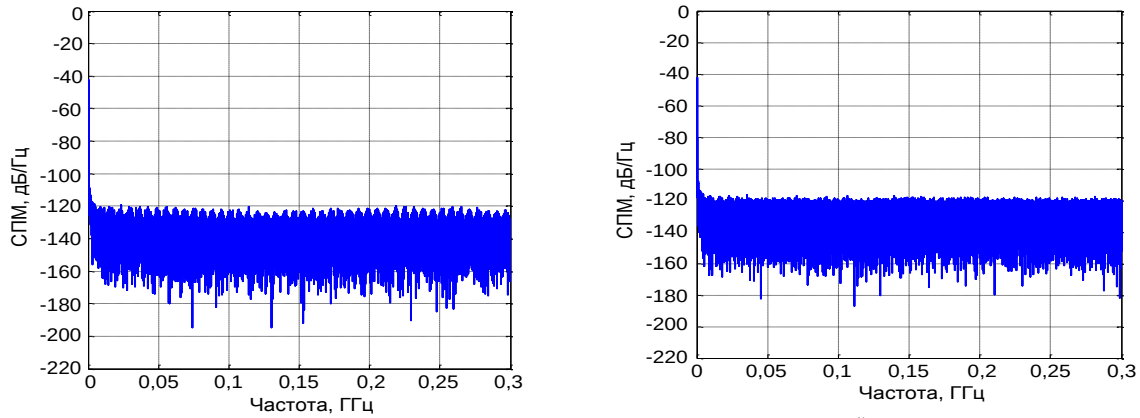


Рис. 3. Энергетические спектры сигнала биений
при квантовании фазы (а) и амплитуды (б) ЛЧМ-радиосигнала

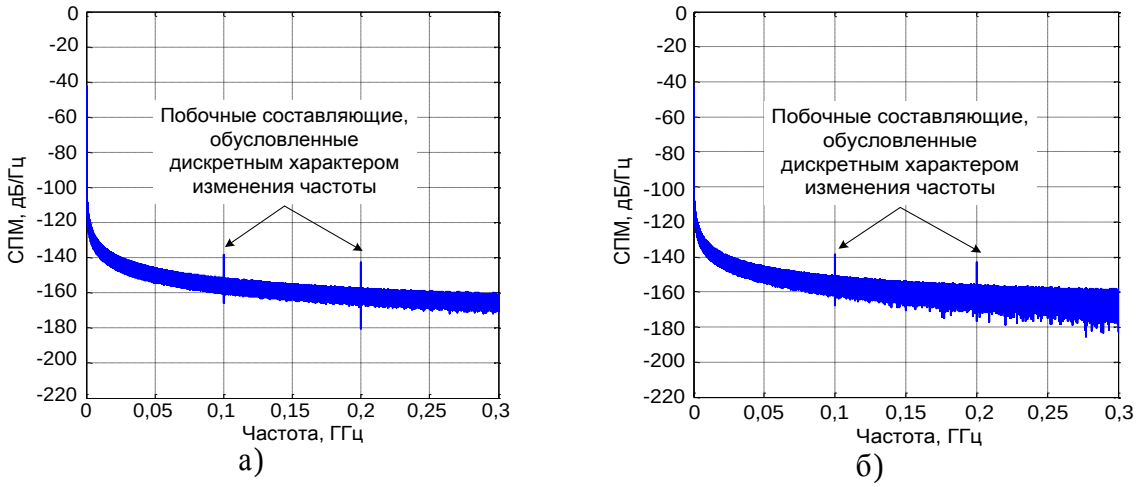


Рис. 4. Энергетические спектры сигнала биений при квантовании фазы (а)
и амплитуды (б) ЛЧМ-радиосигнала в DDS-синтезаторе AD9910

Выводы

1. Наиболее приемлемым методом формирования зондирующих ЛЧМ-радиосигналов в радиолокационных измерителях малых расстояний является квадратурный перенос спектра ЛЧМ-радиосигналов, синтезированных по DDS-технологии, в высокочастотную область при помощи квадратурного модулятора.

2. Для расширения диапазона возможных значений девиации частоты зондирующих ЛЧМ-радиосигналов в радиолокационных измерителях малых расстояний можно использовать метод повышения девиации частоты, основанный на управлении квадратурами DDS-синтезатора.

3. При использовании современных DDS-синтезаторов для формирования зондирующих ЛЧМ-радиосигналов характеристики спектра сигнала биений в радиолокационных измерителях малых расстояний практически совпадают с характеристика, присущими идеальным ЛЧМ-радиосигналам.

Библиографический список

1. Комаров, И.В. Основы теории радиолокационных систем с непрерывным излучением частотно-модулированных колебаний / И.В. Комаров, С.М. Смольский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 392 с.

2. Атаянц, Б.А. Проблема шумов и нелинейности модуляционной характеристики передатчика в прецизионных промышленных системах ближней частотной радиолокации / Б.А. Атаянц, В.В. Езерский, С.М. Смольский, Б.И. Шахтарин // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 3. – С. 3–29.

3. Кочемасов, В.Н. Методы формирования сверхширокополосных линейно-частотно-модулированных сигналов / В.Н. Кочемасов, А.В. Голубков, В.Г. Голубков, А.А. Черкашин, Е.В. Янковский // Сборник материалов IV общероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем». – 2012. – С. 113–124.

4. Ямпурин, Н.П. Формирование прецизионных частот и сигналов / Н.П. Ямпурин, В.В. Болознев, Е.В. Сафонова, Е.Б. Жалнин. – Нижний Новогород: Изд-во Нижегород. гос. техн. ун-та, 2003. – 187 с.

5. Карманов, Ю.Т. Характеристики радиолокационных дальномеров с ЛЧМ-зондирующими сигналами, синтезированными по цифровой технологии DDS / Ю.Т. Карманов, С.В. Поваляев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Вып. 14. – № 1. – С. 14–22.

6. Дьяконов, В.П. MATLAB и SIMULINK для радиоинженеров / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.

К содержанию

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРНОЙ АНТЕННЫ

В.А. Бухарин, Н.И. Войтович

Представлены результаты строгого дифракционного моделирования плоской резонаторной антенны и экспериментальные результаты исследований на реальных образцах антенны. Приведены основные характеристики резонаторной антенны. Указаны перспективы дальнейших исследований с целью применения антенны в монолитных приёмо-передающих устройствах.

Ключевые слова: резонатор; электромагнитное поле; антенная решётка.

Введение

Плоские резонаторные антенны (РА) с частично прозрачной поверхностью [1, 2] имеют простую конструкцию и высокие электродинамические характеристики. В резонаторной антенне нет привычного, громоздкого, разветвлённого фидерного тракта, состоящего из переходов, делителей мощности, трансформаторов и линий передачи электромагнитной энергии различного типа. В РА роль делителя мощности выполняет резонатор, а роль излучающей апертуры – внешняя поверхность одной из его стенок, выполненная в виде частично прозрачной пластины. Принцип работы РА основан на синфазном возбуждении излучающих элементов частично прозрачной стенки резонансной модой основного колебания объёмного резонатора антенны. Резонаторные антенны обладают высокой пространственно-временной избирательностью.

Постановка задачи

Целью работы является исследование электродинамических характеристик РА, построенной на основе цилиндрического резонатора (рис. 1), возбуждаемого щелевыми излучателями. Резонаторная антенна выполнена из алюминиевого сплава и представляет собой низкий объёмный цилиндрический резонатор с частично прозрачной стенкой. Частично прозрачная стенка является излучающей апертурой антенны. Диаметр РА 1,85λ.

Частично прозрачная стенка изготовлена из металлической пластины с круглыми отверстиями. Диаметр отверстий, расстояние между отверстиями и толщина металлической пластины таковы, что при падении плоской волны по нормали к пластине коэффициент прохождения электромагнитной волны равен 0,4.

Метод решения задачи

Проводились численные эксперименты и натурные эксперименты на реальных образцах РА. Численный анализ РА проводился в строгой постановке прямым пространственно-временным методом.

Прямой временной метод решает обобщённую на четырёхмерное пространство краевую электродинамическую задачу. В отличие от традицион-

ных частотных методов, он определяет характеристики исследуемых объектов, непосредственно зависящие от времени, при этом частотные характеристики являются лишь результатом дальнейшей обработки временных характеристик. Электродинамическая структура может возбуждаться произвольными сигналами. Важным случаем является воздействие короткого видеоимпульса, возбуждающего практически все возможные типы собственных колебаний исследуемого объекта, что делает высоко информативной наблюдаемую реакцию, развёрнутую во времени.

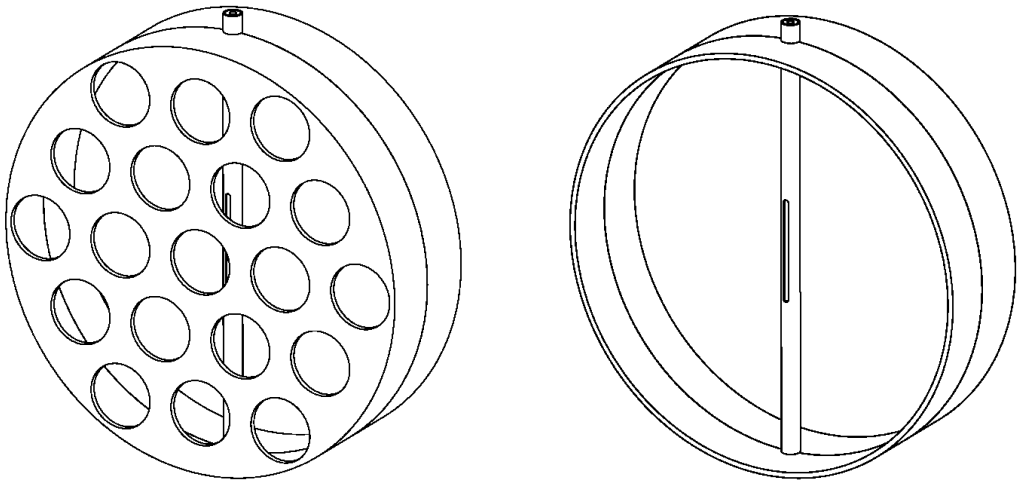


Рис. 1. Плоская резонаторная антенна с частично прозрачной стенкой и без неё

Полученные результаты

На рис. 2 представлены результаты моделирования дифракции плоской монохроматической волны на оригинальной РА [1, 2] в различные моменты времени. На рис. 3 изображено строение электромагнитного поля вблизи антенны в некоторый момент времени, когда сформировался автономный вихрь волны, удаляющейся от антенны.

На рис. 4 представлены расчётные и экспериментальные амплитудные диаграммы направленности РА в плоскости вектора напряжённости электрического поля (*а*) и в плоскости вектора напряжённости магнитного поля (*б*) на частоте 1,0074f_0, где f_0 – резонансная частота антенны.

Измерения на действующем образце антенны показали, что уровень бокового излучения не превышает минус 30 дБ, а кроссполяризационного излучения в главных плоскостях не более чем минус 35 дБ. Согласование антенны обеспечивается в рабочей полосе частот не более 2,5 %. Коэффициент стоячей волны не превышает 1,2.

Исследуемая антенна может быть использована в качестве самостоятельной передающей или приёмной, а так же приёмопередающей антенны в системах спутниковой, самолётной и наземной связи, в аэродромных системах навигации и посадки самолётов. Она может служить излучающим элементом в антенных решётках и гибридных антеннах.

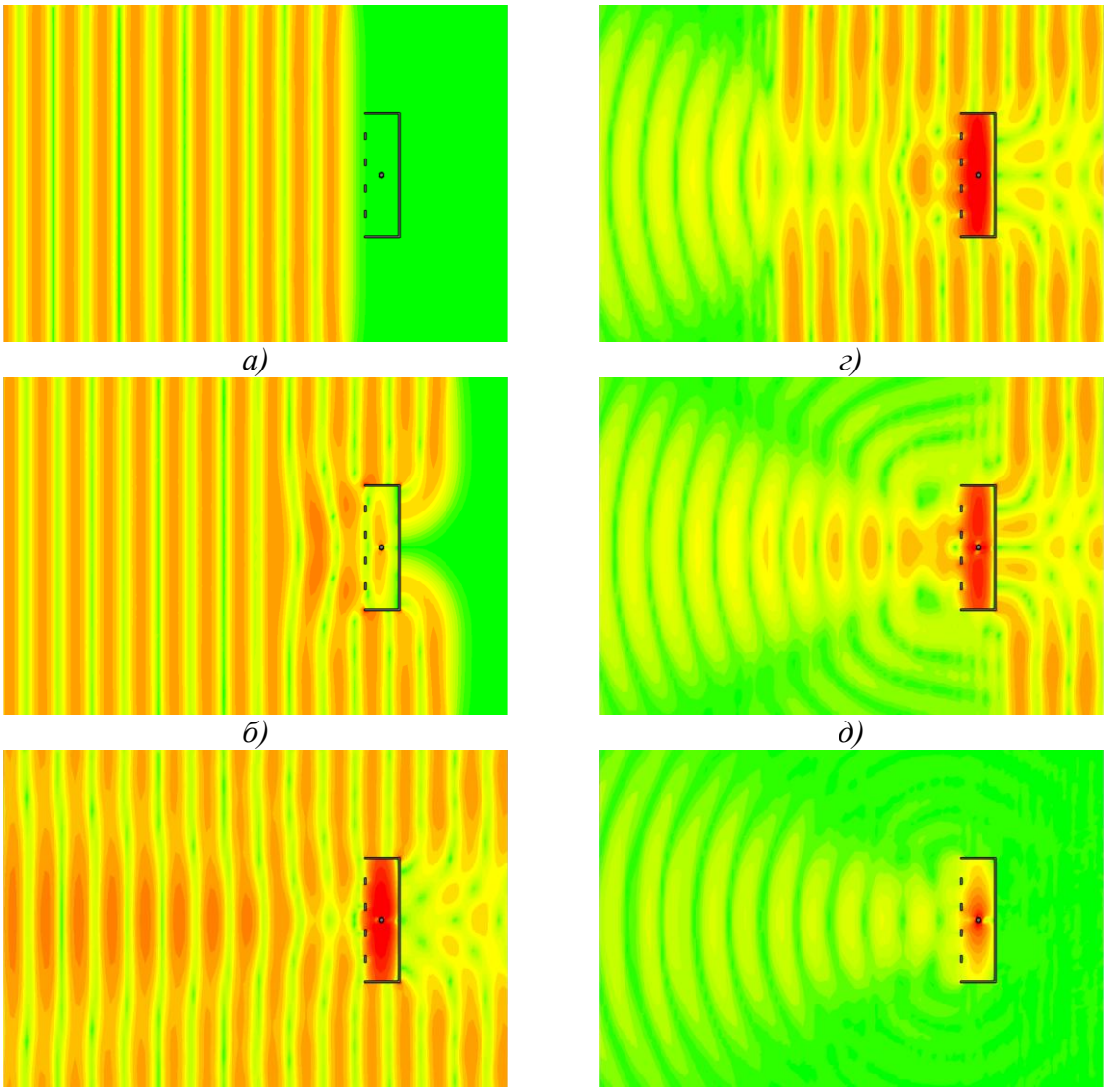


Рис. 2. Пространственно-временная эволюция электромагнитного поля при падении плоской волны на резонаторную антенну

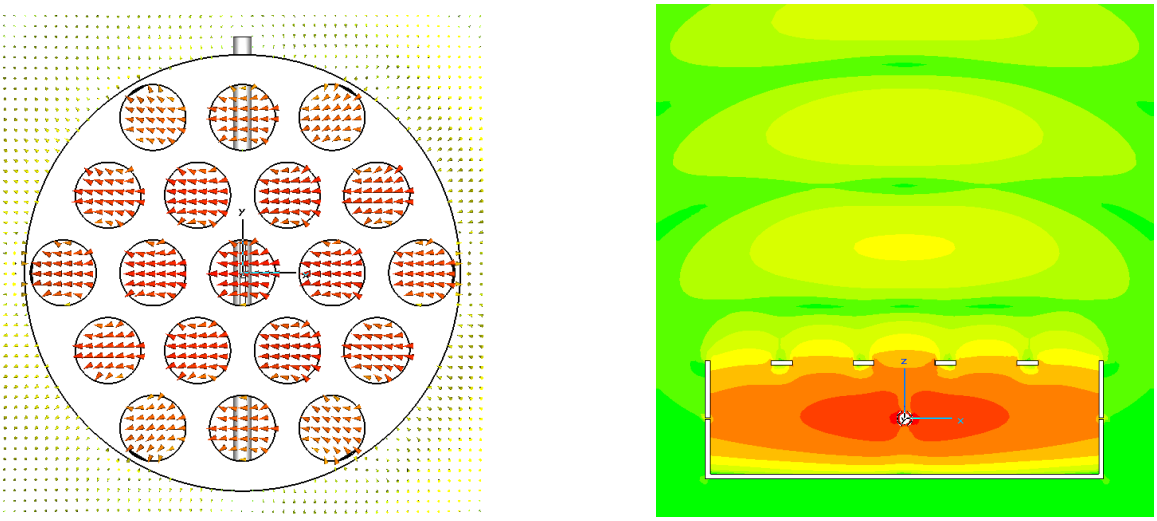
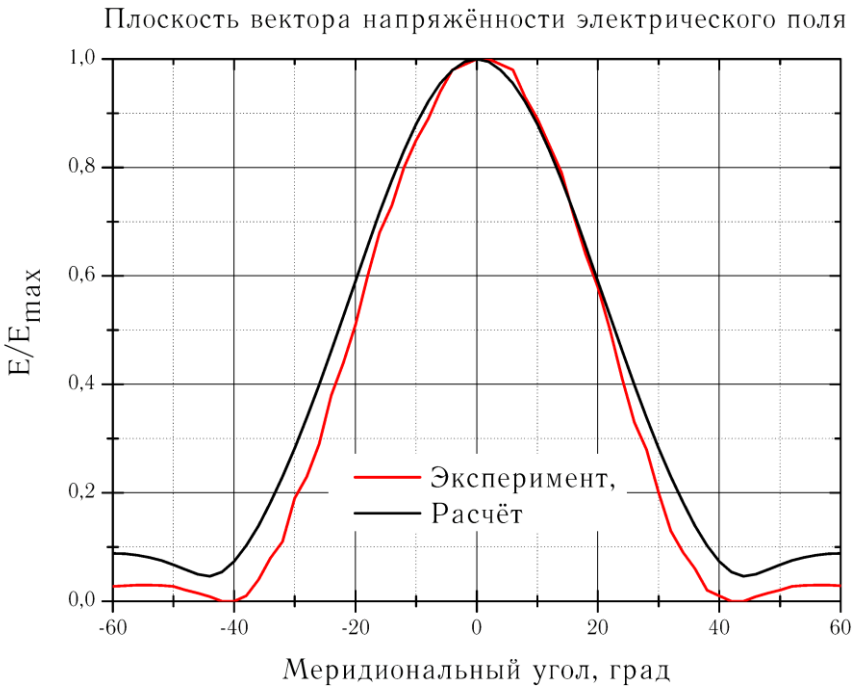
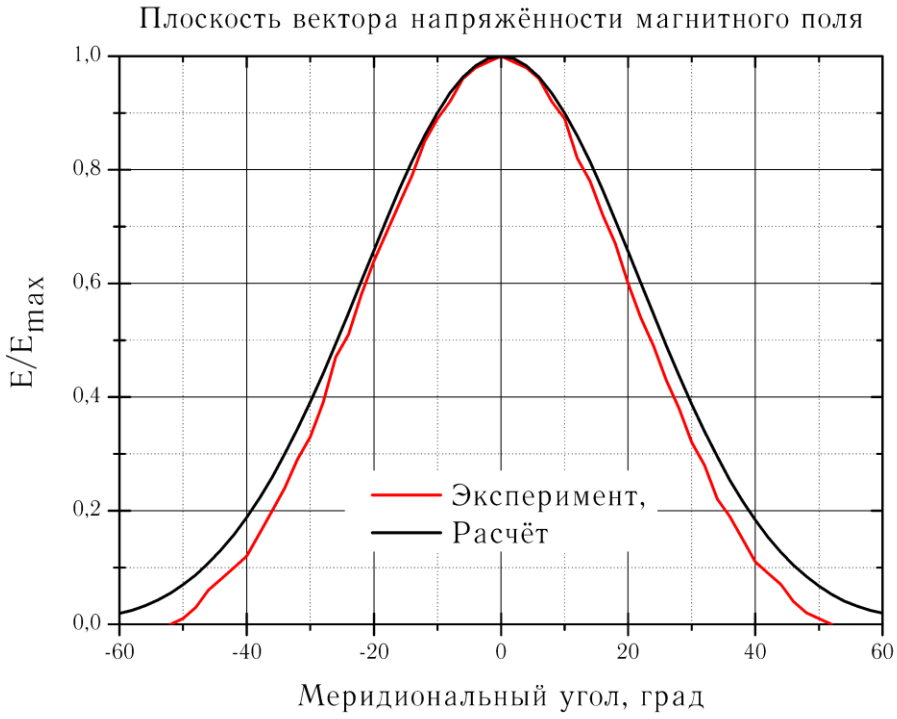


Рис. 3. Структура электрического поля в плоской резонаторной антенне



а)



б)

Рис. 4. Амплитудные диаграммы направленности резонаторной антенны

Выводы

Полученные результаты свидетельствуют о том, что резонаторная антенна, обладает уникальными электродинамическими и конструкторско-технологическими характеристиками. Она может быть использована в тех областях, где требуется высокий уровень электромагнитной совместимости и пространственно-временная избирательность радиотехнических систем при минимальных размерах антенны. РА имеет высокий коэффициент полезного действия, низкий уровень бокового и заднего излучения, низкий уровень кроссполяризационного излучения и малую шумовую температуру.

В дальнейших исследованиях целесообразно, с целью применения антенны в монолитных приёмо-передающих устройствах, провести анализ РА с нелинейными и нестационарными активными элементами.

Библиографический список

1. Бухарин, В. А. Плоская резонаторная антенна / В.А. Бухарин, Н.И. Войтович, Н.Н. Репин // Сборник трудов Второй Всероссийской научно-технической конференции «РАДИОВЫСОТОМЕТРИЯ-2007». – Екатеринбург: ИД «Третья столица», 2007. – С. 160–164.

2. Бухарин, В. А. Влияние температуры на параметры резонаторной антенны / В.А. Бухарин, Н.И. Войтович // Сборник трудов Третьей Всероссийской научно-технической конференции «РАДИОВЫСОТОМЕТРИЯ-2010». – Екатеринбург: Изд-во ООО «Форт Диалог-Исеть», 2010. – С. 188–192.

К содержанию

УДК 621.396.677

ШИРОКОПОЛОСНАЯ ВИБРАТОРНАЯ АНТЕННА С АПЕРИОДИЧЕСКИМ РЕФЛЕКТОРОМ

Н.И. Войтович, А.В. Ершов

Рассматривается вибраторная антенна, обладающая КСВ ниже 1,1 в полосе частот 8 %. Антенна характеризуется компактностью, механической прочностью, малым сопротивлением воздушному потоку. Антенна может быть выполнена как в трубчатом, так и в микрополосковом исполнении.

Ключевые слова: широкая полоса частот; вибратор; радиовещание; компенсация импеданса.

В ряде практически важных случаев, например, в радиовещании, важно, чтобы антенна была согласована с фидером в широком диапазоне частот. Как правило, широкая полоса частот достигается в ущерб либо уровню согласования с фидером (КСВ), либо диаграмме направленности, либо размерам конструкции. Однако это противоречит требованиям к антеннам, предназначенным для работы на антенных опорах в виде башен. Здесь важным является сохранение компактных размеров антенны в целях снижения весовой и ветровой нагрузок. Для мощных передающих антенн важно также обеспечение минимального КСВ, при этом незначительная отраженная мощность не будет вызывать нарушения режима работы выходных цепей передатчика. Способность антенны работать в широкой полосе частот позволяет снизить количество антенн на опоре, а значит весовую и ветровую нагрузку на опору.

Представленная в настоящей работе широкополосная вибраторная антенна является компромиссным решением: обладая размерами и диаграммой направленности, незначительно отличающимися от таковых для обычной полуволновой вибраторной антенны, она обеспечивает низкий КСВ в достаточно широкой полосе частот.

Конструктивно антенна (рис. 1) состоит из первого вибратора 1, второго вибратора 2, первого и второго короткозамыкающих проводников 3, симметрирующего устройства 4, устройства компенсации реактивной составляющей входного импеданса антенны 5, фидера 6, соединителя радиочастотного 7. Первый вибратор состоит из первого 8 и второго 9 плеча, разнесенных вдоль продольной оси, в результате чего образован зазор. Второй вибратор 2 не имеет разрыва, расположен параллельно первому вибратору на расстоянии много меньшем длины волны. Короткозамыкающие проводники 3 гальванически соединяют первый и второй вибраторы. Возбуждающая мощность к антенне подводится коаксиальным кабелем 6. В антенне применено симметрирующее устройство в виде короткозамкнутого четвертьволнового отрезка двухпроводной линии переда-

чи. Коаксиальный кабель проложен внутри одной из трубок симметрирующего устройства и соответствующего плеча вибратора. Внешний проводник кабеля соединён в зазоре с плечом вибратора. Центральный проводник коаксиального кабеля соединен с центральным проводником согласующего отрезка кабеля, расположенного внутри трубки другого плеча вибратора. Второй конец центрального проводника согласующего отрезка ни с чем не соединён. Внешний проводник согласующего отрезка кабеля в области зазора гальванически соединён с плечом вибратора. В результате источник возбуждения расположен симметрично относительно конструкции антенны. Одним полюсом источник подключен непосредственно ко одному из плеч вибратора, а другим полюсом подключен через согласующее устройство другому плечу вибратора.

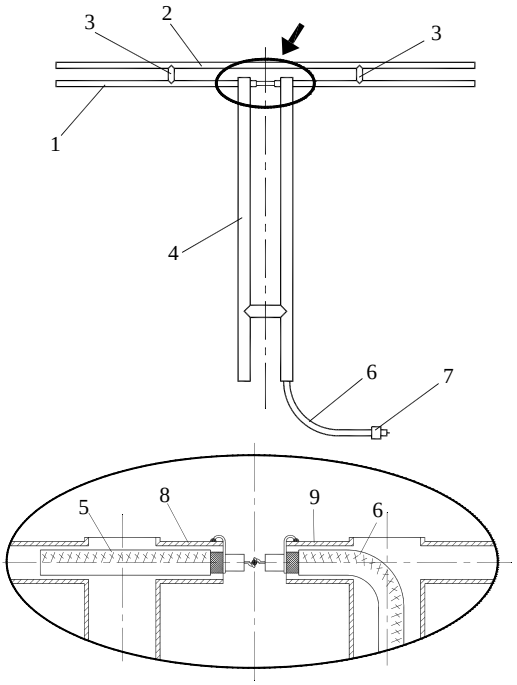


Рис. 1. Конструкция широкополосной вибраторной антенны

С точки зрения физической модели предложенная широкополосная симметричная вибраторная антенна представляет собой два параллельных друг другу полуволновых вибратора с «сильной» распределённой электромагнитной связью, кроме того имеющих гальваническую связь друг с другом в двух сечениях посредством коротких по сравнению с длиной волны проводников (короткозамыкателей). Антенна возбуждается в зазоре между плечами одного из вибраторов источником, включенным последовательно с согласующим устройством в виде отрезка коаксиальной линии передачи; причём с плечами возбуждаемого вибратора соединён также отрезок короткозамкнутой двухпроводной линии. Длина двухпроводной линии равна четверти длины волны на средней рабочей частоте. Короткозамкнутый

четвертьволновый отрезок двухпроводной линии выполняет роль симметрирующего устройства. Предполагается, что вибраторы, короткозамыкатели и симметрирующее устройство выполнены из цилиндрических проводников, радиусы цилиндров которых много меньше длины волны. Все проводники выполнены из идеально проводящего материала. Антенна расположена в свободном пространстве.

В основу математической модели положен обобщённый метод наведённых электродвижущих сил, называемый в некоторых источниках методом согласования реакций. Этот метод предполагает определение взаимного влияния электрически коротких диполей, образованных соседними сегментами, на которые разбиваются проводники антенны, и так называемых пробных диполей.

Будем считать, что антенна возбуждается генератором с напряжением V0 на зажимах, включенным в зазор вибратора.

Численная модель антенны аналогична модели, получаемой при решении интегрального уравнения антенны методом моментов. Интегралы, входящие в выражения для коэффициентов матрицы взаимных влияний, вычисляются с помощью метода Симпсона. Решение СЛАУ будем искать с использованием метода Гаусса.

Вводя в рассмотрение N пробных диполей, получим систему N линейных алгебраических уравнений с N неизвестными величинами I_n:

$$[V]=[Z][I], \quad (1)$$

где [V] – вектор-столбец, элементы которого равны значениям напряжений источников «истинных» и «пробных» диполей; [Z] – матрица взаимных сопротивлений «истинных» и «пробных» диполей; [I] – вектор-столбец, элементы которого равны комплексным амплитудам базисных функций, с помощью которых аппроксимируется токовая функция.

На основе решения систему уравнений определяется приближённое распределение тока вдоль рассматриваемой антенны. По известному распределению тока рассчитываются входное сопротивление, диаграмма направленности и коэффициент усиления антенны.

На рис. 2 показано распределение амплитуды тока вдоль проводников широкополосной симметричной вибраторной антенны на средней частоте рабочего диапазона.

За исключением центрального участка, закон распределения тока вдоль вибраторов близок к синусоидальному закону, что характерно для обычного полуволнового вибратора. Амплитуда тока на участках вибраторов, расположенных между короткозамыкающими проводниками, примерно в два раза выше, чем на крайних участках вибраторов вблизи этих проводников.

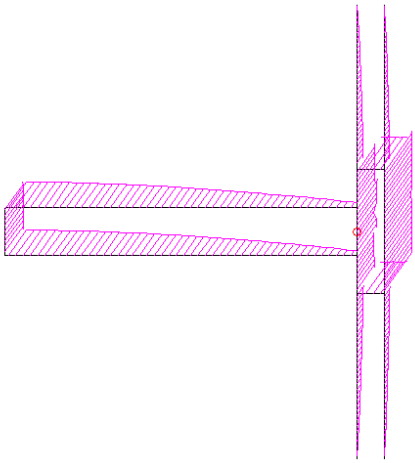


Рис. 2. Распределение амплитуды тока вдоль проводников антенны

Распределение тока вдоль проводников симметрирующего устройства, а именно практически нулевой ток в этих элементах вблизи их подсоединения к вибратору, свидетельствует о высоком входном сопротивлении симметрирующего устройства и, следовательно, о его малом влиянии на распределение тока вдоль вибратора.

На рис. 3 представлена модель широкополосной симметричной вибраторной антенны с апериодическим рефлектором.

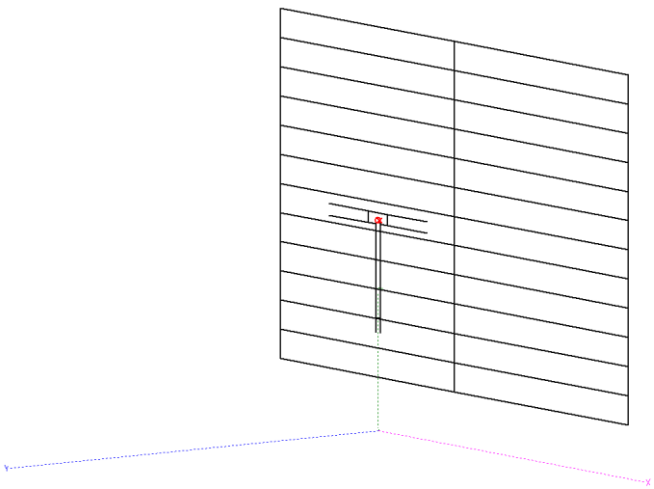


Рис. 3. Модель антенны с апериодическим рефлектором

На рис. 4 показаны зависимости от частоты действительной и мнимой частей импеданса антенны. На графике видно, что мнимая часть импеданса в рабочем диапазоне частот меняется в пределах ±5 Ом. Действительная часть импеданса равна волновому сопротивлению фидера (50 Ом) на двух частотах, в окрестности этих частот действительная часть изменяется

плавно. В точке максимума отклонение действительной части импеданса антенны от 50 Ом составляет +3 Ом. За пределами рабочего диапазона как мнимая, так и действительная части импеданса быстро отклоняются от оптимальных значений, что и обуславливает большую крутизну фронтов на графике зависимости КСВ от частоты.

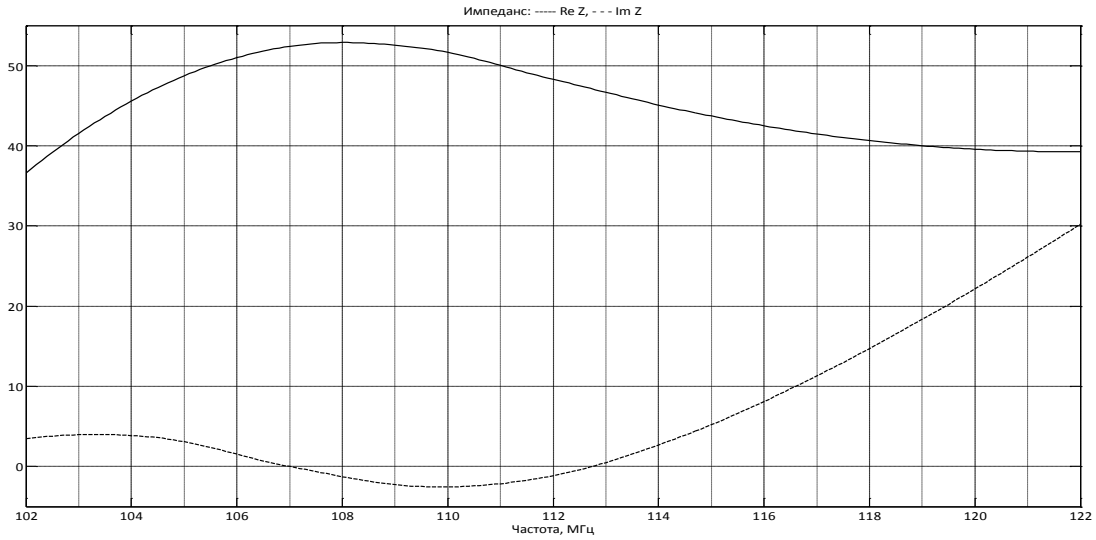


Рис. 4. Зависимость импеданса антенны с апериодическим рефлектором от частоты при согласовании с фидером 50 Ом

На рис. 5 представлен график зависимости согласования антенны с фидером с волновым сопротивлением 50 Ом от частоты. Эта зависимость характеризуется наличием протяженного участка КСВ ниже 1,1, за пределами которого КСВ довольно быстро возрастает. Таким образом, полоса рабочих частот предложенной широкополосной антенны составляет 8 % при КСВ ниже 1,1.

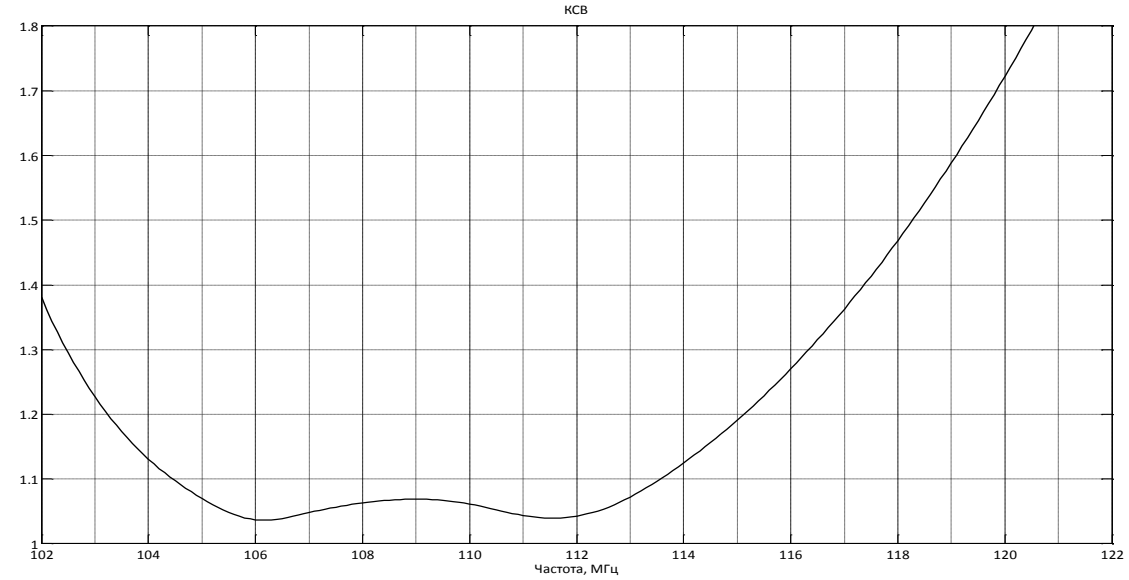


Рис. 5. Зависимость КСВ антенны с апериодическим рефлектором от частоты

Диаграмма направленности антенны с апериодическим рефлетором показана на рис. 6, 7. Коэффициент усиления антенны составляет 8 dBi.

Таким образом, создана новая полезная вибраторная антенна, обеспечивающая излучение сигналов в широкой полосе частот и тем самым решающая проблему ввода новых радиотелевизионных станций и станций связи с подвижными объектами.

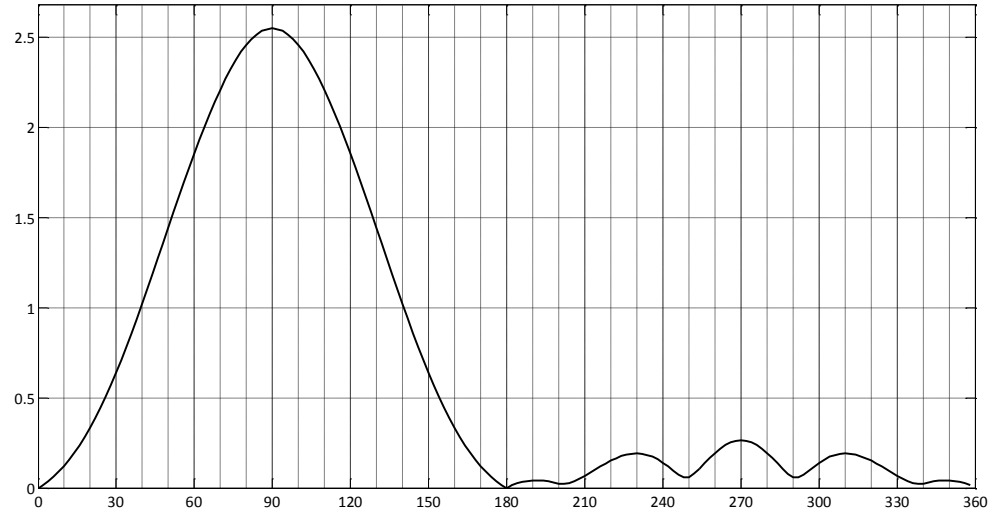


Рис. 6. Горизонтальная диаграмма направленности широкополосной вибраторной антенны с апериодическим рефлектором

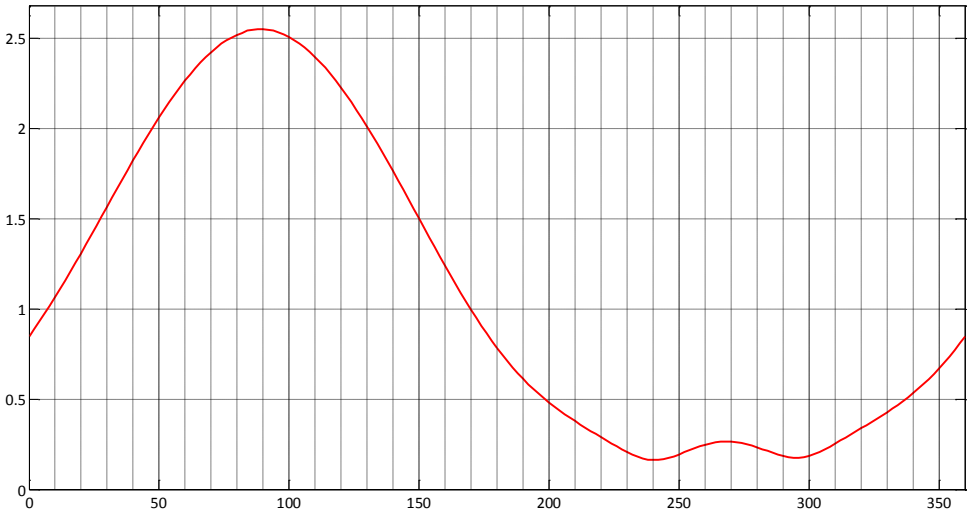


Рис. 7. Вертикальная диаграмма направленности широкополосной вибраторной антенны с апериодическим рефлектором

Антенна обеспечивает:

– симметричную диаграмму направленности в плоскости E (без раздвоения диаграммы и без отклонения максимума диаграммы направленности от плоскости, перпендикулярной к вибраторам антенны);

– низкий КСВ в линии питания за счёт согласования входного импеданса антенны с волновым сопротивлением фидера в широкой полосе частот;

– удобный монтаж её на поясе решётчатой башни.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта по договору № 02.G25.31.0046 между Минобрнауки РФ и ОАО «ЧРЗ Полет» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – ЮУрГУ (НИУ)

Библиографический список

1. N.I.Voytovich, A.V.Ershov. Wideband Dipole Antenna. Antennas and Propagation (EuCAP). 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). pp. 1176–1180.

2. N.I.Voytovich, A.V.Ershov. Wideband Dipole Antenna. IEEE Xplore, digital library. pp. 1214–1218.

3. Бузов, А.Л. Электродинамические методы анализа проволочных антенн / А.Л. Бузов, Ю.М. Сподобаев, Д.В. Филиппов; под ред. В.В. Юдина. – М.: Радио и связь, 2000. – 153 с.

4. Barzilani G. Mutual impedance of parallel aerials // Wireless Engr. – 1948.– vol. 25. – 343 p.

5. Richmond J.H. Digital computer solutions of the rigorous equations for scattering problems. Proc. IEEE, vol. 53 (1965), pp. 796–804.

К содержанию

УДК 621.396.674.39

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТУРНИКЕТНОЙ ЩЕЛЕВОЙ АНТЕННЫ

Н.И. Войтович Н.И., Д.С. Клыгач

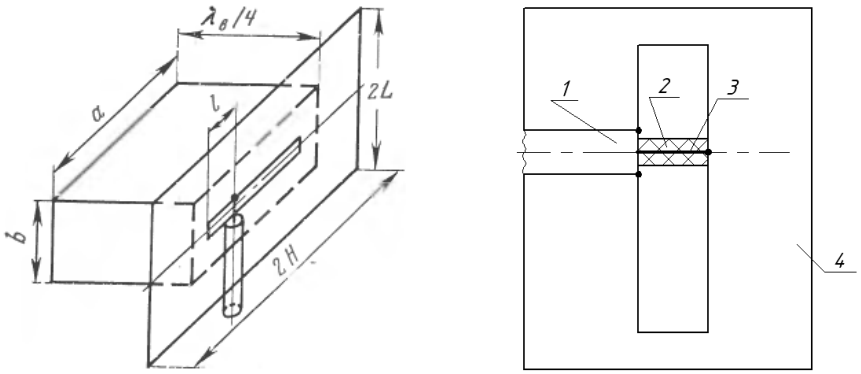
В работе показано, что применение согласующего устройства в виде отрезка коаксиального кабеля с режимом холостого хода на конце позволяет обеспечить полосу частот согласования щелевой антенны с коаксиальным кабелем примерно 30 % от средней частоты рабочего диапазона частот.

Применение согласующего устройства в виде отрезка коаксиального кабеля с режимом холостого хода на конце и пассивных щелей позволяет увеличить полосу частот согласования примерно до 60 % от средней частоты рабочего диапазона частот.

Теоретически и экспериментально показано, что щелевая турникетная антенна формирует практически круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с горизонтальной поляризацией поля излучения и обеспечивает при этом широкую полосу согласования антенны с фидером.

Ключевые слова: антенна; согласование антенны с фидером; широкополосная антенна, щелевая турникетная антенна.

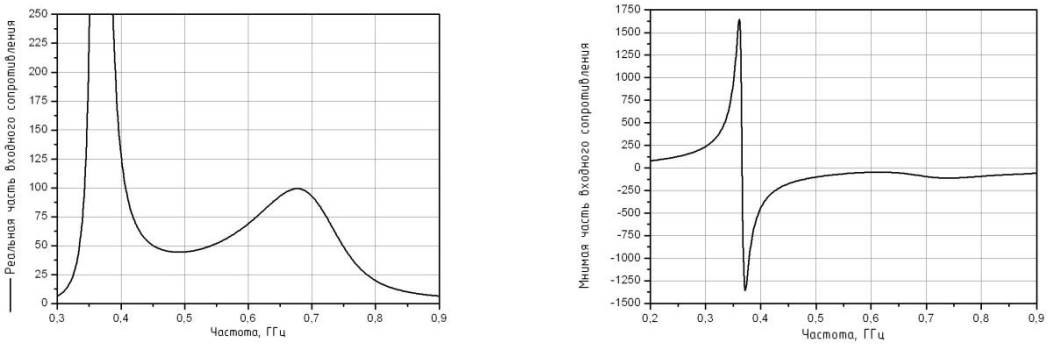
Известен [1] вариант возбуждения щелевой антенны с помощью коаксиальной линии передачи, показанный на рис. 1. Внешний проводник коаксиальной линии гальванически соединен с одним краем щели, а центральный проводник гальванически соединён с противоположным краем щели. В области щели внешний проводник удалён, центральный проводник проложен над щелью. Согласование с фидером при таком способе возбуждения щели достигается выбором расстояния *l* от точки возбуждения до узкого края щели.



а) б)

Рис. 1. Известный вариант возбуждения щелевой антенны: 1 – внешний проводник; 2 – диэлектрик; 3 – центральный проводник; 4 – пластина

В известном варианте согласование щелевой антенны с коаксиальным кабелем выполняется в узкой полосе частот. Рассмотрим это далее на более простом примере возбуждения, а именно на примере возбуждения двухстороннего щелевого излучателя, выполненного в виде щели на прямоугольной пластине с размерами 0,8λх 0,4λ, в которой прорезана прямоугольная щель длиной λ/2 и шириной 0,04λ, где λ – длина волны (рис.1б). Точка возбуждения щели расположена на расстоянии 0,1λ от узкого края щели. На рис. 2 приведены расчётные зависимости реальной ReZ и мнимой ImZ части входного сопротивления Z указанной двухсторонней щелевой антенны от частоты.



а) б)

Рис. 2. Зависимость входного сопротивления двухсторонней щелевой антенны от частоты: а) реальная часть; б) мнимая часть

Полоса частот, в которой реальная часть входного сопротивления равна 50 ±10 Ом (440 – 560 МГц), составляет 18 % от средней частоты рабочего диапазона. Мнимая часть входного сопротивления (рис. 2б) принимает наименьшее значение, равное минус 1300 Ом, на частоте 370 МГц. На частотах выше 370 МГц ImZ возрастает, достигая максимума, равного минус 50 Ом, на частоте 600 МГц. В полосе частот 600 – 740 МГц ImZ убывает и достигает минимума, равного минус 120 Ом, на частоте 740 МГц. В области более высоких частот ImZ возрастает, стремится к величине, равной нулю.

Из анализа зависимости входного сопротивления щелевой антенны от частоты, представленной на рис. 2, можно отметить следующие особенности такого варианта возбуждения щелевой антенны.

1) полоса частот, в которой реальная часть сопротивления равна 50 ±10 Ом, составляет 18 % от резонансной частоты;

2) мнимая составляющей входного сопротивления антенны в полосе частот по п. 1 является ёмкостной, большой по абсолютной величине;

3) согласование щелевой антенны с фидером получается узкополосным; ширина полосы согласования составляет $0{,}05f_{ср}$, где $f_{ср}$ – средняя частота диапазона.

Из рассмотрения представленной зависимости следует, что для увеличения ширины полосы согласования щелевой антенны с фидером необходимо скомпенсировать мнимую (реактивную) составляющую входного сопротивления в диапазоне 440–560 МГц. Как показано авторами в [2], это можно сделать при другом варианте возбуждения, показанном на рис. 3. В предложенном авторами варианте устройства возбуждения конец внешнего проводника коаксиальной линии, проложенной на пластине, гальванически соединён с краем щели; центральный проводник проложен над щелью и в области другого края щели гальванически соединён с центральным проводником отрезка коаксиальной линии передачи с холостым ходом на противоположном конце. Внешний проводник отрезка коаксиальной линии с холостым ходом гальванически соединён с пластиной.

Согласующим устройством при таком варианте возбуждения антенны выступает отрезок коаксиальной линии передачи с режимом холостого хода на конце. Входное сопротивление разомкнутого на конце отрезка коаксиальной линии длиной менее четверти длины волны является ёмкостным. Представленный отрезок компенсирует мнимую часть входного сопротивления щелевой антенны в широкой полосе частот.

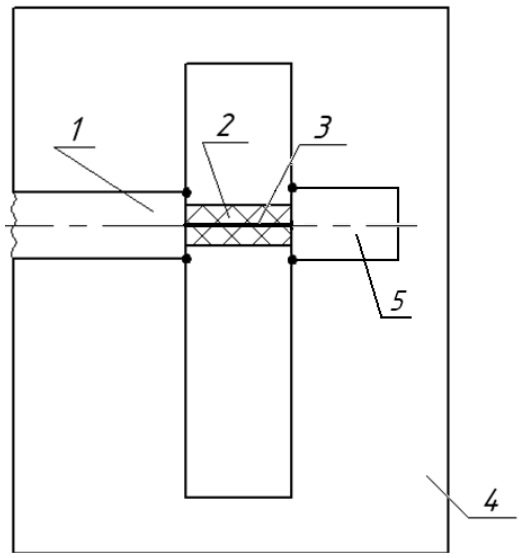


Рис. 3. Вариант возбуждения щелевой антенны,
при котором согласование достигается применением
короткого отрезка линии передачи с холостым ходом:
1 – внешний проводник; 2 – диэлектрик; 3 – центральный проводник;
4 – пластина; 5 – согласующий отрезок.

Рассмотрим зависимости активной и реактивной части входного сопротивления щелевой антенны, запитанной по варианту, показанному на рис. 3, в котором согласующим устройством является разомкнутый на конце отрезок коаксиальной линии.

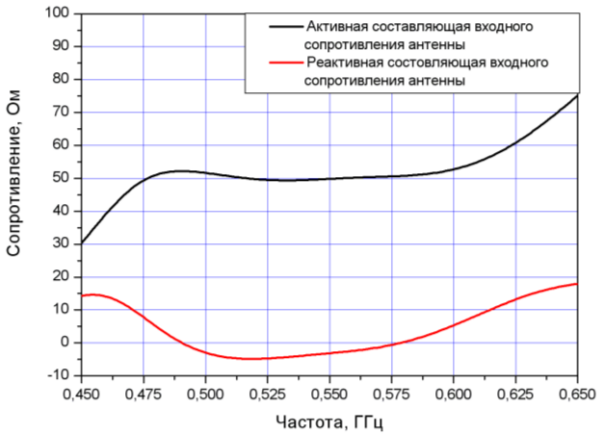


Рис. 4. Зависимость входного сопротивления щелевой антенны при возбуждении, представленному на рис. 3

Как видно из рассмотрения графиков, представленных на рисунке 4, мнимая составляющая входного сопротивления антенны в достаточной мере скомпенсирована в полосе частот 475–615 МГц, а реальная часть в той же полосе частот практически постоянна и равна 50 Ом. Используя вариант возбуждения, при котором в роли согласующего устройства выступает короткий разомкнутый на конце отрезок коаксиальной линии, получим следующее:

1) скомпенсирована мнимая составляющая входного сопротивления щелевой антенны в широкой полосе частот;

2) практически постоянное значение реальной части входного сопротивления в широкой полосе частот;

3) увеличение полосы частот согласования до величины $0{,}3f_{ср}$.

Рассмотрим далее вариант двухсторонней щелевой антенны, дополненной парой щелей, расположенных симметрично относительно щели в центре пластины. Длина дополнительных щелей равна $0{,}5\lambda_{ср}$, где $\lambda_{ср}$ – длина волны на средней частоте диапазона. Такие щели мы будем называть пассивными, т.к. эти щели непосредственно фидером не возбуждаются; их возбуждение происходит за счёт энергии волн, распространяющихся от щели в центре пластины. Вносимое сопротивление от дополнительных щелей является практически реактивным. Поэтому дополнительные щели могут выступать в качестве согласующего устройства и компенсировать реактивную часть входного сопротивления антенны.

Такую систему, состоящую из основной щели и пассивных щелей, можно рассматривать как систему из двух связанных между собой резонансных контуров. Выбором резонансной частоты пассивных щелей полосу согласования антенны можно расширить в область высоких частот.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости от частоты КСВ и зависимости реальной и мнимой части входного сопротивления щелевой антенны, дополненной пассивными щелями.

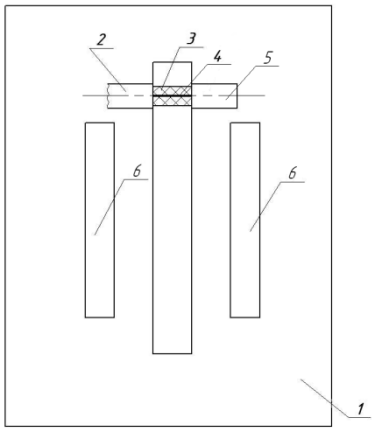
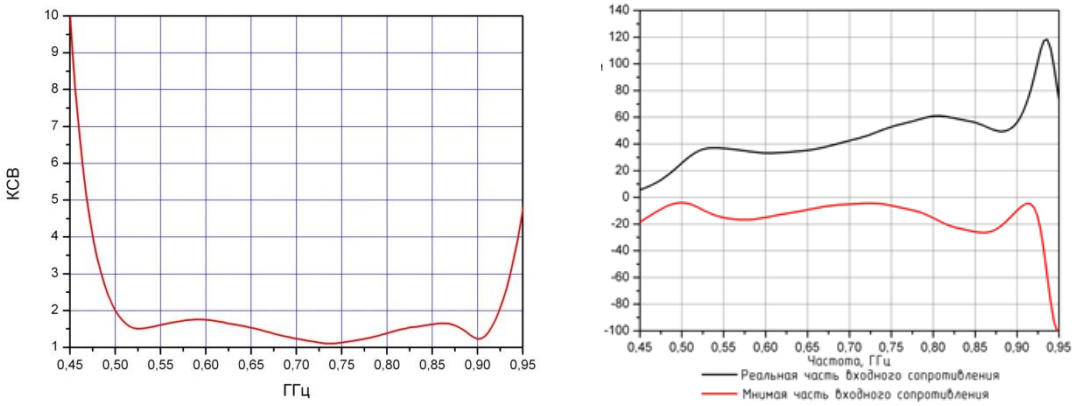


Рис. 5. Модель щелевой антенны с пассивными щелями
1 – пластина; 2 – коаксиальный кабель; 3 – диэлектрик;
4 – центральный проводник; 5 – согласующий отрезок; 6 – пассивные щели



а) б)

Рис. 6. Зависимость от частоты КСВ и входного сопротивления щелевой антенны с пассивными щелями: а) зависимость КСВ от частоты,
б) зависимость входного сопротивления антенны

Благодаря применению пассивных щелей (рис. 6а) полоса согласования щелевой антенны увеличилась в два раза по сравнению с полосой согласования щелевой антенны без пассивных щелей.

На рис. 6б представлены зависимости от частоты ReZ и ImZ входного сопротивления Z щелевой антенны. Зависимость ReZ от частоты характеризуется наличием участка от 500 до 900 МГц, на котором значение реальной части входного сопротивления равно 50 ± 10 Ом; за пределами этого участка, в области низких частот, ReZ убывает, а в области высоких частот наблюдается резкое возрастание ReZ, максимальное значение которого равно 119 Ом.

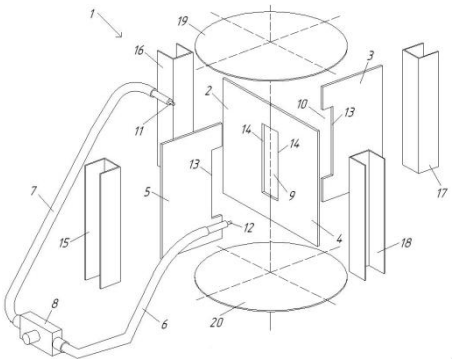
Зависимость ImZ от частоты характеризуется участком от 475 до 910 МГц, на котором значение ImZ изменяется в пределах от минус 25 до 0 Ом, т.е. мнимая часть входного сопротивления, скомпенсирована

в более широкой полосе частот, чем в антенне без пассивных щелей. За пределами этого участка в области низких частот, ImZ убывает, в области высоких частот, значение ImZ резко убывает, на частоте 950 МГц достигает значение минус 100 Ом.

Полоса согласования щелевой антенны без пассивных щелей составляет 150 МГц, т.е. 0,3 $f_{ср}$; при введении пассивных щелей ширина полосы согласования увеличилась до 400 МГц, что составляет 0,6 $f_{ср}$, где $f_{ср}$ – средняя частота диапазона.

Две ортогонально расположенных в пространстве двухсторонних щелевых антенны, запитанных в квадратуре, были применены авторами для построения широкополосной щелевой турникетной антенны [3].

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен макет турникетной щелевой антенны. Макет 1 (рис. 7) состоит из первой 2, второй 3, третьей 4 и четвёртой 5 пластин, двух фидеров 6 и 7, делителя мощности 8 на два направления. Пластины 2–5 выполнены из лужёной жести толщиной 0,3 мм. Макет изготовлен следующим образом. Были изготовлены два экземпляра пластины размером 400 х 380 мм$^{2.}$. В центре каждой пластины параллельно стороне длиною 400 мм прорезана щель с размерами 275х20 мм^2. Первый экземпляр изготовленной пластины применён в образце в качестве первой 2 и третьей 4 пластин с первой щелью 9.



а) макет турникетной антенны в разобранном виде

б) фотография макета турникетной антенны

Рис. 7. Макет щелевой турникетной антенны

Для выполнения второй 3 и четвёртой 5 пластин второй экземпляр изготовленной пластины был разрезан по прямой линии, совпадающей с осью щели. Полученные две пластины 3 и 5 припаяны к первому экземпляру пластины с образованием второй щели 10 с краями 13. В результате получено устройство, имеющее в плане вид креста. Двугранные углы, образованные пластинами, каждый равен 90º. К первой пластине рядом с краем 14 щели 9 припаяна оплётка фидера 7 – коаксиального кабеля РК-50-2-21; на участке непосредственно за краем 14 внешний проводник кабеля

удалён, центральный проводник 11 коаксиального кабеля 7 продолжен в область щели 9 и припаян к центральному проводнику первого согласующего отрезка кабеля, внешний проводник которого припаян ко второй пластине 3 (на рис. не показано). Расстояние от места припайки оплётки кабеля к пластине до узкой (нижней) кромки щели равно 55 мм. К пластине 5 в окрестности кромки 13 щели 10 припаяна оплётка фидера 6 – коаксиального кабеля РК-50-2-21; на участке непосредственно за кромкой 14 внешний проводник кабеля удалён, центральный проводник 12 кабеля продолжен в область щели и припаян к центральному проводнику второго согласующего отрезка кабеля, внешний проводник которого припаян к четвёртой пластине 3 (на рис. не показано) [2]. Места распайки фидеров к пластинам разнесены по разные стороны от центра щелей.

В качестве делителя мощности 8 на два направления использован 3 дБ квадратурный направленный ответвитель на связанных полосковых линиях, который, как известно, обеспечивает деление мощности на две равные части и 90º сдвиг по фазе между выходными сигналами.

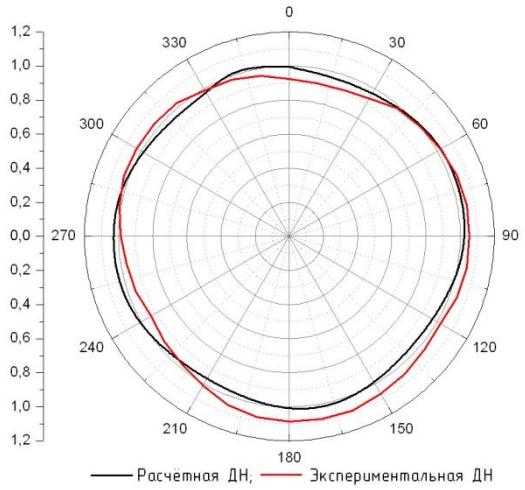


Рис. 8 Диаграммы направленности в плоскости E турникетной щелевой турникетной щелевой антенны

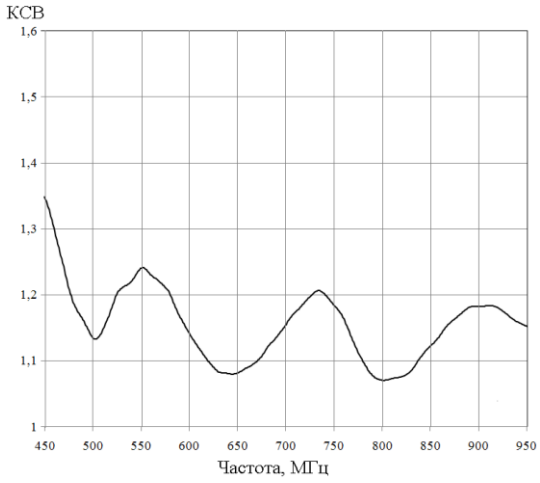


Рис. 9 Зависимость от частоты КСВ щелевой турникетной антенны

На рис. 8 приведены нормированные расчётная и экспериментальная ДН щелевого турникетного излучателя. Нормировка диаграммы выполнена относительно среднеквадратичного уровня напряжённости электрического поля в плоскости вектора E.

Из рассмотрения графиков на рис. 8 видно, что ДН турникетной антенны практически симметричны относительно направления, составляющего угол 45^0 относительно пластин со щелями; отклонения экспериментальных ДН антенны от круга не превышают величину ±1.2дБ.

Измеренная на макете турникетной антенны зависимость КСВ от частоты приведена на рис. 9.

Заключение

1. Показано, что согласование щелевой антенны с коаксиальным кабелем при известном ранее устройстве возбуждения антенны, при котором внешний проводник кабеля гальванически соединён с одним краем щели, а центральный проводник гальванически соединён с другим краем щели, выполняется в полосе частот, составляющей примерно 5 % от средней частоты рабочего диапазона частот.

2. Применение согласующего устройства в виде отрезка коаксиального кабеля с режимом холостого хода на конце позволяет увеличить полосе частот согласования примерно до 30 % от средней частоты рабочего диапазона частот.

3. Применение согласующего устройства в виде отрезка коаксиального кабеля с режимом холостого хода на конце и пассивных щелей позволяет увеличить полосу частот согласования примерно 60 % от средней частоты рабочего диапазона частот.

4. Щелевая турникетная антенна формирует практически круговую диаграмму направленности в горизонтальной плоскости с горизонтальной поляризацией поля излучения и обеспечивает широкую полосу согласования антенны с фидером.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта по договору №02.G25.31.0046 между Минобрнауки РФ и ОАО «ЧРЗ Полет» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – ЮУрГУ (НИУ)

Библиографический список

1. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. Вузов/ Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

2. Широкополосная турникетная антенна: пат. 2401492 Рос. Федерация МПК[7] H 01 Q 13/ 00 / Войтович Н.И., Клыгач Д.С., Репин Н.Н. – № 2009133771/07, 08.09.2009. приоритет 08.09.2009.

3. Voytovich N.I., Klygach D.S., Repin N.N. Slot turnstyle antenna. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE Xplore. pp. 1209–1212.

К содержанию

УДК 621.396.67

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПЛОСКОЙ РЕЗОНАТОРНОЙ АНТЕННЫ ПОЛОСКОВОЙ ЛИНИЕЙ

И.А. Думчев, Н.И. Войтович

В результате проведенных исследований получена электродинамическая модель плоской резонаторной антенны, возбуждаемой полосковой линией передачи. Изучено поведение характеристик направленности антенны в зависимости от коэффициента передачи верхней стенки резонатора, выполнена проверка оптимальности выбора размера излучающих отверстий решетки. Исследовано согласование плоской резонаторной антенны с фидером.

Ключевые слова: резонаторная антенна; полосковая линия; объемный резонатор; частично прозрачная стенка; согласование.

Современная наука и техника характеризуется активным развитием беспроводных технологий. В связи с бурным прогрессом в данной отрасли весьма актуальной является задача разработки антенн, обладающих малыми массогабаритными параметрами, большим коэффициентом усиления, часто наличием круговой поляризации, высоким уровнем согласования антенны с фидером. Данным требованиям удовлетворяют плоские антенны. В зарубежных странах многие фирмы в течение последних двадцати лет занимаются разработкой плоских антенн. Но известные конструкции таких антенн имеют довольно существенные недостатки, поскольку в них применяются печатные излучатели и микрополосковые линии передачи.

Авторами ведутся исследования, конечной целью которых является разкаботка конкурентоспособных отечественных антенн нового типа, свободных от недостатков существующих аналогов. Это плоские антенны на основе объемного резонатора с частично прозрачными реактивными стенками. Один из объектов исследований – антенна, предложенная в патенте [1], предназначенная для работы в качестве излучающего элемента плоской антенной решетки для приема телевизионного сигнала со спутника в диапазоне 12 ГГц (рис. 1). Плоские резонаторные антенны имеют целый ряд неоспоримых достоинств, главные из которых – простота конструкции и преимущество электродинамических характеристик по сравнению с антеннами известных типов [2].

Исследуемая антенна представляет собой прямоугольный металлический резонатор, на верхней стенке которого прорезана система прямоугольных излучающих отверстий 5. Она состоит из пяти областей, ограниченных металлическими стенками резонаторов, а также входными и выходными апертурами отверстий. Предполагается, что в модели антенны границы областей и поверхности конструктивных элементов являются идеально проводящими, а потери энергии в диэлектриках отсутствуют.

Область 1 – резонатор с размерами a_1 x b_1 x h, высота h которого существенно меньше длины волны. В среднем сечении резонатора ($z = h/2$) размещена полосковая линия передачи. Область 2 – прямоугольный резонатор с размерами a_2 x b_2 x H, на верхней стенке которого размещены излучающие отверстия 5, а на нижней – отверстие связи 4. Отверстие связи 4 ограничено металлическими стенками и окружено реактивными штырями. Область 3 – внешнее по отношению к антенне пространство.

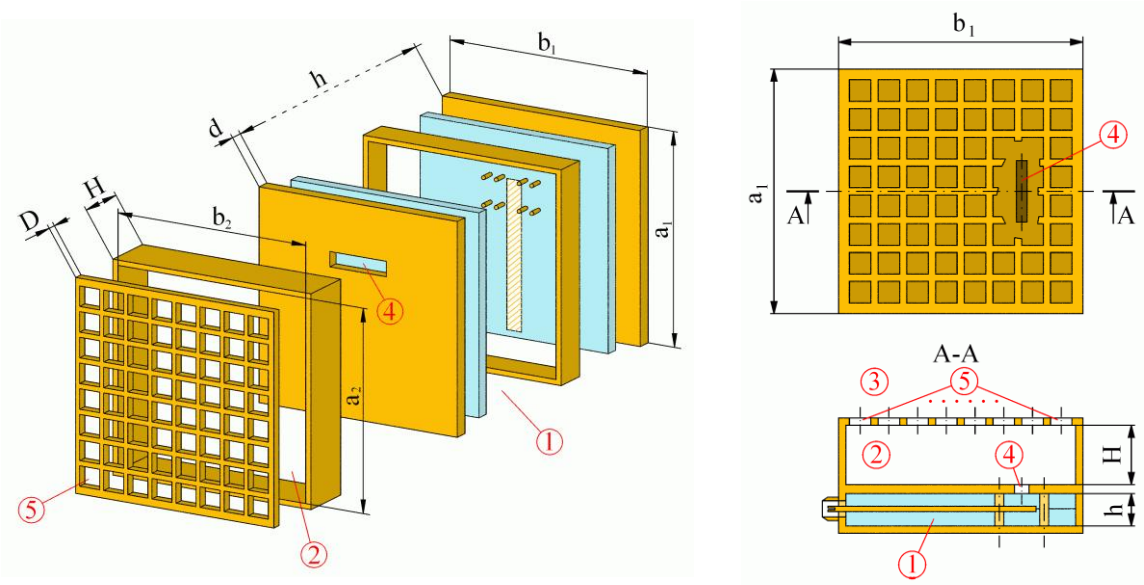


Рис. 1. Плоская резонаторная антенна с частично прозрачной стенкой:
1 – проходной резонатор; 2 – прямоугольный резонатор, на верхней стенке которого размещены излучающие отверстия 5 (частично прозрачная стенка), а на нижней – отверстие связи 4; 3 – внешнее по отношению к антенне пространство

Исследовано явление передачи электромагнитных волн через крышку антенны в виде тонкого экрана, сделанного из металлической периодической решетки (рис. 2). Для количественной характеристики прозрачности решетки антенны используется коэффициент передачи T электромагнитной энергии. Он характеризует напряженность электрического поля волны, прошедшей сквозь периодическую структуру, и зависит от формы и геометрических размеров элементов решетки (рис. 3).

В первоначальном варианте конструкции антенны [1] размеры злучающих отверстий решетки были подобраны экспериментально. В результате исследований изучено влияние величины коэффициента передачи на характеристики направленности плоской резонаторной антенны (зависимость коэффициента направленного действия (КНД) в диапазоне частот, амплитудные диаграммы направленности) и проведена проверка оптимальности выбора размера излучающих отверстий решетки. Для этого сначала были рассчитаны характеристики направленности для исходного размера излучающих отверстий (c=8 мм).

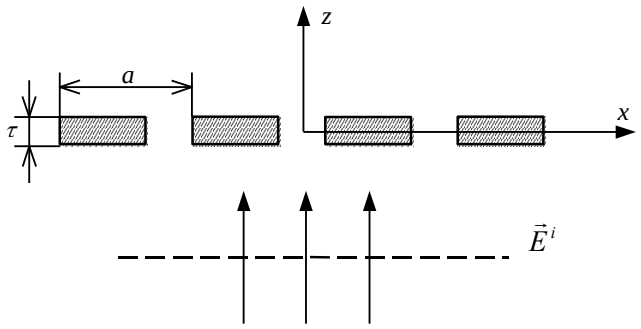


Рис. 2. Металлический экран, освещенный падающей плоской волной:
τ – толщина экрана; а – период решетки

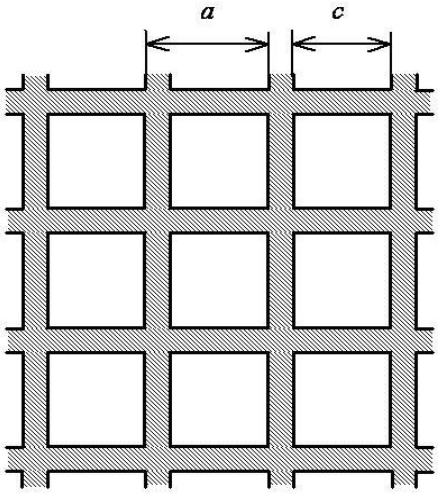


Рис. 3. Фрагмент крышки резонаторной антенны,
выполненной в виде металлической периодической решетки:
a – период решетки; *c* – размер излучающего отверстия

Величина коэффициента передачи T получена аналитически с применением программного пакета MATLAB по приближенной формуле Чена, приведенной в [3]. Далее менялась прозрачность решетки путем изменения размера c излучающих отверстий и рассчитывались характеристики направленности. Проведено сравнение КНД в диапазоне частот и диаграмм направленности в плоскостях векторов напряженности электрического поля $\vec{E}$ и магнитного поля $\vec{H}$ для различных значениях параметра c. В результате выяснено, что оптимальные для работы характеристики направленности обеспечивает решетка, у которой размер излучающих отверстий равен 8 мм при шаге решетки 11,25 мм. То есть размер данного элемента конструкции изначально был выбран оптимальным. Величина коэффициента передачи при этом равна 0,42.

Среди всех требований к антеннам современных радиосистем решающее значение имеют два: направленность действия и минимальные потери электромагнитной мощности при работе в режиме приема-передачи. Обеспечение выполнения второго требования полностью зависит от построения антенно-фидерного тракта, согласования фидерной линии с антенной. Слово «фидер» происходит от английского «to feed» – питать. Фидер не всегда можно непосредственно подключить к антенне, минуя согласующее устройство. Вопрос его выполнения – один из основных при конструировании антенн. Он направлен главным образом на уменьшение потерь в фидере путем обеспечения в нем режима, близкого к режиму бегущей волны. Основная фидерная линия, как правило, самая протя-женная. Поэтому именно ее желательно возможно лучше согласовать с нагрузкой (антенной). Целью согласования является выполнение сразу двух условий:

– добиться отсутствия реактивной составляющей во входном сопротивлении антенны на резонансной частоте (12,5 ГГц);

– добиться равенства волнового сопротивления антенны и фидера.

Если эти условия выполняются в месте запитки антенны (точка соединения антенны с фидером), то фидер работает в режиме бегущей волны.

Для того, чтобы предложить конкретные способы согласования данной резонаторной антенны, сначала изучен процесс перехода электромагнитной энергии от полосковой линии в область резонатора, который позволяет объяснить механизм возбуждения щели (отверстия связи). В результате было выяснено, что реактивные штыри в антенне, которые окружают отверстие связи и замыкают экраны полосковой линии, не справляются со своей функцией. Роль данных штырей – предупредить распространение электро-магнитной энергии в нижней области антенны (т.е. локализовать ее в области отверстия связи) при возбуждении объемного резонатора полосковой линией передачи.

С этой целью посредством электродинамического моделирования [4] вычислены и проанализированы анимационные картины поля в сечении антенны, проходящем чуть выше полосковой линии передачи, в случае, когда отверстие связи окружено штырями (рис. 4). Такой анализ проведен для подобранного значения выступа полоски за центр щели на частоте, когда наблюдается согласование (12,5 ГГц), и для частоты, когда оно отсутствует, например, 12 ГГц (рис. 5).

На рис. 6а и 6б приведены изображения анимационных картин поля в момент времени с фазой π для подобранного выступа полосковой линии за центр щели на частотах 12,5 и 12 ГГц, соответственно.

Анализ приведенных картин электромагнитных полей позволяет сделать очень важный вывод. Когда отверстие связи окружают металлические штыри, то в случае и хорошего, и плохого согласования антенны с фидером в нижней области наблюдаются стоячие волны.

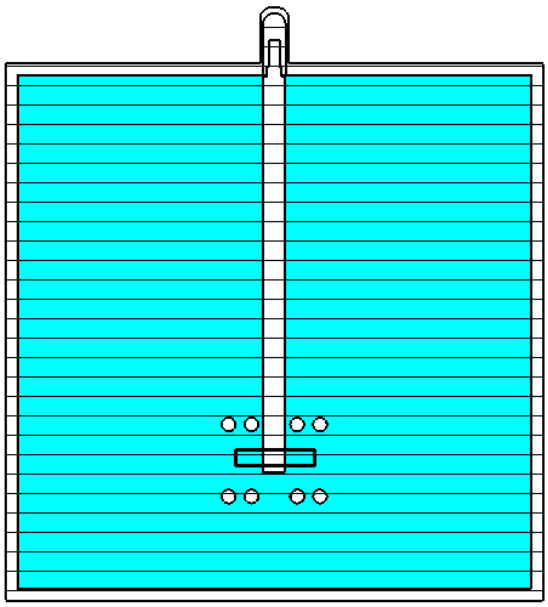


Рис. 4. Сечение антенны в плоскости полосковой линии, окруженной металлическими штырями

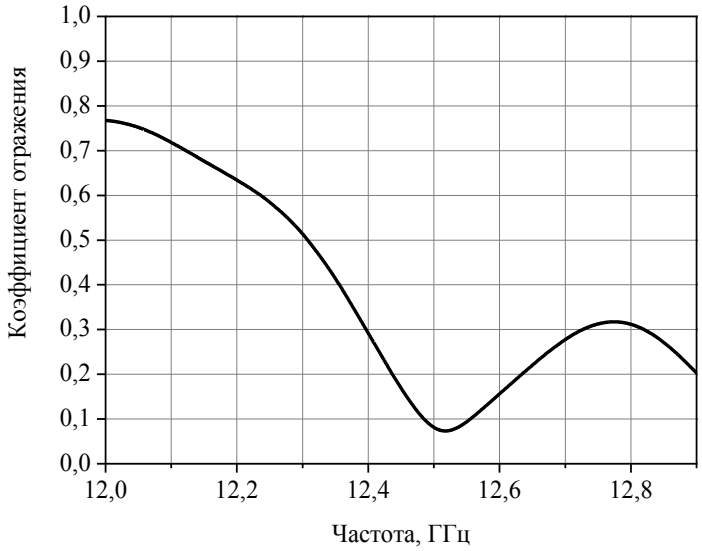
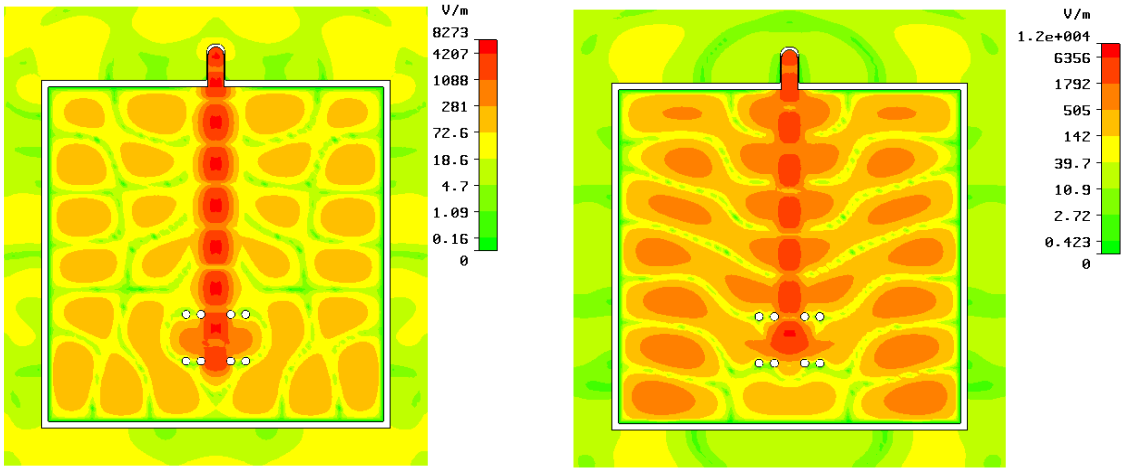


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от частоты для подобранного значения выступа полоски за центр щели

Этот факт означает, что нижняя область антенны в этом случае работает как резонатор, в результате чего нижняя и верхняя области начинают обмениваться между собой электромагнитной энергией. То есть штыри не выполняют своего первоначального назначения. Если теперь такую резонаторную антенну использовать в качестве излучающего элемента в антенной решетке, то боковые стенки антенны (назовем их периферийными экранами) необходимо удалить. Но тогда срываются колебания во внутренней области, а стало быть, нарушается согласование полосковой линии с антенной. В результате антенная решетка не обеспечит получение максимального коэффициента направленного действия.



а) б)

Рис. 6. Структура поля в момент времени с фазой π в сечении антенны, проходящем чуть выше полосковой линии передачи:
а) на частоте 12,5 ГГц; б) на частоте 12 ГГц

Очевидно, что с целью решения проблемы согласования резонаторной антенны с фидером необходимо в процессе запитки объемного резонатора полосковой линией передачи сначала локализовать электромагнитную энергию в области отверстия связи. Далее предложить конкретные способы согласования антенны. Решению данных задач будут посвящены дальнейшие исследования.

Таким образом, необходимо продолжить проведенные исследования с целью решения проблемы согласования и устранения выявленных недостатков в исследуемой конструкции резонаторной антенны.

Библиографический список

1. Planar antenna: евр. пат. 0489934: МКИ H 01 Q 13/18 / Voytovich N. I. and others.; the Research institute on measuring technology, Chelyabinsk, Russia. – НКИ RU 2016444.

2. Думчев, И.А. Плоская резонаторная антенна с частично прозрачной поверхностью / И.А. Думчев // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Часть. 1 – С. 228–230.

3. Lee, S., Zarrillo G., Law C. Simple formulas for transmission through periodic metal grids or plates / S. Lee, G. Zarrillo, C. Law // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1982. – V. AP-30, № 5. – Pp. 908.

4. Потапов, Ю.В. CST Microwave Studio 5.0 / Ю.В. Потапов // EDA EXPERT. – 2004. – Вып. 4. – С. 36–41.

К содержанию

УДК 621.396.67.08

ИТЕРАТИВНАЯ РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ В ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ АНТЕНН

А.Б. Хашимов

Задача восстановления диаграммы направленности антенной системы в строгой электродинамической постановке сформулирована в виде системы функциональных уравнений I рода. Предложен метод численного решения системы уравнений по ограниченному множеству результатов измерений амплитудно-фазового распределения поля в ближней зоне. Для согласования размерностей определяемых распределений токов и результатов измерений в ближней зоне предложены эффективные интерполяционные схемы. Применение итеративной регуляризирующей процедуры позволяет получить устойчивые решения некорректной задачи с приемлемой точностью при наличии случайных погрешностей измерений.

Ключевые слова: сплайн-интерполяция, функциональные уравнения, итеративная регуляризирующая схема.

Определение диаграммы направленности (ДН), поляризационных свойств, коэффициента направленного действия (КНД) антенн в заданной полосе частот амплифазометрическим (радиоголографическим) методом основано на применении целого комплекса мер по преобразованию результатов измерения ближнего поля антенны в поле излучения в дальней зоне [1]. Поиск оптимальных алгоритмов восстановления ДН антенн в дальней зоне по измерениям в ближней зоне на поверхностях, вид и форма которых определяются специфическими свойствами измеряемой антенны и условиями измерений, может значительно расширить возможности радиоголографического метода.

Для построения математической модели (ММ) задачи восстановления ДН в дальней зоне и определения амплитудно-фазового распределения (АФР) возбуждения антенны по результатам измерений поля излучения в ближней зоне будем использовать строгие электродинамические соотношения. Такие задачи в электродинамике относятся к классу обратных задач, но с одной очень важной особенностью – все геометрические размеры измерительной схемы считаются известными с заданными пределами погрешностей их определения. Кроме того, при построении ММ необходимо учитывать, что задачи восстановления АФР имеют принципиальную особенность – результаты измерения полей определяются экспериментально, поэтому они искажены помеховыми полями и измерительными погрешностями, которые имеют случайный характер, статистические характеристики которых зачастую неизвестны. Это озна-

чает, что функциональные уравнения восстановления АФР антенны и ДН в дальней зоне относятся к некорректным уравнениям [2], для решения которых должны быть использованы методы регуляризации. Будем считать, что на произвольной незамкнутой поверхности S_d задано множество точек с координатами $(x_n, y_n, z_n), n = \overline{1:N}$, при этом координаты точек определены со случайными ошибками $(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$. Тогда $(x_n, y_n, z_n) = (x_n^e, y_n^e, z_n^e) + (\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$, где (x_n^e, y_n^e, z_n^e) – точные координаты. Это множество точек определяет измерительную сетку. Рассмотрим вариант построения измерительной схемы, когда в качестве зонда используется электрический диполь. В [1] показано, что в этом случае ток и напряжение, возбужденные в диполе, пропорциональны напряженности той компоненты вектора электрического поля, вдоль которой ориентирована ось диполя. Такой зонд позволяет непосредственно измерить относительное распределение компонент тангенциальной составляющей $\mathbf{E}_\tau$ к поверхности S_d. При этом зонд необходимо располагать так, чтобы в каждой точке поверхности измерений S_d его ось лежала в плоскости, касательной к этой поверхности, и была ориентирована соответственно поляризации измеряемого поля. При расположении зонда на расстоянии несколько длин волн от антенны его влияние на результаты измерений пренебрежимо мало [1]. Необходимо отметить, в рассматриваемой измерительной схеме фактически измеряются не составляющие вектора поля в ближней зоне, а комплексные амплитуды сигнала зонда, соединенного со входом приемника [1]. Это требует дополнительного преобразования результатов измерений с учетом характеристик самого зонда.

Пусть в точках (x_n, y_n, z_n) с помощью зонда измерены АФР составляющих вектора напряженности электрического поля E_{xn}, E_{yn}, E_{zn}, также определяемые со случайными ошибками. Без ограничения общности будем считать, что исследуемая антенна представляет собой идеально проводящую поверхность S_a, на которой распределен поверхностный ток $\mathbf{j}$. В случае сложной антенной системы поверхность S_a представляет собой совокупность нескольких поверхностей. Введем координаты точек (x'_m, y'_m, z'_m) на поверхности S_a, которые определяются с погрешностью. В этих точках будут определяться составляющие поверхностного тока (j_{xn}, j_{yn}, j_{zn}). Отметим, что по условиям рассматриваемой задачи восстановления всегда $N \neq M$, при этом $N < M$, так как известные критерии оценки точности численного решения краевых задач электродинамики требуют декомпозиции поверхности S_a на конечные элементы с размерами сторон не менее $\lambda/10 ... \lambda/15$, что для антенн больших электрических

размеров может приводить к числу измерений N в несколько тысяч. Реализовать такие измерительные схемы технически очень сложно, поэтому необходимо применение таких методов восстановления, когда размерность цифровых массивов результатов измерений ограничена и не зависит от общей размерности дискретной ММ антенны.

Введем функциональные уравнения следующего вида [3]:

$$E_x = \frac{Z_c}{ik}\int\limits_{S_a}\left[\quad j_x\left(2B_r + \frac{r_y^2 + r_z^2}{r}D_r\right) - j_y\frac{r_x r_y}{r}D_r - j_z\frac{r_x r_z}{r}D_r\right]ds';$$

$$E_y = \frac{Z_c}{ik}\int\limits_{S_a}\left[-j_x\frac{r_x r_y}{r}D_r + j_y\left(2B_r + \frac{r_x^2 + r_z^2}{r}D_r\right) - j_z\frac{r_y r_z}{r}D_r\right]ds'; \qquad (1)$$

$$E_z = \frac{Z_c}{ik}\int\limits_{S_a}\left[-j_x\frac{r_x r_z}{r}D_r - j_y\frac{r_y r_z}{r}D_r + j_z\left(2B_r + \frac{r_x^2 + r_y^2}{r}D_r\right)\right]ds',$$

связывающие составляющие АФР восстанавливаемого поверхностного тока **j** с измеренными составляющими вектора напряженности электрического поля, где $Z_c = \sqrt{\mu_a/\varepsilon_a}$ – волновое сопротивление среды; $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$; $r_x = x - x'$; $r_y = y - y'$; $r_z = z - z'$; $(x,y,z),(x',y',z')$ – координаты точек наблюдения и интегрирования, соответственно; $B_r = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{ik}{r} + \frac{1}{r^2}\right)\varphi$; $D_r = \frac{1}{4\pi}\left(\frac{k^2}{r} - \frac{3ik}{r^2} - \frac{3}{r^3}\right)\varphi$; $\varphi = \exp(-ikr)/r$. Подчеркнем, что в системе (1) поверхность измерений S_d может быть произвольной и незамкнутой, а для радиоголографического метода эта поверхность принципиально должна быть замкнутой, с вектором нормали к ней в произвольной точке удовлетворяющим условию непрерывности Ляпунова. В системе (1) уравнения являются не интегральными, а функциональными, так как области определения решения и известной левой части не совпадают, следовательно, операторы задачи не являются фредгольмовыми. Таким образом, ММ задачи восстановления АФР поверхностного тока по заданному распределению вектора напряженности электрического поля на поверхности S_d формулируется в виде системы функциональных уравнений I рода с гиперсингулярными ядрами. Для численного исследования ММ рассматриваемой задачи необходим выбор метода дискретизации системы (1), приводящего к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Этот метод должен учитывать еще одну специфическую особенность ММ, связанную с необходимостью использования квадратурных формул высокой точности, например, Гаусса-

Лежандра с числом узлов не менее 16 и выше. Это требуется для обеспечения необходимой устойчивости численного решения, в значительной степени зависящей от случайных факторов задачи. Поэтому любое повышение точности вычислительных процедур в конечном итоге приводит к дополнительной стабилизации математического моделирования. Для построения дискретной ММ задачи восстановления используем метод моментов [3], в котором выбор базисных и весовых функций соответствуют варианту метода коллокаций. Применение этого метода для численного решения электродинамических задач показывает его высокую эффективность и результативность, удобство для программной реализации.

Важное практическое значение в методах восстановления ДН в дальней зоне по результатам измерений в ближней зоне отводится вопросам организации рациональных интерполяционных схем. Это связано с необходимостью согласования большого количества неизвестных значений АФР распределения токов в правой части (1) – до нескольких тысяч, с ограниченным массивом цифровой радиоголограммы в левой части – не более 300…500. Следовательно, численное решение (1) должно быть построено с использованием такой интерполяционной схемы, которая учитывает как априорную информацию о степени гладкости функции АФР ближнего поля, так и влияние случайных погрешностей измерений в заданных узлах пространственной сетки. Численные эксперименты показали неэффективность алгебраической интерполяции Лагранжа и Ньютона-Грегори, требующих использования полиномов высокой степени. Наилучшие результаты с точки зрения точности приближения и скорости вычислений показали схемы сплайн-интерполяции. С их помощью размерность массива цифровой радиоголограммы с шагом координатной сетки измерений $0,25...0,5\lambda$ может достигать всего несколько десятков при использовании кубических сплайнов. Численные эксперименты для тестовых задач показали приемлемую точность восстановления ДН при небольших затратах компьютерного времени.

Система функциональных уравнений (1) с учетом особенностей дискретизации ММ приводит к СЛАУ, где коэффициенты СЛАУ определяются численным интегрированием соответствующих функциональных зависимостей ядра системы уравнений (1) по поверхностям конечных элементов. Необходимо отметить, что для трехмерных задач большой электрической размерности СЛАУ может иметь очень высокий порядок. В этом случае компьютерные ресурсы являются естественным ограничением возможностей математического моделирования задач восстановления в строгой электродинамической постановке.

На практике достаточно часто встречаются задачи, в которых трехмерные асимптотические представления ДН антенны в дальней зоне соответствуют ДН в плоскости, перпендикулярной оси эквивалентных двумерных

излучателей – случай E-поляризации [4]. Например, для модуля ФАР в виде линейной решетки вибраторов вертикальной поляризации, расположенных над протяженным экраном, соответствующий двумерный аналог имеет вид линейной решетки бесконечно протяженных нитей электрических токов над двумерной идеально проводящей полосой, контур которой образован сечением экрана плоскостью, перпендикулярной оси вибраторов и проходящей через их центры. Тогда в этой плоскости асимптотические представления ДН в дальней зоне будут одинаковыми для этих излучающих систем. Такой частный случай приводит к значительному упрощению системы (1), которая может быть представлена одним уравнением. Будем считать, что ось z совпадает с продольной осью вибраторов, тогда

$$E_z(x,y) = -\frac{i}{4}\int_L j_z(x',y') H_0^2(kr)\, dl', \qquad (2)$$

где L – контур, образованный сечением антенны плоскостью, перпендикулярной оси z; $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$; $H_0^2(kr)$ – функция Ганкеля второго рода нулевого порядка. В идеализированной постановке, когда отсутствуют погрешности определения поля излучения и координат точек, в которых находятся АФР токов, численное решение уравнения (2) может быть получено как прямыми, так и итерационными методами.

Особенностью функциональных уравнений (1), (2) является ярко выраженная неустойчивость численного решения, характерная для некорректных задач. Это подтверждает следующий численный пример. Пусть исследуемая антенна представляет собой линейную ФАР, излучатели – 64 вибратора вертикальной поляризации, расстояние между излучателями $d = 0,62\lambda$, излучатели расположены на расстоянии $h = 0,25\lambda$ от идеально проводящего экрана, размеры которого $40,8\lambda \times 0,72\lambda \times 0,08\lambda$. Переходя к модели эквивалентной двумерной антенны, будем считать, что контур L представляет собой прямоугольник, размеры которого $40,8\lambda \times 0,08\lambda$, а излучатели представляют собой нити электрических токов, расположение и АФР которых совпадает с расположением и АФР линейки вибраторных излучателей. Введем интервал дискретизации контура $\Delta = 0,12\lambda$, в процессе моделирования эта величина может меняться с учетом условий устойчивого численного решения и достижения заданной точности восстановления АФР. На первом этапе будем считать, что все исходные данные определяются точно, то есть все погрешности отсутствуют. Интервал Δ и число излучателей определяют общую размерность ММ. Введем некоторую вспомогательную линию L_d, на которой расположены точки измерений поля излучения антенны, пусть число точек совпадает с размерностью ММ. Подчеркнем, что расположение линии измерений и ее форма могут быть произвольными, например, в [2] предложена схема измерений на ли-

нии, перпендикулярной контуру L и расположенной в стороне от него. Введем исходное возбуждение излучателей ФАР в виде равноамплитудного синфазного распределения. Тогда численное решение ИУ (3) для заданного возбуждения определяет АФР тока на контуре L, при этом точки наблюдения и точки источников принадлежат L. С помощью этого тока в заданных точках L_d можно определить составляющую поля излучения антенны E_z. Пусть L_d без ограничения общности представляет собой прямую, расположенной параллельно контуру L на расстоянии 4λ, расстояние между точками измерений $0{,}1\lambda$. Будем считать, что это поле является исходным для решения обратной задачи восстановления. В отсутствии погрешностей относительное изменение нормы токов прямой и обратной задачи не превышает величины 10^{-6}, что позволяет считать такую задачу устойчивой. На втором этапе введем случайные изменения амплитуды и фазы заданного поля E_z. Будем считать, что случайные изменения имеют равномерный закон распределения. С помощью генератора случайных чисел *rand* и процедуры масштабирования введем аддитивные случайные изменения амплитуды и фазы с относительной погрешностью 10^{-8}. Норма тока в этом случае имеет порядок 10^6 относительно той же величины для устойчивой задачи. Если относительные случайные изменения значений поля имеют величину порядка 10^{-2}, что соответствует практическим методам измерений с повышенной точностью в сверхвысокочастотном диапазоне, то норма восстановленного тока имеет порядок 10^{11}. Следовательно, рассматриваемая задача восстановления АФР тока может быть решена только с использованием методов регуляризации.

Для детализации постановки задачи введем на паре линейных нормированных пространств X, Y линейное операторное уравнение I рода:

$$Ax = y, \tag{3}$$

которое в условиях нарушения корректности по Адамару предполагает, что A^{-1} разрывное (многозначное) отображение. Исходные данные задачи – пара $(A; x)$ известны приближенно с уровнем погрешности δ, h:

$$\|y - y_\delta\| \le \delta, \|A - A_h\| \le \eta(h, x), \tag{4}$$

где $\eta(h, x) \to 0$ при $h \to 0$ на каждом ограниченном подмножестве $D \subset X$. Нам необходимо построить регуляризованное (устойчивое к возмущениям исходных данных) семейство приближенных решений. Обозначим через U множество допустимых возмущений линейного ограниченного оператора. Тогда семейство отображений $R_{\delta h} : Y \times U \to X$ называется регуляризирующим алгоритмом (РА) для решения уравнения (4), если [5]:

$$\sup_{\substack{\|y-y_\delta\|\le\delta \\ y_\delta\in Y}} \sup_{\substack{\|A-A_h\|\le h \\ A_h\in U}} \operatorname{dist}\left\{R_{\delta h}\left(y_\delta,h\right),A^{-1}y\right\}\to 0 \qquad (5)$$

при $\delta,h\to 0$ для любого $y\in R(A)=A(X),A\in L(X,Y)$, тогда:

$$\left\{R_{\delta h}\left(y_\delta,A_h\right),0<\delta\le\delta_0,0<h\le h_0\right\} \qquad (6)$$

называется регуляризованным семейством приближенных решений.

Привлечение априорных сведений при конструировании приближенного решения принципиально необходимо, так как знание уровня погрешностей в (6) достаточно для построения РА в смысле А.Н. Тихонова, устойчивого к возмущениям [6]. Для рассматриваемой задачи восстановления такими априорными сведениями являются допустимые пределы погрешности позиционирования зонда, точностные характеристики измерительной аппаратуры для определения комплексной амплитуды поля в узлах измерительной сетки. Однако сходимость РА может быть сколь угодно медленной, и приближенное решение может плохо аппроксимировать точное.

Широкое применение для приближенного решения некорректной задачи (3) получили одношаговые линейные итерационные схемы [5],[6],[7]. Важным преимуществом итерационных схем является возможность адаптивного выбора параметров регуляризации по результатам пошаговой сходимости, а также удобные численные процедуры организации останова итерационной схемы по заданным критериям с возможностью оперативной коррекции исходных данных, например, изменением параметров и размерности измерительной сетки. Кроме того, при проведении однотипных измерений (проверка соответствия ДН серии исследуемых антенн заданной), набор оптимальных параметров итерационной схемы определяется только один раз, и может считаться базовым и для других типов исследуемых антенн. Общая линейная итерационная схема имеет следующий вид [5]:

$$x_{n+1}=x_n-\mu A_h^{\delta}\left(A_h x_n-y_\delta\right),\ x_0=0,\ 0<\mu<2/\left\|A_h\right\| \qquad (7)$$

где μ – параметр итеративной регуляризации, зависящий от спектра оператора; A_h^* – оператор, сопряженный к A_h.

Большое количество вычислительных экспериментов численного решения задачи (4) с помощью схемы (8) позволяет предложить следующую методику определения оптимального параметра μ.

1. Вводится серия параметров $\mu_1,\mu_2,\ldots\mu_k$. Для рассматриваемой задачи эксперименты показывают, что эти значения находятся в интервале $2\ldots5$.

2. Для этой серии параметров μ последовательно применяется схема (8) для одинакового числа итераций m. Для каждого параметра μ из серии находится невязка квазирешения $\|x_m - x_{m-1}\|$.

3. Из серии вычислительных экспериментов находится оптимальный параметр $\mu_{opt} \to \min\|x_m - x_{m-1}\|$, например, методом интерполяции сеточной функции кубическими сплайнами.

4. Для μ_{opt} проводится прогонка итеративной регуляризирующей схемы с введенным правилом останова, если до его выполнения не произошло прерывание процесса при условии достижения заданной точности восстановления $\|x_i - x_{i-1}\| / x_{\max} < \Delta$.

Большое количество вычислительных экспериментов подтверждают эффективность предложенного метода обработки результатов измерений в ближней зоне антенн.

Библиографический список

1. Бахрах, Л.Д. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д. Бахрах, С.Д. Кременецкий, А.П. Курочкин, В.А. Усин, Я.С. Шифрин. – Ленинград: Наука, 1985. – 272 с.

2. Гармаш, В.Н. Численные методы решения некоторых обратных задач восстановления характеристик излучающих систем по измеренным полям в дальней и ближней зонах / В.Н. Гармаш, Н.П. Малакшинов, В.Ф. Пузанков // Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. – М.: Высшая школа, 1983. – Вып. 5. – С. 98–130.

3. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. – М.: Мир, 1977. – 588 с.

4. Войтович, Н.И. О соответствии асимптотических решений двумерных и трехмерных задач в антенной технике / Н.И. Войтович, А.Б. Хашимов // Радиотехника и электроника. – 2010. – Т. 55. – № 12. – С. 1471–1476.

5. Васин, В.В. Некорректные задачи с априорной информацией / В.В. Васин, А.Л. Агеев. – Екатеринбург: Уральская изд. фирма «Наука», 1993. – 263 с.

6. Бакушинский, А.Б. Итеративные методы решения некорректных задач / А.Б. Бакушинский, А.В. Гончарский. – М.: Наука, 1989. – 128 с.

7. Вайникко, Г.М. Итерационные процедуры в некорректных задачах / Г.М. Вайникко, А.Ю. Веретенников. – М.: Наука, 1986. – 183 с.

К содержанию

УДК 004.896 + 004.032.26

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В ЗАДАЧЕ ФИЛЬТРАЦИИ ОДНОМЕРНОГО СИГНАЛА

Я.О. Анисимов

Рассматривается задача фильтрации сигнала при нелинейном уравнении измерения. Приводится модель шума, уравнения измерения и нейронной сети. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования.

Ключевые слова: нейронная сеть, нелинейная фильтрация.

В настоящее время одним из актуальных направлений в обработки сигналов являются методы нелинейной фильтрации. К традиционным методов в области нелинейной фильтрации относят фильтры калманова типа. К недостатку таких фильтров можно отнести необходимость априорной информации как о модели динамической системы, в которой производятся измерения, так и о модели шумов, присутствующих в измерительным канале. Этих недостатков лишены методы, основанные на использования аппарата «мягких вычислений», и, в частности, нейронных сетей [1–2]. Оценке возможности использования этих методов посвящена эта статья.

Рассматривается задача выделения фильтрации сигнала снимаемого с датчика. Математическая модель измерения описывается уравнением:

$$y=f(x, v), \quad (1)$$

где y – измеряемый сигнал; x – истинное значение сигнала; v – помеха, возникшая в измерительном канале; $f(x,v)$ – модель, в общем случае нелинейная, измерений.

Введем понятие полярности сигнала, под однополоярным сигналом будем понимать такой сигнал, для которого выполняется одно из условий:

$$x(t)>0, \forall\, t \text{ , или} \quad (1)$$

$$x(t)<0, \forall\, t \text{ .} \quad (2)$$

Для простоты в следующих рассуждениях и моделировании будет рассматриваться сигнал, для которого выполняется условие (2).

В качестве модели исследуемого сигнала рассматривается гармонический сигнал с фиксированной частотой. С учетом наложенного ограничения (2) модель сигнала примет вид:

$$x(t)=\sin(2\pi\omega t)+1.5. \quad (3)$$

Рассматриваются следующие модели помех.

- стационарный белый шум. Особенность такого шума заключается в том, что его автокорреляционная функция описывается дельта-функцией Дирака, т.е. белый шум не коррелирован по времени;

• винеровский процесс. Особенностью такого сигнала является то, что он во временной области он описывается дифференциальным уравнением.

Сделаем допущение, что все описанные модели шума являются гауссовскими, и имеют нулевое математическое ожидание и σ=1.

В качестве уравнения измерения рассматриваются следующие модели:

• аддитивная помеха, модель которой описывается следующим уравнением:

$$y=x+v; \quad (4)$$

• мультипликативная помеха, модель которой имеет вид:

$$y=xv. \quad (5)$$

В качестве фильтрующего устройства рассматривается нейронная сеть. Нейронные сети показали свою эффективность для решения задач распознавания образов, за счет своих аппроксимационных свойств. Нейронные сети способны обучаться на основе соотношений «вход-выход», поэтому они могут обеспечить более простые решения для сложных задач. Кроме того, нейроны могут быть нелинейными элементами; следовательно, нейронные сети могут выступать в качестве нелинейных фильтров.

Базовой структурой фильтра выбрана многослойная нейронная сеть («многослойный персептрон»). Математическая модель этой сети описывается уравнением [3]:

$$NN(y)=f^{(2)}\left(W^{(2)}\left(f^{(1)}\left(W^{(1)}\left[y(k)y(k-1)\ldots y(k-m)\right]^T+b^{(1)}\right)\right)\right) \quad (6)$$

где $W^{(i)}$ – матрица весов i-го слоя нейронной сети, $b^{(i)}$ – вектор смещения i-го слоя нейронной сети, $f^{(i)}()$ – функция активации i-го слоя нейронной сети, – входной вектор нейронной сети, $NN(y)$ – выходной вектор нейронной сети.

После проведенного моделирования мы получили результаты, отраженные в таблице.

Таблица

Результаты моделирования

			Модель при обучении			
			Аддитивная помеха		Мультипликативная помеха	
			ССБ	ВП	ССБ	ВП
Модель при работе	Аддитивная помеха	ССБ	0,92	0,88	0,78	0,71
		ВП	0,95	0,98	0,93	0,71
	Мультипликативная помеха	ССБ	0,84	0,83	0,92	0,75
		ВП	0,77	1,13	0,86	0,94

Как видно из таблицы, в большинстве случаев идёт уменьшение случайной составляющей. И более отчетливо это видно при нелинейном характере измерения на этапе обучения. Данное обстоятельство может быть учтено при проектировании алгоритмов фильтрации с априорно неполным нелинейным уравнением измерений.

Библиографический список

1. Безмен, Г.В. Анализ возможности использования нейронных сетей для решения задач фильтрации навигационной информации / Г.В. Безмен // Навигация и управление движение: Сборник докладов IV конференции молодых ученых. – 2002.

2. Васильев, В.А. Сравнение нейросетевых и нечетких алгоритмов на примере решения простейшей задачи байевского нелинейного оценивания / В.А. Васильев // Навигация и управление движением. Материалы XI конференции молодых ученных. – СПб.РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ электроприбор», 2009.

3. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: ИПРЖР, 2000.

К содержанию

УДК 681.586 + 629.7.05

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ДАТЧИКОВ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

В.В. Коваленко

В докладе рассматривается возможность совместной обработки информации от микромеханических чувствительных элементов – измерителей параметров существенно различной физической природы (угловой скорости, ускорения и напряженности магнитного поля Земли) для получения достоверной информации в условиях внешних помех.

Ключевые слова: ориентация; угловая скорость; ускорение; напряженность магнитного поля; помехи.

Современные микроминиатюрные датчики позволяют построить малогабаритную систему ориентации, решающую задачу определения, например таких удобных для использования человеком параметров ориентации, как углы Эйлера, в частности, – направления возможного движения человека-оператора, т.е. курса. Этот параметр чаще всего измеряют по отношению к направлению на географический север в горизонтальной системе

координат, в которой оператора может интересовать не только направление перемещения, но и текущие координаты местоположения. Этим задачам в их совокупности в наибольшей степени соответствует компоновка системы тремя группами датчиков (исполненных по МЭМС технологии): датчики угловой скорости (ДУСы), акселерометры (А) и магнитометры (М) – все либо трёхкомпонентного исполнения, либо включающие по три однокомпонентных датчика для измерения всех составляющих измеряемых векторов [1,2].

Естественно, что упомянутые задачи существенно различаются по сложности в зависимости от условий движения или же покоя основания. Наиболее просто находится решение задачи определения ориентации системы координат, связанной с осями чувствительности приборов, при помощи, например, только датчиков угловой скорости (решением соответствующих уравнений Пуассона при известных начальных условиях).

Структура устройства предполагает использование микромеханических гироскопов и измерителя скорости движения аппарата относительно воды с помощью ЛАГа (измерителя относительной скорости приемлемого исполнения).

Типичная схема системы ориентации и определения местоположения для малогабаритного подводного объекта приведена на рисунке 1.

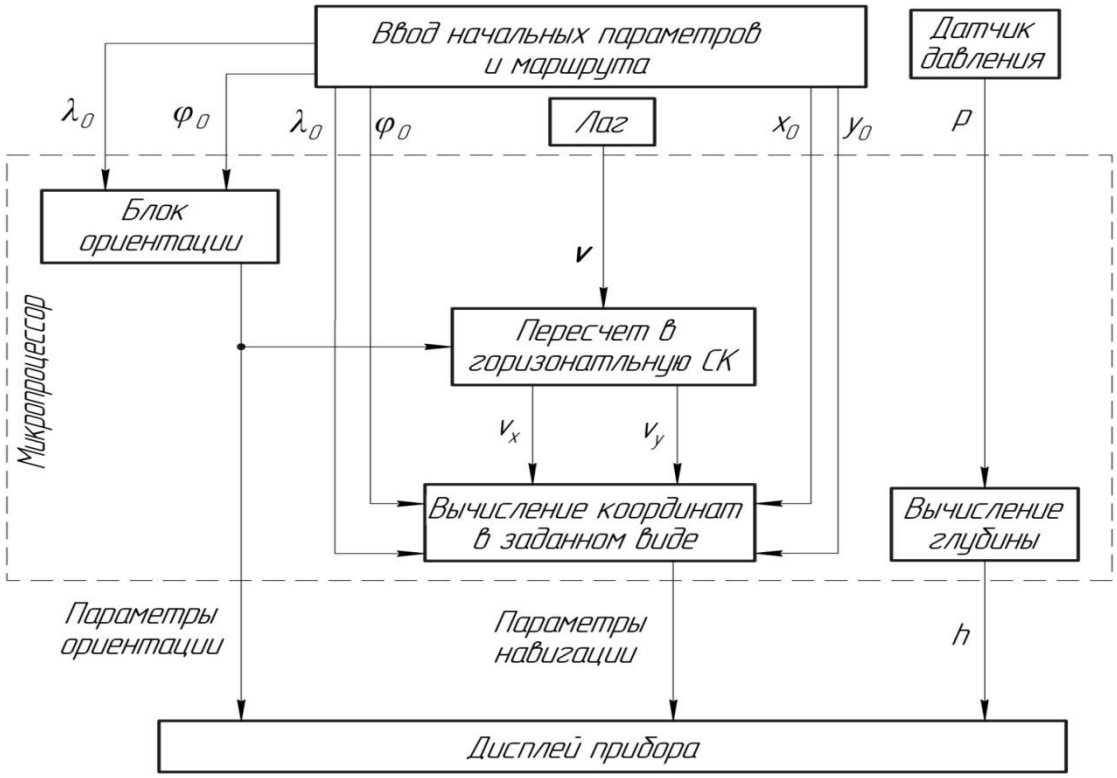


Рис. 1. Схема построения системы

Система предполагает нахождение в конечном счете текущих координат подводного объекта, что требует как введения начальных условий по ориентации связанных осей, так и задания начальных координат объекта (φ, λ).

Положение связанных осей объекта относительно горизонтального географического трехгранника определяется тремя углами, которые традиционно определяются как углы курса, тангажа и крена. При этом относительная ориентация связанного трехгранника в горизонтальной географической системе координат определяется по показаниям ДУСов:

$$\left.\begin{aligned}
\psi &= \int_0^t \frac{1}{\cos\theta}(\omega_z^{отн}\cos\gamma - \omega_x^{отн}\sin\gamma)dt + \psi_0,\\
\gamma &= \int_0^t (\omega_y^{отн} - tg\theta(\omega_z^{отн}\cos\gamma - \omega_x^{отн}\sin\gamma))dt + \gamma_0\\
\theta &= \int_0^t (\omega_z^{отн}\sin\gamma + \omega_x^{отн}\cos\gamma)dt + \theta_0.
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Здесь проекции относительной угловой скорости связанной системы координат (СК) относительно горизонтальной могут быть легко получены с учетом проекций угловой скорости вращения Земли и матрицы взаимной ориентации упомянутых систем координат:

$$A = \begin{pmatrix}
\cos\psi\cos\gamma & \sin\psi\sin\gamma\sin\theta & \cos\gamma\sin\psi+\sin\theta\sin\gamma\cos\psi & \sin\gamma\cos\theta\\
\sin\psi\cos\theta & & \cos\theta\cos\psi & \sin\theta\\
\cos\psi\sin\gamma+\sin\theta\cos\gamma\cos\psi & \sin\psi\sin\gamma & \cos\psi\sin\theta\cos\gamma & \cos\gamma\cos\theta
\end{pmatrix} \qquad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \omega^{отн}{}_x\\ \omega^{отн}{}_y\\ \omega^{отн}{}_z \end{pmatrix} = A\begin{pmatrix} \omega_{X_Г}\\ \omega_{Y_Г}\\ \omega_{Z_Г} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \omega_x^{абс}\\ \omega_y^{абс}\\ \omega_z^{абс} \end{pmatrix}, \qquad (3)$$

где

$$\begin{aligned}
\omega_{X_Г} &= 0;\\
\omega_{Y_Г} &= U\cos\varphi;\\
\omega_{Z_Г} &= U\sin\varphi.
\end{aligned} \qquad (4)$$

Но эта возможность не может быть использована без комплексирования с измеряемыми параметрами иной физической природы – тоже решающими задачу определения ориентации – акселерометрами и магнитометрами, поскольку использование только ДУСов вызывает неприемлемый рост ошибок в течение малого времени применения (во всяком случае для сегодняшнего уровня производства микромеханических гироскопов). В этой связи

представляется более приемлемым измерение курса с помощью магнитометрических чувствительных элементов, если измерять горизонтальные составляющие вектора напряженности (**H**) магнитного поля Земли (МПЗ).

Проекции вектора **H** (H_x, H_y, H_z) на оси связанной системы координат соответствуют показаниям магнитометров, оси чувствительности которых направлены по этим осям. Выражения, связывающие показания магнитометров с известными проекциями вектора напряженности на оси горизонтальной географической системы координат могут быть представлены как:

$$\left.\begin{aligned} H_x &= H_Г \sin\psi_м \cos\gamma - H_{Z_Г} \cos\upsilon \sin\gamma + H_Г \cos\psi_м \sin\upsilon \sin\gamma, \\ H_y &= H_Г \cos\psi_м \cos\upsilon + H_{Z_Г} \sin\upsilon, \\ H_z &= H_Г \sin\psi_м \sin\gamma + H_{Z_Г} \cos\upsilon \cos\gamma - H_Г \cos\psi_м \sin\upsilon \cos\gamma. \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

откуда после преобразований легко получить выражение, которое может быть использовано для вычисления магнитного курса ψМ по показаниям Hx, Hz и измеренному значению угла γ при угле υ=0.

$$H_Г \sin\psi_M = H_x \cos\gamma + H_z \sin\gamma, \quad (6)$$

и определить угол курс ψМ по показаниям Hy и значениям υ при γ=0.

$$\sin\psi_M = \frac{(H_y \cos\gamma + H_z \sin\gamma)}{H_Г}, \quad (7)$$

где Нг – горизонтальная составляющая вектора напряженности МПЗ.

Для горизонтального расположения осей x и y связанной системы координат (при θ=0 и γ=0) курс ψМ можно определить как:

$$\psi_м = arctg \frac{H_x}{H_y}. \quad (8)$$

Очевидно, что при измеренных показаниях магнитометров можно определить магнитный курс с точностью, зависящей от погрешностей измерений компонент магнитометрами.

Пересчет магнитного курса в географический осуществляется на основании информации об угле магнитного склонения ***d***. Вычисление значения угла магнитного склонения может быть осуществлена, если известны координаты объекта: широта φ и долгота λ начальные и текущие, вычисляемые в системе. Тогда курс в географической системе координат определится выражением:

$$\psi = \psi_м + d = arctg \frac{H_x}{H_y} + d. \quad (9)$$

Но измерения проекций горизонтальной составляющей напряженности МПЗ возможны:

а) при горизонтальной ориентации осей чувствительности магнитометров одновременно (и тогда используется выражение 8);

б) либо оси чувствительности магнитометров «проходят» плоскость горизонта поочерёдно, например, при колебаниях измерительных осей относительно плоскости горизонта на качке (и тогда для вычисления курса используются поочерёдно выражения 6 и 7) в моменты прохождения горизонта.

Но решение задачи ориентации осей чувствительности в плоскости горизонта возможно с помощью группы датчиков – акселерометров при прохождении ими положения горизонта при условии отсутствия горизонтального ускорения устройства под действием активных сил, что может потребовать остановки движения основания, например подводного аппарата. Этот способ измерения курса, использующий три группы датчиков является предпочтительным для измерения курса и, как следствие, и для решения задачи определения в дальнейшем текущих координат.

Блок-схема устройства приведена на рис.2.

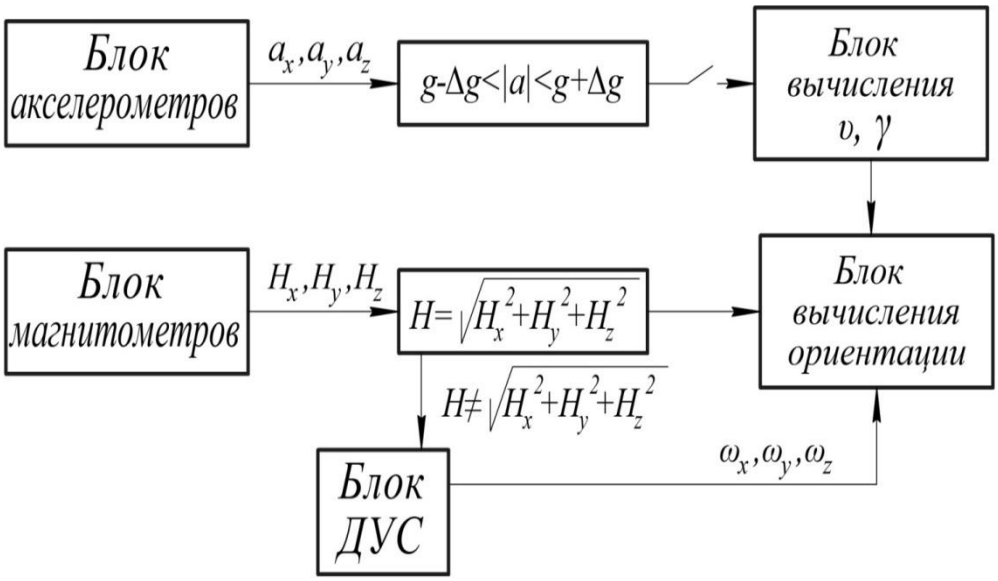


Рис.2. Блок-схема устройства определения ориентации

Одновременно подобная компоновка системы позволяет решить и задачу распознавания возможной помехи, искажающей показания магнитометров.

Условие отсутствия переносного движения основания легко проверяется с использованием выполнения условия:

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = g\,, \qquad (10)$$

где значение g – известное для данных координат места измерений. При этом необходимо учитывать основную погрешность акселерометров, определяемую порогом чувствительности, которая как причина не горизонтальности приведет и к погрешности измерения курса с помощью «горизонтальных» магнитометров.

А выражения для вычисления требуемых параметров ориентации будут:

$$\begin{aligned} a_x &= -g\cos\upsilon\sin\gamma \\ a_y &= -g\sin\upsilon \\ a_z &= -g\cos\upsilon\cos\gamma \end{aligned}, \qquad (11)$$

откуда:

$$\upsilon = \arcsin\left(\frac{a_y}{g}\right); \qquad (12')$$

$$\gamma = \begin{cases} -\arcsin\left(\dfrac{a_x}{g\cos\upsilon}\right), a_z < 0, \\ \arcsin\left(\dfrac{a_x}{g\cos\upsilon}\right) + \pi, a_z > 0, a_x < 0, \\ \arcsin\left(\dfrac{a_x}{g\cos\upsilon}\right) - \pi, a_z > 0, a_x > 0. \end{cases} \qquad (12'')$$

Одновременное использование упомянутых групп датчиков позволяет избежать и погрешностей, вызванных изменением компонент напряженности МПЗ, обусловленных наличием помехи различной по причине, например, подводный затонувший объект, подводный кабель и т.п. В этом случае имеет смысл в качестве оценки существования помехи можно использовать условие:

$$\sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2} \neq H. \qquad (13)$$

В этих условиях определение ориентации связанного трёхгранника имеет смысл осуществлять по показаниям трехкомпонентного ДУСа, используя значения углов ориентации, определённые непосредственно перед обнаружением помехи. Эта задача может решаться в течение короткого промежутка времени (времени прохождения объекта помехи) путём решения известных уравнений Пуассона.

Таким образом, комплексное использование трёх групп датчиков позволяет практически повысить точность определения требуемых параметров ориентации в условиях существования помех, а вследствие этого и по-

высить точность определения текущих координат определения местоположения путем интегрирования показаний ЛАГа, ось чувствительности которого может быть ориентирована по связанной оси «х», ориентация которой и определяется системой ориентации.

Библиографический список

1. Распопов, В.Я. Микросистемная авионика: учебное пособие / В.Я. Раскопов. – Тула: «Гриф и К», 2010. – 248 с.

2. Распопов, В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов / под общ. ред. д-ра техн. наук В.Я. Распопова. – Спб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.

К содержанию

УДК 697.3

ОБЛАСТИ КАЧЕСТВА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЗДАНИЯ

Е.А. Алёшин

Рассматриваются вопросы построения односвязных, выпуклых и ограниченных областей качества функционирования системы теплопотребления как по экспериментальным данным, так и на основе построения математических моделей теплового режима здания.

Ключевые слова: область качества, тепловой режим, функция желательности, система теплопотребления.

На практике при разработке алгоритмов управления довольно часто возникает случай, когда зависимость $F = F(x_1, \ldots, x_n)$ между показателем качества теплового режима (внутренняя температура воздуха в помещениях) и входными и выходными факторами неизвестна, а имеются только значения параметров, полученные в результате контроля качества функционирования процесса. Поэтому возникает необходимость построить область допустимых вариаций параметров системы теплоснабжения (область качества) непосредственно по данным эксперимента без нахождения зависимости $F = F(x_1, \ldots, x_n)$ [1].

Пусть состояние системы теплопотребления описывается вектором входа $\mathbf{X} = \left(x_1, \ldots, x_j, \ldots, x_n\right)$ $\left(j = 1, \ldots, n\right)$ и выходом $\mathbf{Y}$ (температура внутреннего воздуха). Для построения оценки области качества по результатам эксперимента разбиваем множество наблюдений вектора $\mathbf{X}$ на два подмножества:

$$\mathbf{X}' = \left\{\mathbf{X}^i / F(\mathbf{X}) \le \varepsilon;\ i = 1,\ \ldots,\ N'\right\} \text{ и } \mathbf{X}'' = \left\{\mathbf{X}^\gamma / F(\mathbf{X}) > \varepsilon;\ \gamma = 1,\ \ldots,\ N''\right\},$$

где ε – допустимая ошибка выходной координаты **Y**.

Решение задачи построения границы области качества в общем случае может быть затруднительно, поэтому среди всех возможных областей рассмотрим такие, которые с достаточной степенью точности могут быть аппроксимированы поверхностями второго порядка эллипсоидальной формы. Для построения эллипсоидов применяем метод последовательной проекции наблюдений на ортогональные подпространства уменьшающейся размерности [1].

Предполагаем, что область *D* является односвязной, выпуклой и ограниченной. В этом случае для построения эллипсоида достаточно определить его центр $\mathbf{X_0}$, направление осей $U_1, \ldots, U_n$ и их длины $\mu_1, \ldots, \mu_n$.

Алгоритм построения оценки области качества сверху заключается в следующем.

1. За центр эллипсоида возьмем среднее арифметическое всех векторов множества $\mathbf{X}'$: $\mathbf{X_0} = \sum_{i=1}^{N'} \mathbf{X}^i \Big/ N'$.

2. Находим точку X^{S_1}, максимально удаленную от центра $\mathbf{X_0}$: $\max\limits_{X^i \in X'} \left\| \mathbf{X}^i - \mathbf{X_0} \right\| = \left\| X^{S_1} - \mathbf{X_0} \right\| = \mu_1$. Величина μ_1 – длина первой полуоси эллипсоида, а вектор $\mathbf{U_1} = \left(\mathbf{X}^{S_1} - \mathbf{X_0}\right) \Big/ \mu_1$ – направление этой полуоси.

3. Проектируем все точки подмножества $\mathbf{X}'$ на подпространство размерности $n-1$, ортогональное вектору $\mathbf{U_1}$, находим точку X^{S_2}, такую, что:

$$\max_{X^i \in X'} \left\| \mathbf{X}^i - \mathbf{X_0} - \left(\mathbf{X}^i - \mathbf{X_0}, \mathbf{U_1}\right)\mathbf{U_1} \right\| = \left\| X^{S_2} - \mathbf{X_0} - \left(X^{S_2} - \mathbf{X_0}, \mathbf{U_1}\right)\mathbf{U_1} \right\| = \mu_2 .$$

Величина μ_2 – длина следующей по значению полуоси эллипсоида, а вектор $\mathbf{U_2} = \left[X^{S_2} - \mathbf{X_0} - \left(X^{S_2} - \mathbf{X_0},\ \mathbf{U_1}\right)\mathbf{U_1}\right] \Big/ \mu_2$ – направление этой полуоси.

Далее проектируем все подмножество наблюдений на подпространство размерности $n-2$, ортогональное векторам $\mathbf{U_1}$ и $\mathbf{U_2}$ и т.д.

Длину *k*-й полуоси определяем как:

$$\max_{X^i \in X'} \left\| \mathbf{X}^i - \mathbf{X_0} - \sum_{j=1}^{k-1} \left(\mathbf{X}^i - \mathbf{X_0}, \mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j} \right\| = \left\| X^{S_k} - \mathbf{X_0} - \sum_{j=1}^{k-1} \left(X^{S_k} - \mathbf{X_0}, \mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j} \right\| = \mu_k ,$$

а ее направление определяется вектором:

$$\mathbf{U_k} = \left[X^{S_k} - \mathbf{X_0} - \sum_{j=1}^{k-1} \left(X^{S_k} - \mathbf{X_0},\ \mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j} \right] \Big/ \mu_k .$$

Процесс решения заканчивается нахождением последнего вектора $\mathbf{U_n}$.

Эллипсоид $(\mathbf{X}-\mathbf{X_0})^{\mathbf{T}}\mathbf{U}^{\mathbf{T}}\mathbf{M}\mathbf{U}(\mathbf{X}-\mathbf{X_0})=\mathbf{C}$, где $\mathbf{M}$ – диагональная матрица полуосей μ_j, построен по самым дальним удовлетворительным точкам и, следовательно, будет содержать и неудовлетворительные точки. Данный эллипсоид является оценкой области качества сверху.

Для оценки области качества снизу применяем алгоритм построения эллипсоида [1], содержащего только удовлетворительные точки.

1. Найдем точку $\mathrm{X}^{P_1} \in \mathbf{X}''$, минимально удаленную от центра $\mathbf{X_0}$, т.е.:

$$\min_{\mathrm{X}^{\gamma i}\in \mathrm{X}''}\left\|\mathbf{X}^{\gamma}-\mathbf{X_0}\right\| = \left\|\mathrm{X}^{P_1}-\mathbf{X_0}\right\| = \mu_1 .$$

2. Принимаем вектор $\mathbf{U_1}=\left(\mathrm{X}^{P_1}-\mathbf{X_0}\right)\Big/\mu_1$ за направление полуоси μ_1. Очевидно, что все наблюдения $\mathbf{X}''$ лежат вне шара: $\sum_{j=1}^{n}\left(x_j^{\gamma}-x_{j0}\right)^2 \Big/ \mu_1^2 \geq 1$.

3. Растягиваем шар по ортогональным направлениям так, чтобы в него входили только удовлетворительные точки, т.е. находим:

$$\min_{\mathrm{X}^{\gamma}\in \mathrm{X}''} \frac{\left\|\mathbf{X}^{\gamma}-\mathbf{X_0}-\sum_{j=1}^{k-1}\left(\mathbf{X}^{\gamma}-\mathbf{X_0},\mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j}\right\|^2}{1-\sum_{j=1}^{k-1}\left(\mathbf{X}^{\gamma}-\mathbf{X_0},\mathbf{U_j}\right)^2 \Big/ \mu_j^2} = \frac{\left\|\mathrm{X}^{P_k}-\mathbf{X_0}-\sum_{j=1}^{k-1}\left(\mathrm{X}^{P_k}-\mathbf{X_0},\mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j}\right\|^2}{1-\sum_{j=1}^{k-1}\left(\mathrm{X}^{P_k}-\mathbf{X_0},\mathbf{U_j}\right)^2 \Big/ \mu_j^2},$$

а вектор $\mathbf{U_k}=\left[\mathrm{X}^{P_k}-\mathbf{X_0}-\sum_{j=1}^{k-1}\left(\mathrm{X}^{P_k}-\mathbf{X_0},\ \mathbf{U_j}\right)\mathbf{U_j}\right]\Big/\mu_k$ примем за направление полуоси μ_k. Построенный таким образом эллипсоид будет сдержать только удовлетворительные точки и давать оценку области качества функционирования системы теплопотребления снизу.

Построение детерминированной математической модели теплового режима здания проводим на основе методики [2]. Здесь управляющие параметры – расход теплоносителя *Q* и задание на температуру воды в обратном трубопроводе t_2. Возмущающими параметрами являются скорость ветра *V*, интенсивность солнечной радиации *R*, температура наружного воздуха $t_{\text{Н}}$. Задача состоит в том, чтобы построить математическую модель, связывающую значение внутренней температуры $t_{\text{В}}$ в помещениях южного и северного фасада здания с параметрами, воздействующими на исследуемый объект.

Т.к. перебор всех возможных регрессионных уравнений и выбор наилучшего из них довольно затруднителен и требует больших временных затрат, для построения оптимальной модели теплового режима здания применяем специальные алгоритмы регрессионного анализа (методы включения, исключения, шаговый метод). Качество прогноза внутренней темпе-

ратуры и управления тепловым режимом можно существенно повысить, если применить для этой цели нелинейную регрессионную модель, в которой, кроме линейных эффектов связи вход-выход, учитываются и эффекты второго порядка, а также эффекты взаимосвязи факторов, влияющих на тепловой режим здания, между собой.

Полученные модели теплового режима здания используются в дальнейшем для прогнозирования и синтеза обобщенного критерия оптимальности на основе обобщенной функции желательности:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^{n} d_i}$$, где d_i – частные функции желательности.

Обобщенная функция желательности является количественным, однозначным, единым, универсальным, адекватным, статистически чувствительным и эффективным показателем качества теплового режима здания, что обуславливает ее использование в качестве критерия оптимизации.

Путем совмещения линий равного значения функции отклика $D = f(\vec{X},\vec{U})$, полученных для различных соотношений параметров внешней среды $\vec{X}$, учитывая ограничения на факторы $t_{\text{обр}}$ и Q, строится область качества $D_1^{\text{н}}$. Расположенные в этой области номиналы режимных параметров $U_1^{\text{н}}$ и $U_2^{\text{н}}$ (расход воды и температура в обратном трубопроводе) в пределах области $D_1^{\text{н}}$ удовлетворяют требуемому тепловому режиму при минимальных энергозатратах на отопление. Аппроксимируя область качества $D_1^{\text{н}}$ вписанным прямоугольником, определяем номиналы и допуска на режимные параметры $U_1^{\text{н}} \pm \Delta U_1^{\text{н}}$ и $U_2^{\text{н}} \pm \Delta U_2^{\text{н}}$. Эффективность управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности оценивается согласно методике [3, 4], а критерий оптимальности, таким образом, приобретает свойства максимальной параметрической нечувствительности и помехоустойчивости к колебаниям контролируемых и неконтролируемых возмущений в *k*-факторном пространстве.

В работе [3] показано, что процесс взаимодействия теплового режима жилого здания с окружающей средой можно рассматривать как процесс взаимодействия двух подсистем: подсистемы «внешняя среда» и подсистемы «тепловой режим здания».

На входе подсистемы «тепловой режим здания» наряду с управляемыми входными параметрами присутствует некоторое число неуправляемых параметров. Управление тепловым режимом здания в таких условиях является сложной задачей. Поэтому лучшее, что можно сделать в такой сложной ситуации, это разработать некоторую оптимальную стратегию управления, пригодную для всех случаев. Задача определения такой оптимальной стратегии формализована и решается с применением аппарата теории игр [4].

Библиографический список

1. Горячев, Л.В. Построение областей качества по результатам наблюдений / Л.В. Горячев, В.В. Здор // Качество и надежность систем управления. – Владивосток, 1977. – С. 104–110.

2. Чистович, С.А. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель. – Л.: Стройиздат, 1987. – 248 с.

3. Глухов, В.Н. Алгоритм энергосберегающего управления тепловым режимом здания в условиях неопределенности / В.Н. Глухов, Е.А. Алёшин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2007. – № 23(95). – С. 53–54.

4. Глухов, В.Н. Энергосберегающая система автоматического регулирования теплового режима в зданиях / В.Н. Глухов, Е.А. Алёшин // Системы управления и информационные технологии: сб. науч. тр. – Воронеж: ВГТУ, 1998. – С. 190–197.

К содержанию

УДК 621.314.2 :681.5.015.8 + 681.5.015.8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Г.И. Волович, В.П. Щербаков

В статье рассматривается метод измерения сопротивлений обмоток силового трансформатора, основанный на применении методов идентификации, использование которых позволяет существенно сократить требуемое время проведения измерений.

Ключевые слова: идентификация, нелинейный объект, силовой трансформатор.

Широкое применение трансформаторов в промышленных областях и электроэнергетике позволяет достаточно просто преобразовывать и использовать электроэнергию с учетом заданных требований и характеристик подключаемого оборудования. Основным условием для обеспечения качественной и стабильной работы трансформатора является своевременное проведение поверок его характеристик, причем первостепенной задачей является определение сопротивлений обмоток трансформатора.

В настоящее время основным способом определения сопротивления обмотки является подключение к обмотке источника напряжения с последующим непрерывным измерением тока трансформатора в течение определенного промежутка времени.

Так как в состав трансформатора входят не менее двух индуктивно связанных обмоток, то в процессе измерения тока проявляются некоторые нелинейности, обусловленные изменением магнитного потока и характеристиками магнитопровода. Однако изменение величины тока при достаточно длительном измерении в связи с насыщением магнитопровода становится весьма незначительным, что позволяет с заданной точностью определить величину сопротивления исследуемой обмотки.

В реальных условиях процесс измерения сопротивления обмотки с допустимой погрешностью, не превышающей 0,2 %, в зависимости от типа трансформатора может занять несколько десятков минут, что не только повышает дополнительные расходы на проведение обслуживания, но и предъявляет ряд требований к измерительной аппаратуре. В связи с этим основным направлением оптимизации процесса измерения является разработка методов измерения, которые позволят существенно уменьшить время измерения и определить величину сопротивления с допустимой погрешностью 0,2 %.

В основу предлагаемого метода положена идея применения методов идентификации для определения неизвестных величин сопротивлений обмоток трансформатора. Однако за счет того, что протекающие в трансформаторе электромагнитные процессы имеют нелинейные зависимости, возникает ряд сложностей, которые следует устранить. Типовая структурная схема обмотки трансформатора представлена на рис. 1.

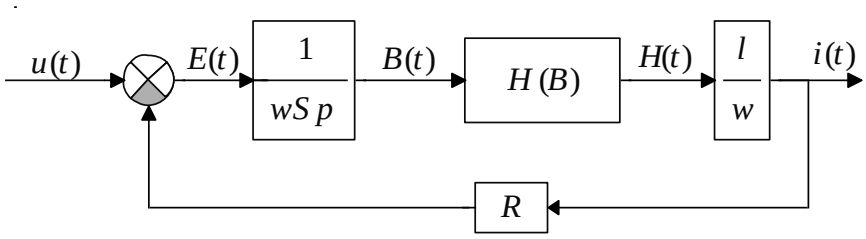


Рис. 1. Типовая структурная схема обмотки трансформатора

Модель обмотки трансформатора построена следующим образом. Так как на вход объекта подается напряжение $u(t)$, то имеется возможность измерить выходной ток $i(t)$ исследуемой обмотки, имеющей число витков w, площадь поверхности S, длину магнитопровода l, а также сопротивление R. Величина ЭДС, которая возникает в исследуемой обмотке, может быть представлена в виде $E(t)=u(t)-i(t)R$, однако за счет эффектов рассеяния и намагничивания ток $i(t)=H(B(t))l/w$ связан с магнитной индукцией B нелинейно. Характеристика напряженности магнитного поля H имеет нелинейную зависимость от магнитной индукции B, которая для холоднокатаной электротехнической стали приближенно описывается формулой:

$$H(B) = 0,36(155B - 9B^2 + 1,04B^{12}).$$

Тогда по известным экспериментальным значениям напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ ставится задача определения трех величин $1/wS$, l/w и R.

Идентификацию параметров нелинейного объекта можно провести с использованием методики, изложенной в [1]. В основу методики положена идея перехода от задачи идентификации объекта к задаче оптимизации определенной целевой функции F. Рассматриваемая методика основывается на многократном проведении процесса моделирования объекта по известной модели со связанными элементами в общем виде и с выбираемыми по алгоритму значениями неизвестных параметров. Алгоритм поиска оптимальных значений параметров построен на основе идей геометрического места точек и метода градиентного спуска.

Предложенную методику идентификации можно использовать для исследования силовых трансформаторов. Например, трансформатор типа ТСЗ-10/0,66 имеет приблизительные значения параметров первичной обмотки: $1/wS$ = 0,93421 м$^{-2}$, l/w = 0,008 м, R = 0,2 Ом, а также параметры вторичной обмотки: $1/wS$ = 1,5435 м$^{-2}$, l/w = 0,013 м, R = 0,074 Ом. Тогда исследование обмоток трансформатора осуществляется следующим обра-зом. По измеряемому току $i(t)=H(B(t))l/w+v(t)$, на который действует шум $v(t)$, описываемый несмещенным нормальным распределением со стан-дартным отклонением 1, и по известному подаваемому на обмотку напря-жению $u(t)$=27 В возможно проведение идентификации значений трех па-раметров обмотки, причем параметр R следует определить с наибольшей точностью. Модель первичной обмотки трансформатора представлена на рис. 2.

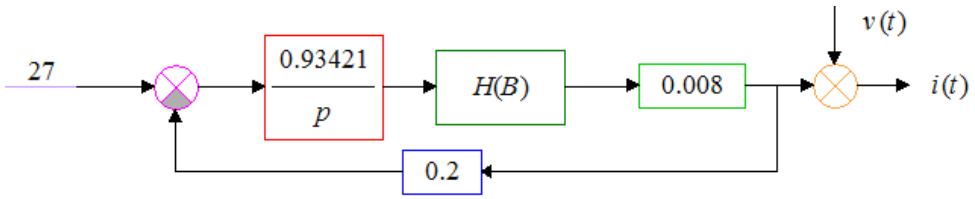


Рис. 2. Структурная схема первичной обмотки трансформатора

Характеристики $B(t)$ и $i(t)$ исследуемого трансформатора представлены на рис. 3.

Идентификация параметров осуществлялась в специализированном разработанном комплексе на вычислительной машине с процессором Intel Core 2 Duo с тактовой частотой 2,2 ГГц, причем временной интервал для идентификации выбран не целиком, а только от 0 до 0,11 секунд (рис. 4).

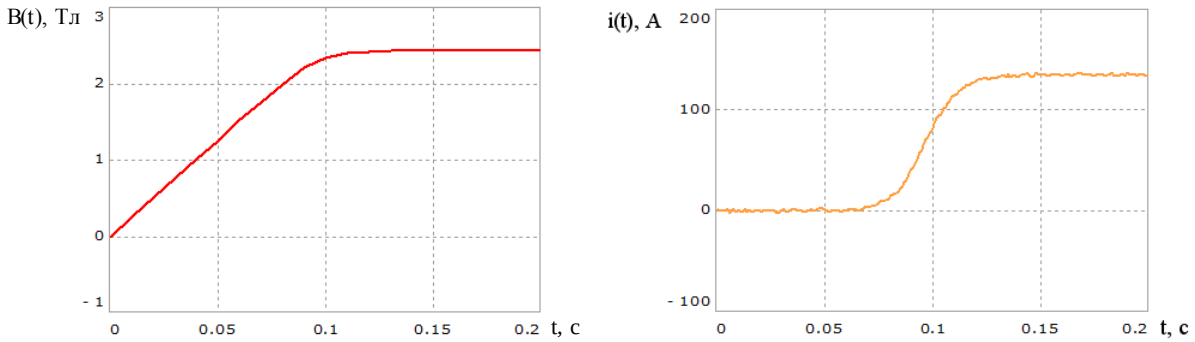


Рис. 3. Зависимость магнитной индукции и тока от времени

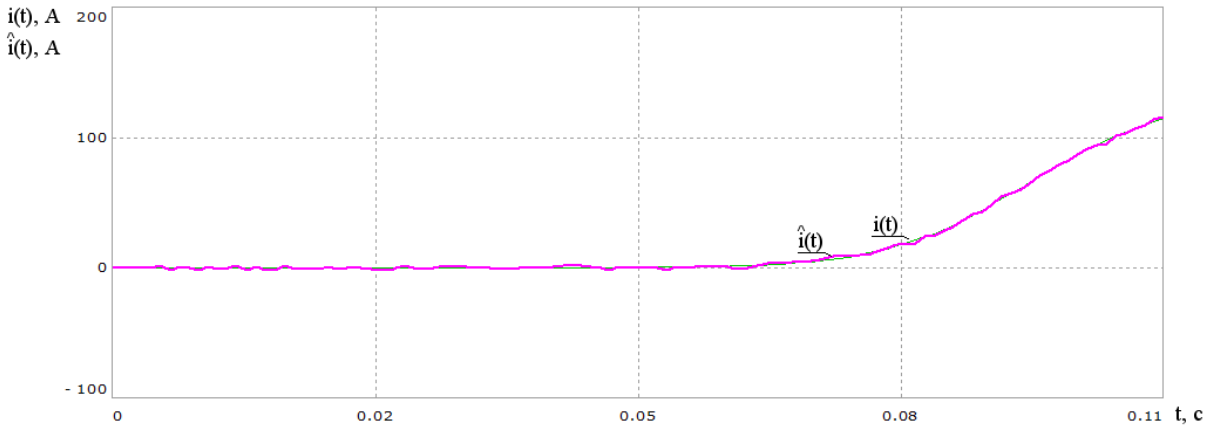


Рис. 4. Исходный и оценочный график выхода исследуемой системы

Численные результаты применения методики идентификации при нулевых начальных значениях параметров сведены в таблицу, в которой указано среднеквадратичное отклонение (СКО) исходного и оценочного графика тока за соответствующее время идентификации в программе.

Таблица 1

Результаты идентификации параметров
первичной обмотки трансформатора

Параметр	Верхнее значение	Оценочное значение за 5 секунд	Оценочное значение за 20 секунд	Оценочное значение за 30 секунд	Погрешность за 30 секунд, %
1/wS	1	0,97000	0,97130	0,97133	3,97
l/*w*	0,02	0,00500	0,00500	0,00500	37,5
R	1	0,19900	0,19950	0,19963	0,18
СКО	–	1,08950	1,07288	1,07277	–

Аналогично проведены исследования вторичной обмотки за временной интервал от 0 до 0,07 секунд, причем переходный процесс зависимости тока составляет 0,1 секунды. Результаты исследований сведены в таблицу.

Таблица 2

Результаты идентификации параметров вторичной обмотки трансформатора

Параметр	Верхнее значение	Оценочное значение за 5 секунд	Оценочное значение за 10 секунд	Оценочное значение за 20 секунд	Погрешность за 20 секунд, %
1/wS	2	1,54233	1,54039	1,54252	0,06
l/*w*	0,02	0,01293	0,01325	0,01302	0,15
R	0,1	0,07362	0,07403	0,07402	0,03
СКО	–	1,11524	1,08463	1,08398	–

Проведенные исследования подтверждают возможность определения величины сопротивления первичной и вторичной обмоток силового трансформатора с допустимой погрешностью 0,2 %.

Таким образом, по известной характеристике тока при помощи разработанной методики идентификации проведена оценка параметров обмоток трансформатора. Погрешность полученных значений сопротивления обмотки не превышает 0,2 %, следовательно, предложенная методика идентификации может быть применена для существенного сокращения времени измерения сопротивлений обмоток трансформатора.

Библиографический список

1. Щербаков, В.П. Метод идентификации моделированием для получения частотной характеристики объектов и систем / В.П. Щербаков // Механика и процессы управления. Том 2. – Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. – М.: РАН, 2011. – С. 238–245.

К содержанию

УДК 681.511.2.037

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИФРОВЫХ МСАР С ИРРАЦИОНАЛЬНЫМИ И ТРАНСЦЕНДЕНТНЫМИ ЗВЕНЬЯМИ

Г.В. Зырянов

Рассматривается унифицированный частотный метод исследования устойчивости линейных систем управления с многосвязной структурой, содержащей (кроме обычных звеньев) дискретные, иррациональные и звенья с запаздыванием.

Ключевые слова: цифровые САР, критерии устойчивости.

Современные системы управления сложными техническими объектами являются: а) дискретными с несколькими частотами дискретизации $f_i = 1/T_i$.; б) многосвязными; в) содержат звенья запаздывания и, возможно, иррациональные звенья. Учет этих факторов настолько усложняет анализ динамических свойств таких систем, что даже для исследования устойчивости приходится применять метод компьютерного моделирования.

Рассмотрим дискретную, в частности, микропроцессорную (МП) многосвязную МП МСАР, у которой частоты f_i для устройств дискретного действия (УДД$_i$) не совпадают, но являются кратными (с коэффициентами кратности n_i) некоторой частоте f_0, а их отношения $f_i/f_j = T_j/T_i = n_i/n_j$ являются *рациональными* числами. При этом периоды дискретизации T_i будут в n_i раз меньше «главного» периода $T_0 = 1/f_0$: $T_i = T_0/n_i$.

Для теоретического исследования таких дискретных САР в [1] применяют замену «идеального ключа» K_i в «эквивалентной схеме замещения» УДД$_i$ на n_i параллельных ветвей. При этом каждая ветвь содержит три последовательно соединенных структурных блока: а) звено упреждения на время $\tau_{ir} = (r - 1)T_0/n_i$, $r = 1, \ldots, n_i$; б) идеальный ключ K_0 с периодом дискретизации T_0; в) звено запаздывания (задержки) на время τ_{ir}.

Получаемая после такой замены «эквивалентная» структурная схема *многократной* дискретной САР формально является одночастотной. Для описания и изучения ее свойств в [1] применяют модифицированное Z-преобразование. При этом теоретическое исследование существенно усложняется, если МП САР многомерная и многосвязная. Трудности получения характеристического полинома дискретной МСАР, а также наличие в ее составе звеньев запаздывания и звеньев с иррациональными передаточными функциями ограничивают применение алгебраических методов.

Подобных ограничений нет у методов частотной области, но они в их традиционном «одномерном» виде оказываются малопригодными для теоретического исследования устойчивости многочастотных МП МСАР.

Более конструктивным является рассматриваемый ниже подход, основанный на получении многомерной «эквивалентной одночастотной» рас-

четной схемы для многочастотной МП МСАР с последующим применением *обобщенного* критерия Найквиста. Метод ориентирован на применение программных пакетов типа MathCad и не требует определения модифицированных *Z*-изображений и трудоемких аналитических преобразований.

Рассмотрим автономную (без внешних воздействий) многочастотную МП САР, состоящую из $N_н$ одномерных линейных непрерывных звеньев $\{ЛДЗ_i\}$ и $N_д$ устройств дискретного действия $\{УДД_i\}$, в число которых, кроме микропроцессорных вычислительных устройств $\{МП\ ВУ_i\}$ могут входить и импульсные элементы $\{ИЭ_i\}$ с АИМ I-го рода. Без потери общности получаемых результатов, будем считать, что каждое отдельное МП $ВУ_i$ в своем составе содержит средства сопряжения с аналоговой частью (АЦП и ЦАП) и используется для реализации только одного алгоритма управления $АУ_i$ с периодом повторения T_i.

В общем случае все устройства МП МСАР (при условии согласования форм представления сигналов) могут произвольным образом взаимодействовать между собой. Но если выходы некоторых УДД непосредственно поступают на входы других УДД, то, без ущерба для результата исследования, их можно «разделить» дополнительными фиктивными непрерывными звеньями с передаточной функцией $W_ф(p)=1$. Для удобства исследования устойчивости такую «расширенную» за счет согласующих непрерывных звеньев МП МСАР представим как объединение непрерывной и дискретной многомерных подсистем (рис.1). При этом внешние воздействия $\mathbf{f}(t)$, не влияющие на устойчивость, предполагаются нулевыми.

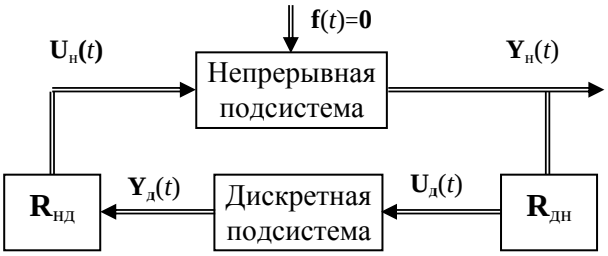


Рис.1. Многомерное представление многочастотной МП САР

Здесь непрерывная подсистема (**Н**) состоит из $N_н$ (с учетом фиктивных непрерывных звеньев!) связанных между собой $\{ЛДЗ_i\}$, а структура их линейных взаимосвязей (зависимость входов звеньев $\{u_i(t)\}$ от выходов $\{y_i(t)\}$) задана числовой матрицей $\mathbf{R}_{нн}$.

Тогда дискретная подсистема (**Д**) будет состоять из $N_д$ не связанных между собой $\{УДД_i\}$, и поэтому матрица их взаимосвязей $\mathbf{R}_{дд}= \mathbf{0}$. Взаимодействие подсистем **Н** и **Д** описывается числовыми матрицами $\mathbf{R}_{нд}$ и $\mathbf{R}_{дн}$.

Предположим также, что передаточные функции $W_i(p)$ для $ЛДЗ_i$ не имеют целых частей (порядки полиномов их числителей не выше порядков знаменателей), но могут содержать множители вида $e^{\pm p\tau}$, $p^{1/2}$ и др.

Традиционная одномерная схема замещения для УДД$_i$, отражающая его особенности по преобразованию сигналов, показана на рис. 2.

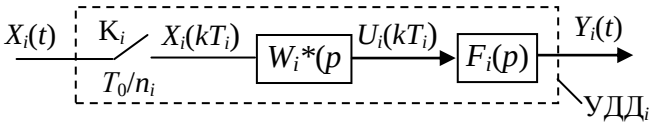


Рис. 2. Одномерная схема замещения для УДД$_i$

Здесь $W_i^*(p) = W_i(e^{pT_i})$ – передаточная функция линейного дискретного динамического звена ЛДДЗ$_i$, которое преобразует дискретный сигнал $X_i(kT_i)$ в другой дискретный сигнал $U_i(kT_i)$, а $F_i(p)$ – передаточная функция формирователя. Если УДД$_i$ – амплитудно-импульсный элемент ИЭ$_i$, то для него $W_i^*(p)=K_{ии}$, а $F_i(p)$ – изображение Лапласа функции формы импульса $F_i(t)$. В том случае, когда УДД$_i$ представляет собой МП ВУ$_i$, то для него $F_i(p)=(1-e^{-pTi})/p$ – передаточная функция фиксатора.

Для исследования устойчивости многочастотных МП САР более удобной является многомерная эквивалентная схема замещения для УДД$_i$, приведенная к основному периоду дискретности T_0 (рис. 3) [3].

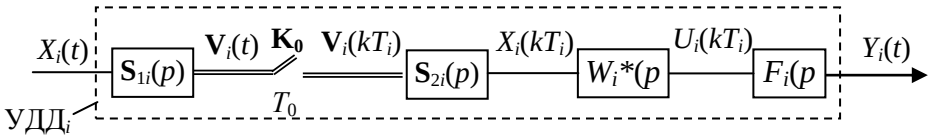


Рис. 3. Многомерная схема замещения для УДД$_i$

Здесь $\mathbf{K}_0$ – многомерный «идеальный» ключ с шагом дискретизации T_0; $\mathbf{S}_{1i}(p)$ и $\mathbf{S}_{2i}(p)$ – передаточные матрицы (столбец и строка, соответственно), формируемые по следующим формулам:

$$\mathbf{S}_{1i}(p)=\text{colon}(e^{p\tau_{ir}});\ \mathbf{S}_{2i}(p)=\mathbf{S}_{i1}^{T}(-p), \qquad (1)$$

где i =1, …, $N_д$; $\tau_{ir}= (r-1)T_0/n_i$, r = 1, …, n_i.

Учитывая (1) и многомерное представление каждого УДД$_i$ (рис.3), изобразим эквивалентную схему автономной (т.е. без внешних воздействий) многочастотной МП МСАР в специальном «векторно-матричном одночастотном» виде (рис. 4).

Здесь $\mathbf{G}(p)$ = diag$\{W_i(p)\}$ и $\mathbf{F}(p)$ = diag$\{F_i(p)\}$; $\mathbf{S}^{+}(p)$ = diag$\{\mathbf{S}_{1i}(p)\}$ и $\mathbf{S}^{-}(p)$=diag$\{\mathbf{S}_{2i}(p)\}$ – блочно-диагональные матрицы, блоки которых определяются по формулам (1); $\mathbf{K}^*$ – идеальный N-мерный ключ, осуществляющий синхронную дискретизацию по времени с периодом T_0 всех $N = \Sigma n_i$ координат вектора $\mathbf{V}(t)$; $\mathbf{W}^*(p)$=diag$\{W_i^*(p)\}$.

Выделим на схеме рис. 4 приведенную непрерывную часть (ПНЧ) с входом $\mathbf{V}(kT_0)$, выходом $\mathbf{V}(t)$ и с передаточной матрицей $\mathbf{W}_{пнч}(p)$:

$$\mathbf{W}_{пнч}(p) = \mathbf{S}^{+}(p)\mathbf{R}_{дн}\mathbf{W}(p)\mathbf{R}_{нд}\mathbf{F}(p)\mathbf{W}^*(p)\mathbf{S}^{-}(p), \qquad (2)$$

где $\mathbf{W}(p)=[\mathbf{G}^{-1}(p) - \mathbf{R}_{нн}]^{-1}$ – передаточная матрица непрерывной подсистемы **H**. Совместно с ключом **K*** на ее выходе, эта ПНЧ образует многомерное дискретное звено МДЗ ПНЧ с передаточной матрицей $\mathbf{W}_э^*(p)$, которая связана с $\mathbf{W}_{пнч}(p)$ формулой [1]:

$$\mathbf{W}_э^*(p)=T_0^{-1}\sum_{-\infty}^{\infty}\mathbf{W}_{пнч}(p - j2\pi rT_0^{-1}). \qquad (3)$$

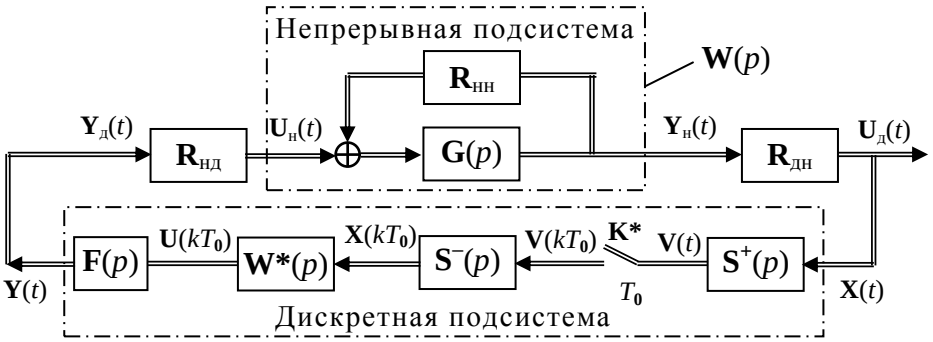


Рис. 4. Эквивалентное представление многочастотной МП МСАР

Структурная схема (рис. 4), формально соответствует некоторой замкнутой дискретной многомерной системе с передаточной матрицей разомкнутого контура $\mathbf{W}_э^*(p)$. Поэтому для исследования ее устойчивости, а значит и устойчивости исходной многочастотной МП МСАР, можно применить обобщенный критерий Найквиста [2, 3]: для устойчивости многочастотной МП МСАР, необходимо и достаточно, чтобы годограф функции $H^*(j\omega)=\det[\mathbf{E} - \mathbf{W}_э^*(j\omega)]$ при изменении ω от 0 до π/T_0 охватывал начало координат в положительном направлении $m/2$ раз, где m – число «неустойчивых» полюсов матрицы $\mathbf{W}_э^*(p)$. При этом из (2) и (3) следует, что m совпадает с числом «правых» полюсов матрицы $\mathbf{W}(p) = [\mathbf{G}^{-1}(p) - \mathbf{R}_{нн}]^{-1}$.

Отметим некоторые особенности применения рассмотренного критерия устойчивости:

1. При расчете точек годографа $H^*(j\omega)$ значения $\mathbf{W}_э^*(j\omega)$ следует вычислять по выражению (3) при $p=j\omega$ и значениях $r\in[-10, 10]$.

2. При наличии ν нулевых полюсов у определителя передаточной матрицы непрерывной подсистемы $|\mathbf{W}(p)|$, годограф $H^*(j\omega)$ дополняется дугой бесконечного радиуса с угловым размером $\varphi = +\nu\pi/2$.

3. Если $\mathbf{R}_{нн}= \mathbf{0}$, то $A(p) = \prod A_i(p)$, где $A_i(p)$ – знаменатель $W_i(p)$. Тогда m и ν определяются по корням уравнений $A_i(p) = 0$, $i = 1, 2, \ldots, N_н$.

4. Для исследования устойчивости одночастотной МП МСАР, достаточно в формуле (2) полагать, что $\mathbf{S}^+(p) = \mathbf{S}^-(p) = \mathbf{E}$.

5. При исследовании устойчивости непрерывной системы **H** со сложной структурой следует полагать $H^*(j\omega) = H(j\omega) = \det[\mathbf{E} - \mathbf{G}(j\omega)\,\mathbf{R}_{нн}]$.

6. Все исходные данные, необходимые для записи матричных формул метода на входном языке пакета MathCad и построения годографов $H^*(j\omega)$

и $H(j\omega)$ берутся непосредственно с детализированной (до уровня одномерных звеньев) структурной схемы МСАР без каких-либо сложных подготовительных действий и преобразований.

7. Звенья с запаздыванием и иррациональные звенья, а также физически неосуществимые динамические звенья в составе непрерывной подсистемы **H** можно (и целесообразно с точки зрения уменьшения размерностей обращаемых матриц) эквивалентно учитывать в элементах матрицы структурных связей $\mathbf{R}_{нн}$ своими «необычными» передаточными функциями. Тогда часть элементов этой матрицы будут не числами, а функциями комплексной переменной p.

Для подтверждения достоверности предлагаемого подхода к исследованию устойчивости линейных дискретных (цифровых и импульсных) многосвязных систем автоматического регулирования со сложной структурой взаимодействия разнотипных (в том числе и трансцендентных) звеньев в ее составе проводилось исследование ряда различных по сложности примеров систем управления. При этом производилось сравнение результатов компьютерного моделирования (во временной области) этих МП МСАР в программном пакете Vissim с результатами исследования устойчивости путем применения рассмотренного выше обобщенного критерия Найквиста. Необходимые для этого критерия частотные годографы функции $H^*(j\omega) = \det [\mathbf{E}–\mathbf{W}_э^*(j\omega)]$ рассчитывались в программном пакете MathCad по приведенным выше формулам. Совпадение результатов исследования устойчивых, неустойчивых, а также систем, находящихся на колебательной границе устойчивости подтверждает достоверность и высокую точность рассмотренного метода. При этом признаком нахождения МСАР на границе устойчивости является прохождение обобщенного годографа Найквиста через начало координат. Это создает возможность удобного и быстрого (по сравнению с методом моделирования) определения граничных значений любых параметров сложной МСАР при построии областей устойчивости.

Библиографический список

1. Ту, Ю.Т. Цифровые и импульсные системы автоматического управления / Ю.Т. Ту. – М.: Машиностроение, 1964. – 703 с.

2. Зырянов, Г.В. Частотный метод исследования линейных дискретных систем автоматического управления с произвольной структурой / Г.В. Зырянов // Информационные, измерительные и управляющие системы и устройства: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – С. 10–15.

3. Зырянов, Г.В. Применение частотного критерия устойчивости для дискретных САР со сложной структурой / Г.В.Зырянов. – Актуальные проблемы автоматизации и управления: труды научно-практической конференции. – Челябинск, 2013.

К содержанию

УДК 519.852 + 53.088

ОБ ОЦЕНИВАНИИ ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ МИНИМАКСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Е.Д. Ильин, В.И. Ширяев

Рассматривается способ оценивания возмущений и ошибок измерений с помощью решения задач линейного программирования в задаче гарантированного оценивания. Приводится пример оценивания постоянной составляющей ошибки измерений.

Ключевые слова**:** минимаксная фильтрация; оценка возмущений; оценка ошибок измерений; системы линейных неравенств.

Оценка внешних воздействий и ошибок измерений является важной задачей при построении динамических систем. С помощью этой информации можно обнаружить разладку датчиков или механизмов системы, а также улучшить адаптивные способности алгоритма идентификации системы [1]. Алгоритмы динамического восстановления неизвестных внешних воздействий для некоторых классов систем, описываемых дифференциальными уравнениями, приведены в [2, 3, 4]. В [5] задача идентификации состояния среды сводится к задаче дискретного чебышевского приближения, которая решается методом полиэдрального программирования.

Большой интерес представляет оценка внешних воздействий в задачах идентификации и управления в гарантированной постановке [6, 7]. В такой постановке задачи априорные сведения о внешней среде ограничиваются лишь заданием всех возможных значений внешних воздействий [8, 9]. Но для отдельно взятой реализации процесса реальное множество возмущений может быть меньше априорно заданного. Уточнение априорного множества так, что возмущения оказываются близко к границе этого множества, позволяет значительно повысить точность минимаксной фильтрации [9, 10].

Рассмотрим задачу гарантированного оценивания в следующей постановке:

$$\begin{gathered} x_{k+1} = Ax_k + \Gamma w_k, \\ y_{k+1} = Gx_{k+1} + Hv_{k+1}, \\ k = 0,1,...,N-1, \end{gathered} \tag{1}$$

где $x_k \in R^n, y_k \in R^m$ – векторы состояния системы и измерений $n>m$; w_k и v_k – векторы возмущений и ошибок измерений соответственно; A, Γ, G, H – известные матрицы. Про начальное состояние системы x_0, а также вектора w_k и v_k известно, что они могут принимать любое значение из заданных выпуклых множеств X_0, W, V.

Задача оценивания решается путем построения на каждом шаге информационного множества $\overline{X}_{k+1}$, которое гарантированно содержит в себе истинное значение $x_{k+1} \in \overline{X}_{k+1}$ [9, 11]:

$$\begin{gathered} \overline{X}_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], \\ X_{k+1/k} = A\overline{X}_k + \Gamma W, \\ X[y_{k+1}] = \left\{ x \in R^n \middle| Gx + v = y_{k+1}, v \in V \right\}, \\ k = 0,1,...,N-1, \end{gathered} \tag{2}$$

где $X_{k+1/k}$ – множество прогнозов; $X[y_{k+1}]$ – множество совместимое с измерениями y_{k+1}.

Все операции производятся над множествами: линейное преобразование, пересечение множеств, сумма множеств понимается в смысле Минковского.

Априорные оценки множеств X_0, W, V. могут оказаться сильно завышенными для конкретной реализации процесса, т.е. $v_k \in \tilde{V} \subset V$ при этом множество $\tilde{V}$ значительно меньше множества V. Также для векторов w_k и v_k в конкретном случае может быть задана их параметрическая модель [5]. В этих случаях полезны адаптивные процедуры, позволяющие уточнять оценки множеств W и V в зависимости от реальной ситуации, тем самым повышая точность оценивания вплоть до получения точных гарантированных оценок. Для уточнения множеств W и V необходимо получить оценки $\tilde{w}_k$ и $\tilde{v}_k$ значений возмущений w_k и ошибок измерений v_k по результатам текущих измерений y_{k+1}, k=0,1,...,N-1.

Для решения этой задачи можно использовать расширенный минимаксный фильтр [12], однако такой подход является вычислительно сложным [13]. Другой способ – это представление модели (1) в виде эквивалентной системы линейных неравенств:

$$\begin{cases} x_{k+1} - Ax_k + \Gamma w_k = 0; \\ Gx_{k+1} + Hv_{k+1} = y_{k+1}; \\ A_{x_k} x_k \le b_{x_k}; \\ A_w w_k \le b_w; \\ A_v v_k \le b_v. \end{cases} \tag{3}$$

Равенства в системе (3) описывают модель процесса, а неравенства задают множественные ограничения $x_k \in \bar{X}_k$, $w_k \in W$, $v_k \in V$, где $\bar{X}_k$ – информационное множество на k-м шаге. При этом если для множества неизвестно точное описание линейными неравенствами, то используется аппроксимация сверху этого множества фигурой, которую можно описать таким образом.

Для получения оценки множества возмущений $\tilde{W}_k$ на *k*-ом шаге необходимо решить систему (3) относительно w_k. Для этого можно воспользоваться методом свертывания [14]. Однако при большой размерности системы (3) данный метод требует значительных вычислительных затрат [13]. Вместо точного решения $\tilde{W}_k$ системы (3), можно найти его аппроксимацию сверху $\hat{W}_k \supset \tilde{W}_k$. Для этого будем решать задачи линейного программирования при ограничениях (3):

$$< c, w_k > \rightarrow \min_{w_k \in W}, \qquad (4)$$

где c – вектор, задающий направление поиска границы множества $\tilde{W}_k$.

Например, если вектор $w_k \in R^3$, то для того, чтобы найти аппроксимацию $\hat{W}_k$ множества $\tilde{W}_k$ в виде бруса со сторонами параллельными осям координат, необходимо решить 6 задач линейного программирования со следующими векторами:

$$c^T = (1 \quad 0 \quad 0),\ c^T = (-1 \quad 0 \quad 0),\ c^T = (0 \quad 1 \quad 0),$$
$$c^T = (0 \quad -1 \quad 0),\ c^T = (0 \quad 0 \quad 1) \text{ и } c^T = (0 \quad 0 \quad -1).$$

Решения таких задач линейного программирования дают наибольшее и наименьшее возможные значения проекций множества $\tilde{W}_k$ на каждую координатную ось.

Для получения более точных оценок имеет смысл построить систему линейных неравенств (3) за *N* шагов $k = 0,1,...,N-1$, которые без потери общности будем нумеровать с 0. При выборе числа шагов *N* следует обратить внимание на то, что увеличение числа *N* приводит к росту вычислительных затрат на решение задач линейного программирования (4). Однако, начиная с некоторого числа шагов *N=n*, дальнейшее увеличение числа шагов *N>n* позволяет лишь незначительно повысить точность оценки векторов w_k и v_k. Поэтому для конкретной системы следует подобрать оптимальное число шагов *N*, при котором будет достигаться достаточная точность оценки векторов возмущения w_k и ошибок измерения v_k при заданных ограничениях на вычислительные ресурсы.

При решении системы (3) не требуется вычислять информационные множества $\bar{X}_k$ для всех шагов $k = 0,1,...,N-1$, достаточно лишь знать ограничения на начальное значение вектора состояния $x_0 \in \bar{X}_0$. Это значительно снижает вычислительную нагрузку, ведь в промежуточные моменты времени в качестве решения задачи гарантированного оценивания можно использовать аппроксимации информационных множеств [13].

Работу алгоритма в целях наглядности изложения продемонстрируем для случая, когда $x_k \in R^2$ и следующих исходных данных:

$$A=\begin{pmatrix} 0.9976 & 0.04639 \\ -0.09278 & 0.8584 \end{pmatrix},\ \Gamma=\begin{pmatrix} 0.1189\cdot 10^{-3} \\ 4.639\cdot 10^{-2} \end{pmatrix},$$

$$G=I,\ H=I,$$

$$X_0=\{x\in R^2 \mid -7.5\cdot 10^{-4}\le x(1)\le 7.5\cdot 10^{-4}, -3\cdot 10^{-2}\le x(2)\le 3\cdot 10^{-2}\}, \quad (5)$$

$$V=\{v\in R^2 \mid -9.5\cdot 10^{-4}\le v(1)\le 9.5\cdot 10^{-4}, -2.28\cdot 10^{-2}\le v(2)\le 2.28\cdot 10^{-2}\},$$

$$W=\{w\in R \mid -1.5\le w\le 1.5\},$$

где I – единичная матрица; $v(i)$ – i-ая координата вектора v, i=1,2; $x(i)$ – i-ая координата вектора x, i=1,2.

Пусть реализация процесса такова, что $|w_{k+1}-w_k|\le\omega$, где $\omega=0{,}15$ – ограничения на скорость изменений возмущений. Вектор v_k принимает случайные значения из множества V. Составим систему линейных неравенств за 20 шагов для данного случая с учетом особенностей изменения вектора ошибок измерений w_k:

$$\begin{cases} x_{k+1}-Ax_k-\Gamma w_k=0, k=0,1,...,19; \\ x_{k+1}+v_{k+1}=y_{k+1}; \\ A_{x_0}x_0\le b_{x_0}; \\ A_w w_k\le b_w; \\ A_v v\le b_v; \\ w_{k+1}-w_k\le\omega; \\ A_\omega\omega\le b_\omega, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$A_{x_0}=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T,\ A_v=\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T,$$

$$A_w=\begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix}^T,\ A_\omega=\begin{pmatrix} 1 & -1 \end{pmatrix}^T,$$

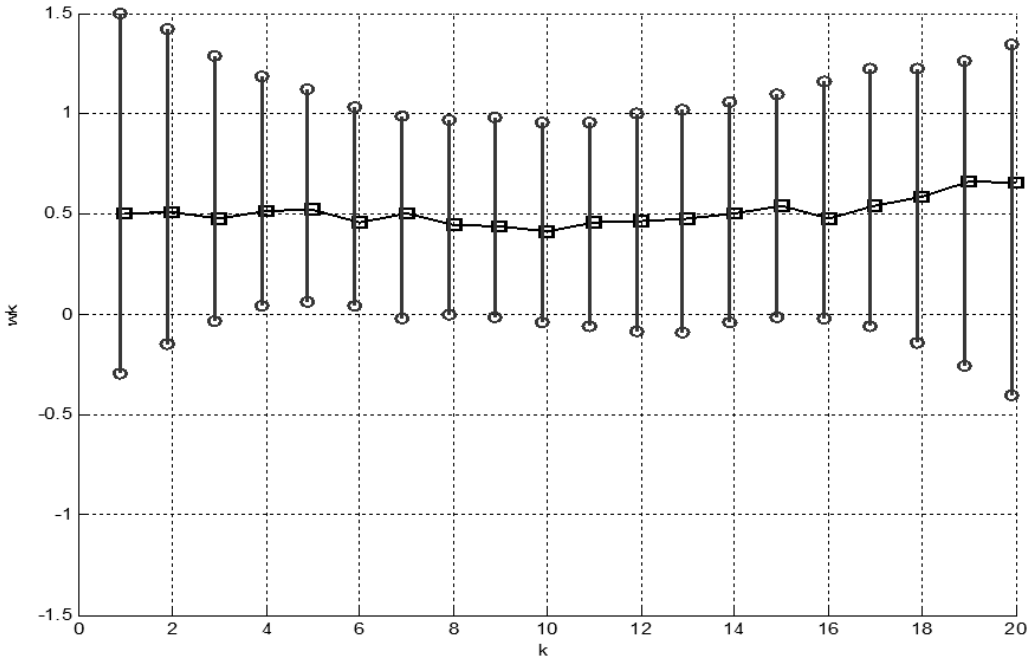
$$b_{x_0}=\begin{pmatrix} 7.5\cdot 10^{-4} & 7.5\cdot 10^{-4} & 3\cdot 10^{-2} & 3\cdot 10^{-2} \end{pmatrix}^T,$$

$$b_v=\begin{pmatrix} 9.5\cdot 10^{-4} & 9.5\cdot 10^{-4} & 2.28\cdot 10^{-2} & 2.28\cdot 10^{-2} \end{pmatrix}^T,$$

$$b_w=\begin{pmatrix} 1.5 & 1.5 \end{pmatrix}^T,\ b_\omega=\begin{pmatrix} 0.15 & 0.15 \end{pmatrix}^T.$$

Решим задачи линейного программирования (4) относительно w_k, $k=0,1,...,19$ при ограничениях (6) и векторах $c=1$ и $c=-1$. Решения задач линейного программирования задают наибольшие и наименьшие значения векторов w_k.

На рисунке представлены полученные оценки $\widehat{W}_k$ множества возмущений W. С помощью описанной процедуры удалось в 2 раза уточнить априорно заданное множество возмущений W. Наиболее точные оценки возмущений w_k получаются при $k = 6,...,15$.



□ – реализация возмущений w_k; O—O – множественная оценка $\widehat{W}_k$.

Реализация возмущений w_k и оценки $\widehat{W}_k$ в случае, когда известны ограничения на скорость изменений вектора возмущений w_k

Предложен вычислительно простой способ оценивания вектора возмущений w_k и ошибок измерений v_k с помощью решения задач линейного программирования. Рассмотрен пример, когда известны ограничения на скорость изменений возмущений. В этом случае удалось получить оценки вектора возмущений в 2 раза меньшие априорно заданных. Установлено, что при решении системы линейных неравенств, описывающей динамическую систему на несколько шагов *k=k1,...,k2*, наиболее оптимальные оценки получаются для шагов в середине интервала *k=k1,...,k2*.

Библиографический список

1. Бассвиль, М. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / М. Бассвиль, А. Вилски, А. Банвенист и др. – М.:Мир, 1989. – 278 с.

2. Осипов, Ю.С. Некоторые алгоритмы динамического восстановления входов / Ю.С. Осипов, А.В. Кряжимский, В.И. Максимов // Труды ИММ УрО РАН. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 129–161.

3. Близорукова, М.С. К проблеме динамического восстановления управления при измерении части координат / М.С. Близорукова, А.М. Кодесс // Дифференциальные уравнения. – 2008. – № 11. – С. 1450–1455.

4. Розенберг, В.Л. К задаче динамической реконструкции возмущения в стохастическом дифференциальном уравнении / В.Л. Розенберг // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2011. – Т. 51, № 10. – С. 1806–1815.

5. Филимонов, Н.Б. Идентификация состояния и внешней среды дискретных динамических объектов методом полиэдрального программирования / Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 2. – С. 11–15.

6. Кряжимский, А.В. О сочетании процессов реконструкции и гарантирующего управления / А.В. Кряжимский, В.И. Максимов // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 8. – С. 5–21.

7. Гасников, И.В. Оптимизация точности априорного прогнозирования возмущений в задачах гарантирующего управления / И.В. Гасников, В.В. Токарев // Автоматика и телемеханика. – 2013. – № 7. – С. 102–125.

8. Эльясберг, П.Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

9. Кац, И.Я. Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределённых ситуациях / И.Я. Кац, А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 11. – С. 79–87.

10. Ширяев, В.И. Оценивание состояния динамической системы в условиях неопределенности / В.И. Ширяев, Е.Д. Ильин, Е.О. Подивилова // Мехатроника и робототехника. – 2011. – С. 101–110.

11. Ширяев, В.И. Синтез управления линейными системами при неполной информации / В.И. Ширяев // Известия РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 3. – С. 229–237.

12. Ильин, Е.Д. Об оценивании постоянных возмущений, действующих на динамическую систему, при использовании минимаксного фильтра / Е.Д. Ильин // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматиза-ции и управления». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2013. – С. 31–34.

13. Подивилова, Е.О. О подходе к оцениванию состояния динамических систем как к решению системы линейных неравенств / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Вып. 17. – № 3 (13). – С. 133–136.

14. Черников, С.Н. Метод свертывания систем линейных неравенств / С.Н. Черников // Успехи математических наук. – 1964. – 19:5(119). – С. 149–156.

К содержанию

УДК 629.78:519.718 + 629.785

ОБ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ МАЛОГАБАРИТНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

О.О. Павловская

Обоснован выбор бортовых систем подлежащих первоочередному анализу на надежность. Выполнен обзор подходов к обеспечению требуемой надежности основных бортовых системы, приведены методики выбора вида и схемы резервирования.

Ключевые слова: космический аппарат; бортовая система; надежность; вероятность безотказной работы; резервирование; схема резервирования; кратность резерва.

В последнее время в области разработки и создания космических аппаратов (КА) отчетливо прослеживается тенденция их миниатюризации при сохранении и улучшении функциональных характеристик [1], что обеспечивается прогрессом в области разработки и изготовления элементной базы. В результате удалось снизить массы КА с нескольких тонн до нескольких килограмм, появился класс малогабаритных КА (МКА).

Опыт эксплуатации МКА во всем мире подтвердил высокую эффективность их применения для нужд науки и народного хозяйства, а также в военных целях. Так, в области народного хозяйства МКА используются для: мониторинга и контроля окружающей среды; метеорологии; навигации и связи; прогнозирования опасных явлений и оперативного контроля чрезвычайных ситуаций; использования в интересах отработки новых технологий; поиска полезных ископаемых и пр.

Целевая эффективность МКА в основном определяется качеством функционирования его бортовых систем (БС) как в штатных, так и в аномальных ситуациях. В условиях активного функционирования МКА критичными являются отказы бортовых систем (БС), как внезапные, вызванные различного рода перегрузками, так и постепенные, связанные с ускоренной деградацией компонентов БС [2].

Качество функционирования МКА определяется критериями: надежность, отказоустойчивость и живучесть, где надежность [3] – свойство системы сохранять работоспособное состояние в течение времени эксплуатации; отказоустойчивость [4] – свойство технической системы сохранять работоспособность после отказа одного или нескольких составных компонентов; живучесть [5] – способность системы выполнять свои основные функции, несмотря на полученные повреждения. Причем для БС, которые в условиях активного функционирования МКА являются невосстанавливаемыми, свойства отказоустойчивости и живучести обеспечиваются за счет надежности. При этом требуемая надежность обеспечивается защитой от внезапных отказов, так как постепенные отказы являются хорошо про-

гнозируемыми, их возникновение можно предупредить своевременным техническим обслуживанием БС. Внезапные же отказы возникают в аномальных ситуациях, неизбежно имеющих место в процессе эксплуатации МКА, однако являются труднопрогнозируемыми.

Поэтому нетривиальным является вопрос анализа инженерных решений по первоочередному обеспечению надежности тех БС МКА, отказ которых наиболее критичен. Так при отказе бортового комплекса управления (БКУ) и/или системы энергопитания (СЭП) невозможно выполнение целевой миссии МКА, следует говорить о прекращении активного существования МКА. Поэтому в первую очередь решаются вопросы по обеспечения и требуемой надежности именно этих БС.

В настоящее время БКУ строятся на базе интегральных микросхем, соединенных единой телекоммуникационной сетью SpaceWire, характеризуются высокой отказоустойчивостью, низким потреблением энергии, небольшой массой. Учитывая взаимосвязь отказов отдельных узлов БКУ и БКУ в целом, схема расчета надежности БКУ МКА имеет вид, показанный на рисунке 1.

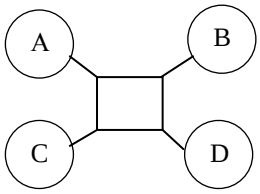


Рис. 1. Схема расчета надежности БКУ МКА

В схеме расчета надежности БКУ (см. рис. 1) к маршрутизатору (M) подключены: A – бортовой компьютер, B – преобразователь интерфейсов, C – преобразователь телекоммуникационной системы и D – модуль питания. Надежность каждого узла характеризуется функцией вероятности безотказной работы (ВБР) $P_i(t)$.

Известный способ обеспечения требуемой надежности БКУ – поэлементное резервирование. Резервирование БКУ может быть реализовано в нескольких вариантах. Так, например, можно резервировать все элементы БКУ кроме маршрутизатора. В этом случае отказ БКУ наступает, когда выходят из строя основной и резервный элемент и/или маршрутизатор. Можно резервировать только маршрутизатор. Можно резервирировать одновременно и элементы, и маршрутизатор, причем если откажет хотя бы один из элементов одного комплекта устройств, то будет включаться весь резервный комплект и т.д. Наконец, может быть использована схема резервирования БКУ, когда фактически «все соединено со всем». Эта схема резервирования является самой надежной, но и самой сложной в реализации.

Чтобы выбрать из предлагаемых вариантов резервирования один, наиболее рациональный, представляющий собой «золотую середину» между надежностью системы, и количеством потребляемых ресурсов, применяется алгоритм [1], откорректированный с учетом специфики МКА:

Шаг 1. Оценить ВБР всех узлов БКУ.

Шаг 2. По известным значениям ВБР составляющих элементов вычислить ВБР каждой из шести схем резервирования [1], т. е.:

$$p_{сист} = \left[p_m \;\; p_1 \;\; p_2 \;\; p_3 \;\; p_4\right]^T,$$

$$P = \left\{P_f^а\left(p_{сист}\right), P_f^б\left(p_{сист}\right), P_f^в\left(p_{сист}\right), P_f^г\left(p_{сист}\right), P_f^д\left(p_{сист}\right), P_f^е\left(p_{сист}\right)\right\}.$$

Шаг 3. Из множества P выбрать только те результаты, которые больше минимального значения, данного в техническом задании:

$$P' = \left\{P_i : P_i > P_{\min}, i = \overline{1,6}\right\}.$$

Шаг 4. Если множество P' не пусто, то перейти на шаг 4, в противном случае делается вывод о необходимости повышения надежности системы принятием одной из следующих мер:

1) замена элементов на другие (с большим значением ВБР);

2) выбор другого режима резервирования.

Шаг 5. Если множество имеет один элемент, то принять его. Если множество P' имеет более одного элемента, то выбирается один элемент с учетом ограничений на массогабаритные характеристики БКУ, энергопотребление, стоимость.

Более интересный и современный подход к обеспечению требуемой надежности МКА связан с алгоритмическим резервированием БКУ. Он заключается в получении на 1-м шаге полного диагноза о времени появ-ления отказа, его месте, классе, виде его проявления. Причем полный диаг-ноз получается на блоковом, системном и мегасистемном уровнях. На 2-м шаге по полному диагнозу (на каждом уровне) парируются последствия этого отказа посредством выбора избыточного ресурса; выбора алгоритма и процедуры восстановления отказавшего объекта диагностирования. На 3-м шаге проводится повторное диагностирование, для того чтобы дать оценку принятым мерам. Эта оценка передается на уровень выше по отношению к текущему. Построение такой адаптивной системы очень сложная и большая задача, требующая глубокого знания видов отказов конкретного блока, причин их вызывающих и методов их устранения.

Инженерные подходы к обеспечению требуемой надежности системы энергопитания (СЭП) связаны с повышением надежности элементной базы и резервированием. Схема расчета надежности СЭП представлена на рис. 2, где ПСБ – подсистема солнечных батарей, ПАБ – подсистема аккумуляторных батарей, БА – блок автоматики.

Рис. 2. Схема расчета надежности СЭП

Согласно схеме расчета надежности:

$$P_{СЭП} = P_{СБ} \cdot P_{АБ} \cdot P_{БА},$$

поэтому для обеспечения требуемой надежности СЭП необходимо резервирование каждой подсистемы.

Расчет требуемой кратности ВБР каждой подсистемы СЭП МКА (корректно использовать экспоненциальный закон распределения времени жизни) при известных значениях ВБР нерезервированных секций, можно провести, используя метод The Feasibility Of Objectives Technique [6]. Согласно данному методу весовые коэффициенты интенсивностей отказов каждой подсистемы определяются экспертно через уровень сложности, уровень высокотехнологичности, с учетом факторов времени функционирования и условий эксплуатации. Полученная расчетным путем кратность резерва каждой подсистем далее может быть уменьшена только за счет использования более надежных базовых элементов.

В заключении хотелось бы отметить, что в последнее время особенно остро противоречие между уровнем сложности КА, обусловленным стремлением к повышению эффективности его применения, и недостаточным резервом повышения надежности, который можно обеспечить традиционными методами: совершенствованием элементной базы и использованием структурной избыточности. Сегодня одним из эффективных путей разрешения указанного противоречия является оснащение КА бортовыми средствами активного обеспечения безопасности полета. Эти средства призваны обеспечить живучесть КА за счет, во-первых, получения оперативной достоверной информации о причинах, вызвавших нештатную ситуацию, во-вторых, за счет принятия комплекса мер по реорганизации системы с целью устранения последствий нештатной ситуации.

Библиографический список

1. Гущин, В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учеб. для вузов / В.Н. Гущин – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

2. Кирилин, А.Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных КА зондирования Земли / А.Н. Кирилин, Р.Н. Ахметов, А.В. Соллогуб, В.П. Макаров. – М.: Машиностроение, 2010. – 384 с.

3. Анцелиович, Л.Л. Надежность, безопасность и живучесть самолёта / Л.Л. Анцелиович – М: Машиностроение, 1985. – 296 с.

4. Воробьёв, В.Г. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования / В.Г. Воробьёв, В.Д. Константинов. – М.: МГТУ ГА, 2010. – 448 с.

5. Кизько, В.Г. Теория надежности систем УВД / В.Г. Кизько. – СПб.: ГУГА, 2011. – 40 с.

6. J.F. Castet, and J.H. Saleh, Spacecraft Reliability and Multi-State Failures: a statistical approach, Book, Wiley & Sons, Ltd., 2011.

К содержанию

УДК 378.1 + 37.01

СЕТЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Н.В. Плотникова

Рассматриваются вопросы, связанные с реализацией сетевой формы образовательных программ. Рассмотрен опыт реализации сетевых форм в России и за рубежом. Приведены общие тенденции реализации сетевого образования за рубежом и основные мотивы этого процесса в России.

Ключевые слова: сетевая форма, реализация образовательных программ, образовательная сеть.

В ст. 15 Федерального закона «Об образовании в Российской Федерации» (далее по тексту – Закон) [11] говорится о сетевой форме реализации образовательных программ, которая обеспечивает возможность освоения обучающимся образовательной программы с использованием ресурсов нескольких организаций, осуществляющих образовательную деятельность, в том числе иностранных, а также при необходимости с использованием ресурсов иных организаций.

При этом в реализации образовательных программ с использованием сетевой формы наряду с организациями, осуществляющими образовательную деятельность, также могут участвовать научные организации, медицинские организации, организации культуры, физкультурно-спортивные и иные организации, обладающие ресурсами, необходимыми для осуществления обучения, проведения учебной и производственной практики и осуществления иных видов учебной деятельности, предусмотренных соответствующей образовательной программой.

Совокупность этих организаций образует «образовательную сеть». Каждый из элементов этой сети предлагает для данной конкретной образовательной программы что-то особенное: оригинальные модели и установки, уникальные курсы, научно-педагогические школы и т.д. [13]. Эта образовательная сеть является горизонтальной и самоорганизующейся. Ей присущи информационные и кооперационные связи, отношения партнерства и сотрудничества и в этом плане высшей формой сетевых взаимодействий является взаимодействие равных [1].

Компьютеризация и информатизация общества привела к тому, что современные студенты являются активными пользователями информационных технологий. Интернет обеспечивает легкий доступ к учебным материалам, позволяет достаточно эффективно готовиться к лекционным и практическим занятиям, экзаменам; часто для реализации индивидуальной образовательной траектории студентам требуется лишь «тьютор» – наставник, который не даст потеряться в реальной сети информации.

Образование в сетевой форме не сводится к использованию компьютера, а связано с другим содержанием, организацией, иным методическим и кадровым обеспечением всей образовательной инфраструктуры. Речь идет о качественно новой «сетевой педагогике», в настоящее время практически не разработанной и не исследованной. Сама по себе массовая компьютеризация далека от идей и процессов сетевого образования, хотя, несомненно, новые информационные технологии должны стать его неотъемлемым и естественным элементом.

Идеи сетевого подхода в образовании [5, 7, 13] наиболее ярко представлены в Болонском процессе – процессе сближения систем выс-шего образования стран Европы с целью создания единого европейского пространства высшего образования.

Одной из основных целей Болонского процесса является «содействие мобильности путем преодоления препятствий эффективному осуществлению свободного передвижения». Для этого нужно, чтобы во всех странах уровни высшего образования были максимально похожими, а выдаваемые по результатам обучения научные степени – наиболее прозрачными и легко сопоставимыми. Это, в свою очередь, связано с введением в вузах системы перезачета кредитов, модульной системы обучения и специаль-ного Приложения к диплому. Это также находится в тесной связи с реформированием учебных планов.

Достоинства Болонского процесса в развитии горизонтальных сетевых технологий состоят в следующем: расширение мобильности студентов и преподавателей, межинституциональное сотрудничество университетов, единые принципы признания результатов обучения, расширение доступа к высшему образованию, дальнейшее повышение качества и привлекательности европейского высшего образования, а также обеспечение успешного трудоустройства выпускников вузов за счет того, что все академические степени и другие квалификации должны быть ориентированы на общеевропейский рынок труда.

В Законе сказано, что использование сетевой формы реализации образовательных программ осуществляется на основании договоров между сетевыми организациями. Для организации реализации образовательных программ с использованием сетевой формы несколькими организациями, осуществляющими образовательную деятельность, такие организации могут совместно разрабатывать и утверждать образовательные программы.

Зарубежный опыт применения сетевых форм реализации образовательных программ [12, 13] позволяет выявить некоторые общие тенденции, которые сводятся к следующим моментам:

- передача на аутсорсинг определенных функции и полномочий типа: прием-набор студентов (агенты, школы, проведение конкурсов и олимпиад); составление заданий, программ, планов, траекторий (консультанты,

заказчики, потребители); составление курсов, учебников, разработка образовательных технологий (наука, IT, дизайнеры); поддержка исследовательских платформ (частные компании, консорциумы); работа тьюторами, консультантами; оценивание компетенций студентов, преподавателей, вузов (внешние организации, потребители, сообщества); администрирование (логистика) образовательного процесса для студентов и т.д.;

- практика выбора курсов из разных источников в объединенных дистанционных и интегрированных университетах;
- разработка мульти-университетских программ под инновационные проекты (один из университетов должен быть лидером-координатором);
- международное кросс-университетское обучение (особенно в случае бизнес-образования);
- взаимное признание образовательных модулей (кредитов за курсы) – кросс-университетское обучение (модули, курсы берутся из разных университетов, образовательная программа определяется заказчиком или оператором);
- двусторонние (трехсторонние) межуниверситетские соглашения, создание образовательных консорциумов (с выдачей двойных дипломов, степеней, с обменами студентами и т.п.);
- создание распределенных ресурсов для целей образования, включая «облачные ресурсы»;
- организация совместных исследовательских лабораторий, центров коллективного пользования, в первую очередь, с целью экономии денег.

В России в настоящее время [3, 4, 8, 9] сформирована сеть из 40 ведущих-вендорных университетов, которая включает:

1) два ведущих классических университета, имеющих особое правовое положение – МГУ им. М.В. Ломоносова и СПбГУ;

2) девять федеральных университетов;

3) 29 университетов, в отношении которых установлена категория «национальный исследовательский университет».

В [13] приведены примеры форм сетевого взаимодействия, созданных на базе Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики, Томского национального исследовательского университета (ТГУ) и его деловых партнеров, Российского университета дружбы народов (РУДН) и ряда других.

Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 1 июля 2013 г. № 499 [5] «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам» разрешена реализация дополнительных профессиональных программ с использованием модульных, дистанционных образовательных технологий, электронного обучения и в сетевых формах обучения. Концепция маршрутного или сетевого обучения [2, 6, 10] при по-

вышении квалификации кадров используется в вузах, подведомственных Минобрнауки России, в соответствии с приказом Минобрнауки России № 1098 от 26.12.2012. Повышение квалификации научно-педагогических работников вузов проводится при их командировании в ведущие вузы, определяемые конкурсным отбором предлагаемых программ.

Основные направления сетевого взаимодействия вузов с научными организациями в рамках Постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 [3, 13] представлены на рисунке.

Наука	**Образование**
1. Исследовательские программы: – выполнение совместных НИОКР – формирование приоритетных направлений исследований 2. Обмен научно-технической и маркетинговой информацией 3. Прогнозирование научно-технического развития	1. Подготовка кадров высшей квалификации: 2. Практика и стажировка студентов 3. Совершенствование учебных программ 4. Участие сотрудников организаций и компаний в преподавательской работе 5. Создание системы непрерывного образования

Основные направления взаимодействия вузов с научными организациями

Одним из условий эффективного внедрения сетевой формы реализации образовательного процесса является рассмотрение мотивов всех участников, вовлеченных в сетевое обучение, – управления, администрирования, методической работы, авторской работы, преподавания и т.п. Эти мотивы формируются и выявляются в разных формах взаимодействия между участниками сетевого образовательного процесса.

Рассмотренный опыт показал, что существует, по крайней мере, четыре мотива для российских университетов участвовать в реализации сетевого образования:

1) позволяет сконцентрировать усилия на совершенствовании достигнутого уровня развития за счет заимствования лучших образцов друг у друга;

2) доказательство искренности университета, если он признает, что другой университет лучше удовлетворяет потребности его студентов в каких-либо аспектах;

3) конкурентное сотрудничество порождает инновации, что может привести к более эффективным схемам организации образовательного процесса;

4) работа в сети ведет к образованию единого российского научно-образовательного пространства, что поможет интеграции России в мировые процессы.

Библиографический список

1. Заякина, Р.А. Инновационный вуз как субъект сетевого взаимодействия / Р.А. Заякина // Высшее образование в России. – 2013. – № 4. – – С. 118–124.

2. Мосичева, И.А. Высшая школа и дополнительное профессиональное образование: проблемы и решения / И.А. Мосичева, В.П. Шестак, В.Н. Гуров. – Ставрополь: Изд. СтавГУ, 2007. – С. 62–82.

3. Постановление Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производств».

4. Постановление Правительства РФ от 5 августа 2013 г. № 662 «Об осуществлении мониторинга системы образования».

5. Приказ Минобрнауки России от 01.07.2013 № 499 «Об утверждении Порядка организации и осуществления образовательной деятельности по дополнительным профессиональным программам».

6. Приказ Минобрнауки России от 26.12.2012 № 1098 «Об организации повышения квалификации научно-педагогических работников федеральных государственных образовательных учреждений высшего профессионального образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации, в федеральных государственных образовательных учреждениях высшего профессионального образования, подведомственных Министерству образования и науки Российской Федерации, в 2013 году».

7. Приказ Минобрнауки России от 23.07.2013 № 611 «Об утверждении порядка формирования и функционирования инновационной инфраструктуры в системе образования».

8. Распоряжение Правительства РФ от 22 ноября 2012 г. № 2148-р «Государственная программа РФ «Развитие образования» на 2013-2020 годы».

9. Распоряжение Правительства РФ от 30 декабря 2012 г. № 2620-р «Изменения в отраслях социальной сферы, направленные на повышение эффективности образования и науки» («дорожная карта»).

10. Указ Президента РФ от 7 мая 2012 г. № 594 «Президентская программа повышения квалификации инженерных кадров на 2012–2014 годы».

11. Федеральный закон РФ от 29 декабря 2012 г. № 273-ФЗ «Об образовании в Российской Федерации».

12. Strategy for the Internationalisation of Higher Education Institutions in Finland 2009–2015. Publications of the Ministry of Education, Finland 2009. – URL: http://www.minedu.fi/export/sites/default/OPM/Julkaisut/2009/liitteet/opm23.pdf.

13. Шестак, В.П. Сетевое образование: лучшие отечественные и зарубежные практики / В.П. Шестак, Е.Б. Весна, В.Н. Платонов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6.

К содержанию

УДК 629.7.05 + 517.987

ОБ ОЦЕНКЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ МНОЖЕСТВ В ЗАДАЧЕ МИНИМАКСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ЛИНЕЙНЫХ НЕРАВЕНСТВ

Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев

Рассматривается построение гарантированных оценок состояния динамических систем в условиях неопределённости, когда статистическая информация о возмущениях и помехах отсутствует и известны только множества их возможных значений. Описан алгоритм построения информационных множеств, когда множества возможных значений возмущений и помех являются многогранниками, заданными системами линейных неравенств. Рассмотрено построение информационных множеств на основе текущего измерения, а также с учетом накопленных за предыдущие шаги данные. Приведён численный пример, демонстрирующий работу алгоритма.

Ключевые слова: гарантированная оценка, минимаксный фильтр, информационное множество, системы линейных неравенств.

1. Введение

Задача оценивания состояния динамических систем возникает в различных технических приложениях, таких как системы управления летательными аппаратами, системы слежения и обнаружения целей, автоматизированные системы управления технологическими процессами и предприятиями [8-11,14]. При этом в реальных условиях, как правило, отсутствует статистическая информация о возмущениях и помехах, действующих на систему, но известны множества их возможных значений, что приводит к необходимости решения задач гарантирующего оценивания или минимаксной фильтрации вектора состояния динамической системы [1-4,13,15]. В данной работе описана процедура построения аппроксимации информационных множеств сверху. Работа продолжает исследования [6-8,10].

Процессы в системе управления описываются уравнениями:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + \Gamma w_k, \tag{1}$$

$$y_{k+1} = Gx_{k+1} + Hv_k, \quad k = 0,1,...,N-1, \tag{2}$$

где $x_k \in R^n, w_k, y_k \in R^m, v_k$ – векторы состояния системы, возмущения, измерения, ошибок измерений на k-м шаге соответственно; A, Γ, G, H, B – известные матрицы; u_k – заданное управление.

Известно, что начальное состояние x_0 и неопределенные воздействия w_k и v_k на k-м шаге могут принимать любые значения из некоторых заданных выпуклых многогранных множеств:

$$x_0 \in X_0,\ w_k \in W,\ v_k \in V,\quad k = 0,1,...,N-1. \tag{3}$$

Задача гарантированного оценивания текущего состояния системы состоит в построении последовательности информационных множеств $\overline{X}_{k+1}$, $k = 0,1,...,N-1$ (множественной оценки вектора состояния x_k) [2]. На основе предыдущей оценки информационного множества $\overline{X}_k$ рассчитывается множество прогнозов вектора состояния x_k системы:

$$X_{k+1/k} = A\overline{X}_k + \Gamma W + Bu_k,\quad k = 0,1,...,N-1. \tag{4}$$

По результатам измерения y_{k+1} рассчитывается множество состояний, совместимых с измерением:

$$X[y_{k+1}] = \left\{ x \in R^n \,\middle|\, Gx + Hv = y_{k+1}, v \in V \right\}, k = 0,1,...,N-1, \tag{5}$$

и затем информационное множество:

$$\overline{X}_{k+1} = X_{k+1/k} \cap X[y_{k+1}], k = 0,1,...,N-1. \tag{6}$$

Операции в (4)–(6) проводятся над множествами: сумма множеств в смысле Минковского, линейное преобразование и пересечение множеств. Но при увеличении размерности задачи возникают проблемы в реализации операции суммы множеств в реальном времени. Когда многогранники заданы набором своих вершин, то задача построения суммы множеств сводится к нахождению выпуклой оболочки [7]. Известные в настоящее время алгоритмы построения выпуклой оболочки из N точек в n-мерном пространстве имеют время решения $O(N^{\lfloor n/2 \rfloor + 1})$, что неприемлемо для многих практических задач. Зачастую удобно представлять многогранники гранями, т.е. описывать их системой линейных неравенств [5, 7]. В этом случае операция суммы множеств сводится к проектированию многогранника в пространство меньшей размерности методом свёртки системы линейных неравенств Фурье-Черникова [1, 6]. Недостатком данного метода является появление в промежуточных вычислениях большого количества избыточных неравенств, число которых зависит экспоненциально от количества неравенств в исходной системе. Чтобы уменьшить вычислительную сложность алгоритма, применяют различные аппроксимации информационных множеств, хотя при этом и происходит потеря точности [3, 7, 12].

2. Аппроксимация информационных множеств

Построение суммы множеств (4) является самой трудоёмкой по времени вычисления операцией при решении задачи минимаксной фильтрации. Одним из способов уменьшения вычислительной сложности является опи-

сание множеств эллипсоидами [12]. Однако класс эллипсоидов не замкнут относительно операций суммы и пересечения, поэтому при описании сверху результатов этих операций эллипсоидом происходит значительная потеря точности. В данной работе приведена процедура построения аппроксимации информационного множества без построения суммы и пересечения множеств. Ограничения (3) заданы системами линейных неравенств:

$$x_0 \in X_0 : A_{x_0} x_0 \le b_{x_0},\ \ w_k \in W : A_w w_k \le b_w,\ v_k \in V : A_v v_k \le b_v,\quad k = 0,1,\ldots,N-1. \quad (7)$$

Алгоритм 1

Шаг 1. Получим систему линейных уравнений, описывающую модель системы (1), (2):

$$\begin{pmatrix} E & -A & -\Gamma & 0 \\ G & 0 & 0 & H \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ x_k \\ w_k \\ v_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Bu_k \\ y_{k+1} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Шаг 2. Получим систему линейных неравенств из ограничений (7):

$$\begin{pmatrix} 0 & A_{x_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_v \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{k+1} \\ x_k \\ w_k \\ v_k \end{pmatrix} \le \begin{pmatrix} b_{x_k} \\ b_w \\ b_v \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Шаг 3. Системы (8), (9) неявно задают информационное множество. Аппроксимируем информационное множество $\overline{X}_{k+1}$ многогранником с набором граней $A_{x_{k+1}}$, т.е. получим многогранник, описанный системой линейных неравенств $A_{x_{k+1}} \cdot x \le b_{x_{k+1}}$. Поскольку форма множества $\overline{X}_{k+1}$ неизвестна, то выбирать направления $A_{x_{k+1}}$ следует исходя из требований задачи, например, выбирать такие вектора a_i, по направлению которых значения координат вектора состояния являются наиболее важными. Для каждого направления a_i решаем задачу линейного программирования $a_i x \to \max$ при ограничениях (8) и (9), $b_i = a_i \cdot x^*$, где x^* - решение задачи линейного программирования.

Рассмотрен алгоритм аппроксимации информационного множества на один шаг. В данном случае неточности, получаемые из-за аппроксимации, могут с каждым шагом накапливаться. Увеличить точность можно, если учитывать информацию, полученную на предыдущих шагах.

Алгоритм 2

Шаг 1. Зададим N – число предыдущих шагов, данные с которых будут использованы для вычисления текущей оценки.

Шаг 2. Составим систему линейных уравнений, описывающих систему на последних N шагах:

$$\begin{pmatrix} E & -A & \dots & 0 & -\Gamma & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & E & -A & \dots & 0 & -\Gamma & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & E & -A & 0 & \dots & -\Gamma & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ \dots \\ x_{k-N} \\ w_{k-1} \\ \dots \\ w_{k-N} \\ v_{k-1} \\ \dots \\ v_{k-N} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Bu_{k-1} \\ \dots \\ Bu_{k-N} \\ y_k \\ \dots \\ y_{k-N} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Шаг 3. Составим систему линейных неравенств, описывающих множества возмущений, помех и информационное множество на *k*-м шаге:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & A_{x_{k-N}} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_{w_{k-1}} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & A_{w_{k-N}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{v_{k-1}} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & A_{v_{k-N}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_k \\ x_{k-1} \\ \dots \\ x_{k-N} \\ w_{k-1} \\ \dots \\ w_{k-N} \\ v_{k-1} \\ \dots \\ v_{k-N} \end{pmatrix} \le \begin{pmatrix} b_{x_k} \\ \dots \\ b_{x_{k-N}} \\ b_{w_{k-1}} \\ \dots \\ b_{w_{k-N}} \\ b_{v_{k-1}} \\ \dots \\ b_{v_{k-N}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Шаг 4. Аналогично шагу 3 алгоритма 1: строится аппроксимация информационного множества $\overline{X}_k$ на основе систем (10), (11).

3. Примеры реализации алгоритма

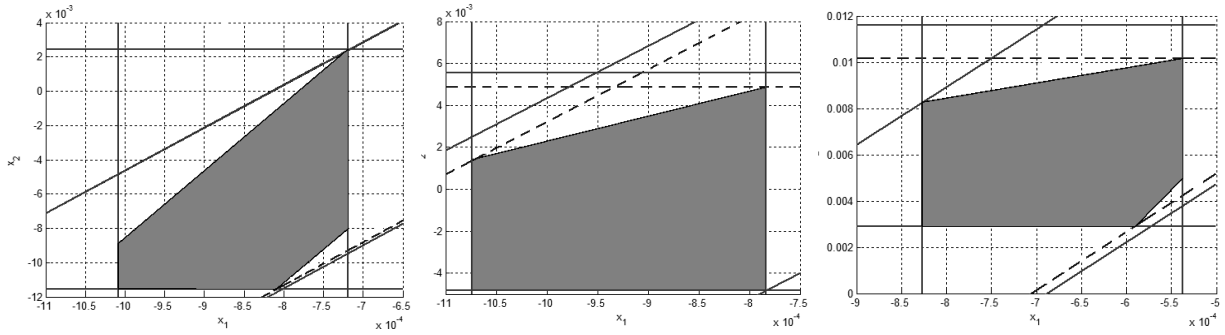
Пример 1

Рассмотрим применение минимаксного фильтра на примере для системы (1) – (3). Пусть матрицы A и Γ имеют следующие значения: $A = \begin{pmatrix} 0,9976 & 0,04636 \\ -0,09278 & 0,8584 \end{pmatrix}$, $\Gamma = \left(0,2289 \cdot 10^{-3} \quad 4,639 \cdot 10^{-3}\right)^T$, вектор измерений $y_k \in R^2$. Множества заданы следующим образом: X_0 – прямоугольник с центром в начале координат и сторонами $1.5 \cdot 10^{-3}$ и 0.06, W – отрезок, симметричный относительно 0 длиной 3, V – прямоугольник с центром в начале координат и сторонами $2.9 \cdot 10^{-4}$ и 0.0456. Для моделирования процесса будем считать, что начальное состояние системы $x_0=0$, т.е. находится в начале координат, а возмущения w_k и ошибки измерений v_k меняются внутри множеств W и V соответственно. Построим оценки вектора состояния, вы-

полняя операции над множествами по формулам (4) – (6), а также построим аппроксимацию информационных множеств шестиугольником с гранями, нормали которых $A_{x_k} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0,04 & 0 & -1 & -0,04 \end{pmatrix}^T$, используя информацию с предыдущего шага и последних пяти шагов. На рис.1 при-ведены множественные оценки вектора состояния на шестом, седьмом и восьмом шагах. В данном случае увеличение числа шагов при аппрокси-мации позволило уменьшить множественную оценку, но потеря точности всё равно остаётся. В связи с чем возникает задача выбора оптимальной формы аппроксимирующего многогранника и числа предыдущих шагов N, информация с которых будет использоваться для вычисления текущей оценки.

Пример 2

Рассмотрим построение аппроксимации информационного множества на примере математической модели самолёта F16 [14]:



---- - аппроксимация на 5 шагов, − - аппроксимация на 1 шаг,
■ – информационное множество
Информационные множества $\overline{X}_6$, $\overline{X}_7$, $\overline{X}_8$

$$\dot{x}(t) = \mathrm{A} \cdot x(t) + \mathrm{B} \cdot u(t) + \Gamma \cdot w(t),$$
$$y(t) = G \cdot x(t) + H \cdot v(t),$$

где $\mathrm{A} = \begin{pmatrix} -0.3220 & 0.0640 & 0.0364 & -0.9917 & 0.0003 & 0.0008 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.0037 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -30.6492 & 0 & -3.6784 & 0.6646 & -0.7333 & 0.1315 & 0 & 0 \\ 8.5395 & 0 & -0.0254 & -0.4764 & -0.0319 & -0.0620 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -20.2 & 0 & -0.01 & -5.47 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -20.2 & -0.168 & 51.71 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$,

$$\mathrm{B} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^T, \ \Gamma = I,$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 57.295800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 57.295800 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

$$w_k \sim N(0,Q), \; Q = diag(0.01 \quad 0.01 \quad 0.01 \quad 0.01 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 1),$$

$$v_k \sim N(0,R), \; R = I.$$

Для демонстрации работы алгоритма, не нарушая общности, исключим из системы две последние координаты. Приведем непрерывную модель к дискретному виду (1), (2) с шагом 0.01с. Параметры полученной модели:

$$A = \begin{pmatrix} 0.996306 & 0.000639 & 0.000361 & -0.009876 & 0.000003 & 0.000010 \\ -0.001531 & 1 & 0.009816 & 0.0000701 & -0.000037 & 0.000007 \\ -0.300078 & -0.000098 & 0.963836 & 0.008028 & -0.006459 & 0.001155 \\ 0.085093 & 0.000027 & -0.000233 & 0.994823 & -0.000285 & -0.000556 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.818402 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.818402 \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 0.0000003 & -0.0000023 & –0.0006847 & –0.000030 & 0.182900 & 0 \\ 0.0000010 & 0.0000004 & 0.0001225 & –0.0000585 & 0 & 0.182900 \end{pmatrix}^T,$$

$$\Gamma = I.$$

Зададим начальные ограничения состояния, возмущений и помех в соответствии с ковариационными матрицами: опишем сверху эллипсоиды, заданные ковариационными матрицами, параллелепипедами. Множество $\bar{X}_0$ является шестимерным параллелепипедом с центром в начале координат и со сторонами равными 0,6, множество W – четырёхмерным параллелепипедом с центром в начале координат и со сторонами равными 0,6, множество V – двумерный параллелепипед с центром в начале координат и со сторонами равными 6.

Рассмотрим некоторую реализацию процесса. Информационные множества на k-м шаге будем аппроксимировать сверху параллелепипедом с гранями, параллельными координатным плоскостям: $A_{x_k} x_k \le b_{x_k}$, $A_{x_k} = \begin{pmatrix} I & -I \end{pmatrix}^T$, где I – единичная матрица размера 6.

Из результатов работы алгоритма 1 для k=1…8 (таблица) следует, что размер по пятой и шестой координатам уменьшается с течением времени. Это связано с тем, что по этим координатам возмущения не действуют, а матрица A в уравнении (1) для модели истребителя F16 является сжимающей по этим координатам. Размер по первой и второй координатам уменьшается благодаря тому, что эти координаты измеряемые, а возмущения и помехи реализовались таким образом, что пересечение множеств прогнозов и множеств, совместимых с измерением, оказалось мало.

Таблица

Значения b_{x_k} при аппроксимации информационных множеств для математической модели F16 многогранниками $X_k = \left\{ x \middle| A_{x_k} \cdot x \le b_{x_k}, A_{x_k} = \begin{pmatrix} I & -I \end{pmatrix}^T \right\}$, $k = 1..8$

b_{x_1}	b_{x_2}	b_{x_3}	b_{x_4}	b_{x_5}	b_{x_6}	b_{x_7}	b_{x_8}
0,107720	0,000022	-0,002912	0,000495	0,003916	0,000179	-0,002747	0,000583
0,003000	0,005968	0,011877	0,017744	0,003023	0,005999	0,011678	0,017304
0,295984	0,292294	0,290620	0,285475	0,278906	0,272098	0,266735	0,261135
0,311491	0,313560	0,314912	0,010436	0,013374	0,016554	0,019430	0,008753
0,245521	0,139423	0,145914	0,242891	0,207578	0,038902	0,067579	0,285803
0,245521	0,654514	0,634472	0,480982	0,426543	0,423594	0,412762	0,400535
-0,003000	0,003270	0,009467	-0,000138	-0,003148	0,000106	0,003371	-0,000309
0,101720	0,098752	-0,002969	-0,000011	0,006014	0,011976	-0,003005	-0,000047
0,329341	0,322831	0,315001	0,307039	0,300673	0,294430	0,287041	0,279960
0,302032	0,024323	0,027984	0,031587	0,034827	0,018173	0,021425	0,024940
0,245521	0,262446	0,182976	0,026273	0,012707	0,141380	0,079964	-0,165054
0,245521	-0,252645	-0,305582	-0,211817	-0,206258	-0,243312	-0,265219	-0,279786

Заключение

Приведена процедура построения аппроксимации информационного множества сверху многогранником любой формы. При этом процедура построена без выполнения вычислительно затратных операций суммы и пересечения множеств, используется неявное задание информационного множества системами линейных неравенств и уравнений. В некоторых случаях чебышевский радиус истинного информационного множества и аппроксимации совпадает, хотя форма и объём у них не одинаковы. Также рассмотрена возможность уточнения аппроксимации благодаря расширению системы за счёт накопления данных с предыдущих шагов. По сравнению с одношаговой аппроксимацией, аппроксимация на несколько шагов на некоторых итерациях позволяет уменьшить чебышевский радиус и объём аппроксимирующего многогранника. Были получены гарантированные оценки для модели истребителя F16, вектор состояния которого является шестимерным. Вычисления проводились в среде Matlab на компьютере с тактовой частотой 2ГГц и ОЗУ 4ГБ.

Библиографический список

1. Бушенков, В.А. Методы и алгоритмы анализа линейных систем на основе построения обобщенных множеств достижимости / В.А. Бушенков, А.В. Лотов // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 1980. – Т. 20. – № 5. – С. 1130–1141.

2. Кац, И.Я. Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях / И.Я. Кац, А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1978. – № 11. – С. 79–87.

3. Костоусова, Е.К. О полиэдральных оценках множеств достижимости линейных многошаговых систем с интегральными ограничениями на управление / Е.К. Костоусова // Вычислительные технологии. – 2003. – Т. 8. – № 4. – С. 55–74.

4. Куржанский, А.Б. Идентификация билинейных систем. Гарантированные псевдоэллипсоидальные оценки / А.Б. Куржанкий, В.Д. Фурасов // Автоматика и телемеханика. – 2000. – № 1. – С. 41–53.

5. Панюков, А.В. Представление суммы минковского для двух полиэдров системой линейных неравенств / А.В. Панюков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математическое моделирование и программирование». – 2012. – № 40. – С. 108–119.

6. Подивилова, Е.О. О подходе к оцениванию состояния динамических систем как к решению системы линейных неравенств / Е.О. Подивилова, В.И. Ширяев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2013. – Вып. 17, № 3(13). – С. 133–136.

7. Уханов, М.В. Алгоритмы построения информационных множеств при реализации минимаксного фильтра / М.В. Уханов, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Физика. Химия». – 2002. – Вып. 2. – № 3. – С. 19–33.

8. Ширяев, В.И. Синтез управления линейными системами при неполной информации / В.И. Ширяев // Изв. РАН. Техническая кибернетика. – 1994. – № 3. – С. 229–237.

9. Филимонов, Н.Б. Идентификация состояния и внешней среды дискретных динамических объектов методом полиэдрального программирования / Н.Б. Филимонов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 2. –С. 11–15.

10. Фокин, Л.А. Об использовании калмановского и минимаксного алгоритмов оценивания погрешностей интегрированной навигационной системы / В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления. – 2013. – № 3. – С. 65–79.

11. Эльясберг, П.Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

12. Chernousko, F.L. Minimax control for a class of linear systems subject to disturbances / F.L. Chernousko // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2005. – Vol. 127. – № 3. – pp. 535–548.

13. Schweppe, F.C. Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system inputs / F.C. Schweppe // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1968. – № 13(1). – pp. 22–28.

14. Tsai, Huan-Liang Generalized Linear Quadratic Gaussian and Loop Transfer Recovery Design of F-16 Aircraft Lateral Control System / Huan-Liang Tsai // Engineering Letters. – 2007. – Vol. 14, Issue 1. – pp. 1–6.

15. Zhou, B. A New Nonlinear Set Membership Filter Based on Guaranteed Bounding Ellipsoid Algorithm / Bo Zhou, Kun Qian, Xu-Dong Ma, Xian-Zhong Dai // Acta Automatica Sinica. Vol.39. – 2013. – No. 2. – pp. 146–154.

К содержанию

УДК 681.5.015.4

О КОРРЕКЦИИ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРУГОЙ НАГРУЗКИ

Т.К. Подлинева

Упругие деформации звеньев механических конструкций и передач являются одним из факторов, препятствующих повышению эффективности управления электромеханическими объектами и подлежащих подавлению средствами управления. Особенности синтеза корректирующего устройства исполнительных систем для упругой нагрузки и структурная схема устройства предлагаются в докладе.

Ключевые слова: корректирующий фильтр, оптимальная фильтрация, структурная схема.

Возможности линейной коррекции в решении задачи синтеза в системах с упругой нагрузкой достаточно ограничены, в особенности при наличии интенсивных помех в выходном сигнале системы. Эти ограничения привели к использованию нелинейных корректирующих устройств. Удовлетворение требованиям точности и качества исполнительной системы (ИС) достигается формированием определенного вида выходного сигнала разомкнутой ИС путем выбора соответствующих корректирующих устройств. Одним из таких устройств является корректирующий фильтр, методика синтеза которого излагается в работе [1].

В качестве характеристики выходного сигнала ИС принята спектральная плотность, полностью описывающая частотные свойства линеаризованной системы при ее минимальнофазовости Такой подход к синтезу корректирующего устройства родственен частотному методу. За располагаемый выходной сигнал ИС с резонансными свойствами принимаем сигнал, описываемый уравнением:

$$\xi(t)=x(t)+\xi_A(t)+n(t), \qquad (1)$$

где $x(t)$ – желаемый выходной сигнал; $\xi_A(t)$ – сосредоточенная помеха; $n(t)$ – широкополосный белый гауссовый шум со спектральной плотностью $N_0/2$. Сигнал сосредоточенной помехи при достаточной узкополосности ($\omega_p >> \Delta\omega$), является квазигармонической флуктуацией, случайно модулированной по амплитуде, частоте и фазе:

$$\xi_A(t)=A(t)\cos[\omega_p(t)t+\varphi(t)] \quad \text{или} \quad \xi_A(t)=A(t)\cos[\omega_0 t+\psi(t)], \qquad (2)$$

здесь ω_0 – среднее значение частоты ω_p; $\psi(t) = \varphi(t)+\int_0^t(\omega_p - \omega_0)d\tau$.

Для решения задачи синтеза корректирующего устройства в [1] использована теория оптимальной фильтрации информационного сигнала $x(t)$ из

аддитивной смеси (1). При решении задачи фильтрации учитывается зависимость наблюдаемого сообщения $\xi(t)$ не только от информационного процесса $x(t)$, но и трех сопровождающих случайных параметров: $A(t)$, $\psi(t)$, $\omega_p(t)$, поэтому необходимая точность обеспечивается при синтезе многомерного алгоритма фильтрации вектора $\overline{\lambda}_t = \{x(t), A(t), \psi(t), \omega_p(t)\}$.

Большинство работ по синтезу оптимальных фильтров использует теорию линейной фильтрации Колмогорова – Винера, рассматривающую полезный сигнал и шум $n(t)$ как нормальные случайные процессы, что, в таких случаях как рассматриваемый, является некорректным. Это привело к широкому использованию для многокомпонентных сообщений теории нелинейной фильтрации, рассматривающей любой случайный процесс в виде многомерной марковской модели [2].

Для решения поставленной задачи оптимальной фильтрации информационного процесса $x(t)$ из аддитивной смеси его с узкополосной и широкополосной помехами (1), учитывается нелинейная зависимость сигнала $\xi_A(t)$ от двух его случайных параметров (2), марковские, в общем случае многомерные, модели параметров. Для упрощения задачи синтеза в [1] фильтруемые процессы описываются линейными стохастическими дифференциальными уравнениями вида:

$$\begin{cases} \dot{x} = -\alpha x + n_\alpha(t), \\ \dot{A} = -\beta A + n_\beta(t), \\ \dot{\psi} = (\omega_p - \omega_0) + n_\varphi(t), \\ \dot{\omega}_p = -\gamma(\omega_p - \omega_0) + n_\gamma(t), \end{cases} \qquad (3)$$

где n_α, n_β, n_φ, n_γ – нормальные белые шумы с нулевыми средними значениями и односторонними спектральными плотностями N_α, N_β, N_φ, N_γ, соответственно. Нормальный характер полезного процесса и компонент сосредоточенной помехи соответствует физике работы системы, полагаемой линейной или нелинейной, но с нормализующим оконечным каскадом. Задаваясь, помимо априорных стохастических уравнений (3), начальными и граничными условиями для компонент векторного случайного процесса $\overline{\lambda}_t$, можно найти его финальное апостериорное распределение, удовлетворяющее интегро-дифференциальному уравнению Стратоновича [2]. Решение уравнения значительно упрощается при переходе от финальной апостериорной плотности вероятности фильтруемого процесса к его оценке, в качестве которой принимаются значения, соответствующие максимуму апостериорного распределения. При больших отношениях ρ=сигнал/шум и большом времени наблюдения апостериорную плотность вероятности считают приближенно нормальной, при этом оценки информационного и сопровождающих параметров являются несмещенными и эффективными, а

апостериорные дисперсии характеризуют текущие ошибки фильтрации. Алгоритм фильтрации случайного процесса $\bar{\lambda}_t$, квазиоптимальный и квазилинейный, с учетом (3), описывается системой уравнений (4), где $x^*, \mathrm{A}^*, \psi^*, \omega_{\mathrm{p}}^*$ обозначены оценочные значения фильтруемых параметров, а K_{ij}^* – усредненные по значениям шума $n(t)$ значения кумулянтов.

$$\begin{cases} \dot{x}^* = -\alpha x^* + K_{xx}^* F_x + K_{x\mathrm{A}}^* F_{\mathrm{A}} + K_{x\psi}^* F_\psi, \\ \dot{\mathrm{A}}^* = -\beta \mathrm{A}^* + K_{x\mathrm{A}}^* F_x + K_{\mathrm{AA}}^* F_{\mathrm{A}} + K_{\mathrm{A}\psi}^* F_\psi, \\ \dot{\psi}^* = (\omega_{\mathrm{p}}^* - \omega_0) + K_{x\psi}^* F_x + K_{\mathrm{A}\psi}^* F_{\mathrm{A}} + K_{\psi\psi}^* F_\psi, \\ \dot{\omega}_{\mathrm{p}}^* = -\gamma(\omega_{\mathrm{p}}^* - \omega_0) + K_{x\omega_{\mathrm{p}}}^* F_x + K_{\mathrm{A}\omega_{\mathrm{p}}}^* F_{\mathrm{A}} + K_{\psi\omega_{\mathrm{p}}}^* F_\psi. \end{cases} \quad (4)$$

Уравнения кумулянтов, например, для параметра x:

$$\begin{cases} \dot{K}_{xx}^* = \frac{1}{2} N_\alpha - 2\alpha K_{xx}^* + \sum\limits_{i,j=x,\mathrm{A},\psi} K_{xi}^* K_{jx}^* \partial^2 F^* / \partial i \partial j, \\ \dot{K}_{x\mathrm{A}}^* = -(\alpha+\beta) K_{x\mathrm{A}}^* + \sum\limits_{i,j} K_{xi}^* K_{j\mathrm{A}}^* \partial^2 F^* / \partial i \partial j, \\ \dot{K}_{x\psi}^* = -\alpha K_{x\psi}^* + K_{x\omega_{\mathrm{p}}}^* + \sum\limits_{i,j} K_{xi}^* K_{j\psi}^* \partial^2 F^* / \partial i \partial j, \end{cases} \quad (5)$$

Функция $F(t, \bar{\lambda}_t)$, производная от логарифма функции правдоподобия, определяется уравнением:

$$F(t, \bar{\lambda}_t) = -\frac{1}{N_0}[\xi(t) - S(t, \bar{\lambda}_t)]^2, \quad (6)$$

где полезный сигнал $S(t, \bar{\lambda}_t) = x(t) + \mathrm{A}(t)\cos(\omega_0 t + \psi(t))$.

В системе (4) через F_i обозначены первые производные функции по параметрам в окрестности оценочной точки, а в уравнениях кумулянтов (5) использованы вторые производные функции $F(t, \bar{\lambda}_t)$, предварительно усредненные по значениям шума n_0. Такое усреднение справедливо при больших ρ или, что то же самое, при высокой апостериорной точности фильтруемых параметров. Введенные усреднения отражены индексом – звездочкой, производные взяты в окрестности оценочной точки. С учетом фильтрующих свойств синтезируемого нелинейного устройства получим уравнения функции $F(t, \bar{\lambda}_t)$ и ее первых производных:

$$F(t,\bar{\lambda}_t)=\frac{1}{N_0}[2\xi(t)(x+\mathrm{A}\cos(\omega_0 t+\psi))-x^2-\frac{\mathrm{A}^2}{2}-2\mathrm{A}x\cos(\omega_0 t+\psi)], \quad (7)$$

$$\begin{cases} F_x=\left.\dfrac{\partial F}{\partial x}\right|_{\bar{\lambda}_t=\bar{\lambda}_t^*}=\dfrac{2}{N_0}[\xi(t)-x^*-\mathrm{A}^*\cos(\omega_0 t+\psi^*)], \\ F_{\mathrm{A}}=\left.\dfrac{\partial F}{\partial \mathrm{A}}\right|_{\bar{\lambda}_t=\bar{\lambda}_t^*}=\dfrac{2}{N_0}[\xi(t)\cos(\omega_0 t+\psi^*)-\dfrac{\mathrm{A}^*}{2}-x^*\cos(\omega_0 t+\psi^*)], \\ F_{\psi}=\left.\dfrac{\partial F}{\partial \psi}\right|_{\bar{\lambda}_t=\bar{\lambda}_t^*}=\dfrac{2}{N_0}[-\xi(t)\mathrm{A}^*\sin(\omega_0 t+\psi^*)+\mathrm{A}^*x^*\sin(\omega_0 t+\psi^*)]. \end{cases} \quad (8)$$

Усредненные по n_0 значения вторых производных функции $F(t,\bar{\lambda}_t)$:

$$\begin{cases} F_{xx}^*=-\dfrac{2}{N_0}, \quad F_{\mathrm{AA}}^*=-\dfrac{1}{N_0}, \quad F_{\psi\psi}^*=-\dfrac{(\mathrm{A}^*)^2}{N_0}, \\ F_{xA}^*=-\dfrac{2}{N_0}\cos(\omega_0 t+\psi^*), \quad F_{x\psi}^*=\dfrac{2}{N_0}\mathrm{A}^*\sin(\omega_0 t+\psi^*), \\ F_{\mathrm{A}\psi}^*=-\dfrac{2}{N_0}\mathrm{A}^*\sin^2(\omega_0 t+\psi^*). \end{cases} \quad (9)$$

Устройство, моделирующее уравнения (4,5) с учетом (8,9), воспроизводит информационный сигнал $x^*(t)$ с минимальной среднеквадратической погрешностью. Однако структура оптимального фильтра чрезмерно сложна, упрощение возможно, если перейти к квазистационарному алгоритму фильтрации, при больших отношениях ρ кумулянты K_{ij}^*, характеризующие статистическую зависимость оценок параметров, по истечении времени переходного процесса стремятся к своим стационарным значениям: $K_{ij}^*(t)=\overline{K}_{ij}^*$. Время установления стационарного состояния обратно пропорционально квадратному корню из ρ. Из (9) усредненные по времени вторые производные $F_{ij}^*(t,\bar{\lambda}_t)$ определяются уравнениями:

$$F_{xx}^*=-\frac{2}{N_0}, \quad F_{\mathrm{AA}}^*=-\frac{1}{N_0}, \quad F_{\psi\psi}^*=-\frac{\sigma_{\mathrm{A}}^2}{N_0}, F_{x\mathrm{A}}^*=F_{x\psi}^*=F_{\mathrm{A}\psi}^*=0, \quad (10)$$

σ_{A}^2 – дисперсия случайного параметра A(t).

Условиями апостериорной статистической независимости оценок компонент λ_i^* и λ_j^* являются: их априорная независимость и сигналь-

ная ортогональность и такими условиями обладают, например, амплитуда и фаза квазигармонического сигнала. С учетом этой особенности параметров сигнала система уравнений кумулянтов (5) упрощается:

$$\begin{cases} N_\alpha / 2 - 2\alpha \overline{K}^*_{xx} + (\overline{K}^*_{xx})^2 \overline{F}^*_{xx} = 0, \\ N_\beta / 2 - 2\beta \overline{K}^*_{\mathrm{AA}} + (\overline{K}^*_{\mathrm{AA}})^2 \overline{F}^*_{\mathrm{AA}} = 0, \\ N_\varphi / 2 + 2\overline{K}^*_{\psi\omega_\mathrm{p}} + (\overline{K}^*_{\psi\psi})^2 \overline{F}^*_{\psi\psi} = 0, \\ \overline{K}^*_{\omega_\mathrm{p}\omega_\mathrm{p}} - \gamma \overline{K}^*_{\psi\omega_\mathrm{p}} + \overline{K}^*_{\psi\psi} \overline{K}^*_{\psi\omega_p} \overline{F}^*_{\psi\psi} = 0, \\ N_\gamma / 2 - 2\gamma \overline{K}^*_{\omega_\mathrm{p}\omega_\mathrm{p}} + (\overline{K}^*_{\psi\omega_\mathrm{p}})^2 \overline{F}^*_{\psi\psi} = 0, \\ \overline{K}^*_{\mathrm{A}\psi} = \overline{K}^*_{\mathrm{A}\omega_\mathrm{p}} = \overline{K}^*_{x\psi} = \overline{K}^*_{x\mathrm{A}} = \overline{K}^*_{x\omega_\mathrm{p}} = 0. \end{cases} \quad (11)$$

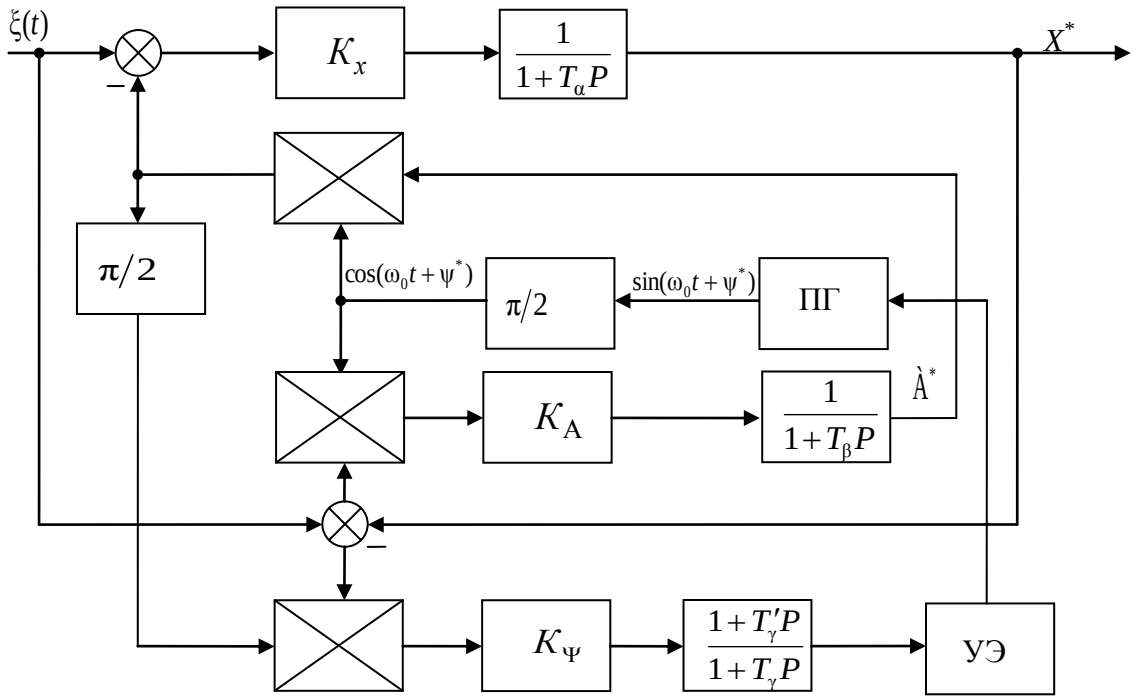
Из (11) находим стационарные значения кумулянтов и на основании (4,8,10) получаем систему уравнений квазистационарного и квазилинейного оптимального фильтра:

$$\begin{cases} x^* = \dfrac{K_x}{T_\alpha p + 1}[\xi(t) - \mathrm{A}^* \cos(\omega_0 t + \psi^*)], \\ \mathrm{A}^* = \dfrac{K_\mathrm{A}}{T_\beta p + 1}(\xi(t) - x^*)\cos(\omega_0 t + \psi^*), \\ \dot{\psi}^* = K_\psi \dfrac{T'_\gamma p + 1}{T_\gamma p + 1}(x^* - \xi(t))\mathrm{A}^* \sin(\omega_0 t + \psi^*), \end{cases} \quad (12)$$

где

$$\begin{cases} K_x = 2\overline{K}^*_{xx} T_\alpha / N_0, \quad K_\mathrm{A} = 2\overline{K}^*_{\mathrm{AA}} T_\beta / N_0, \\ K_\psi = 2\left(\overline{K}^*_{\psi\psi} + T_\gamma \overline{K}^*_{\psi\omega_p}\right) / N_0, \quad T_\alpha = 1/(\alpha + 2\overline{K}^*_{xx} / N_0), \\ T_\beta = 1/(\beta + 2\overline{K}^*_{\mathrm{AA}} / N_0), \quad T_\gamma = 1/\gamma, \quad T'_\gamma = \overline{K}^*_{\psi\psi} T_\gamma / (T_\gamma \overline{K}^*_{\psi\omega_\mathrm{p}} + \overline{K}^*_{\psi\psi}), \end{cases}$$

Структурная схема оптимального корректирующего фильтра (12), воспроизводящего желаемый выходной сигнал системы с минимальной среднеквадратической ошибкой, представлена на рисунке, где ПГ – подстраиваемый по частоте генератор, УЭ – управляющий элемент.



Структурная схема оптимального корректирующего устройства

Оптимум по быстродействию является существенным аргументом в защиту использования нестационарной схемы корректирующего устройства (рис.), т.к. необходимые усложнения схемы оправдываются значительным улучшением качества скорректированной системы. Но и упрощенный квазиоптимальный вариант схемы, на базе стационарных значений кумулянтов K_{ij}, позволяет получить очень хорошие результаты, что убедительно продемонстрировано в [3] на примере коррекции исполнительной системы, работающей на упругую нагрузку.

Библиографический список

1. Подлинева, Т.К. Особенности синтеза управляемого привода с инерционной обратной связью / Т.К. Подлинева // Наука ЮУрГУ: материалы 61-й научной конференции. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2009. – Т.2. – С. 18.

2. Тихонов, В.И. Статистическая радиотехника / В.И. Тихонов. – 2-е изд., перераб.и доп. – М.: Радио и связь, 1982. – 624 с.

3. Подлинева, Т.К. Вопросы синтеза исполнительной системы для упругой нагрузки / Т.К. Подлинева // Труды научно-практической конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ, 2013. – С. 58.

К содержанию

УДК 519.853.4 + 681.5.015.4

ОБ ОДНОЙ ЗАДАЧЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛИ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ

В.И. Ширяев, А.Г. Цыбулевский

Рассматривается задача нелинейной параметрической идентификации. Обозначаются трудности применения метода наименьших квадратов при решении этой задачи, связанные с необходимостью решения многоэкстремальной оптимизационной задачи. Приводятся результаты численных экспериментов по решению задачи с использованием алгоритмов глобальной оптимизации.

Ключевые слова: нелинейная идентификация, метод наименьших квадратов, глобальная оптимизация.

При решении задач синтеза систем управления возникает необходимость решения задачи идентификации – определение структуры и параметров модели системы. Важным частным случаем является идентификация динамических систем с ненаблюдаемыми внешними воздействиями, выходные данные которых принято называть временными рядами. Идентификация включает в себя выбор множества моделей-кандидатов, выбор оценки степени соответствия испытываемой модели данным наблюдений и выбор модели с наибольшей оценкой [1]. В качестве множества моделей-кандидатов рассматривается семейство логистических отображений, которые при некоторых значениях параметров могут демонстрировать сложную хаотическую динамику [2]. Решение задачи идентификации для нелинейной модели на основе логистических отображений применялось для повышения точности алгоритмов обработки измерений в работе [3]. Решению задачи идентификации нелинейной системы с моделью в классе логистических отображений посвящен данный доклад.

Рассматривается задача нелинейной параметрической идентификации одномерной системы по имеющимся измерениям с моделью в классе логистических отображений:

$$x_{k+1} = \lambda x_k \left(1 - x_k\right), k = \overline{1, N-1},$$

$$y_k = x_k + \varepsilon_k, k = \overline{1, N},$$

где x_k – значение состояния (фазы) системы, $x_1 \in (0;\, 0.5)$ – начальное условие, $\lambda \in (3.5699;\, 4)$ – параметр логистического отображения, y_k – измеряемое значение фазы, $\varepsilon_k \sim N\left(0, \sigma^2\right)$ – ошибки измерений – независимые случайные величины, имеющие нормальное распределение. Требуется по имеющемуся набору измерений $\left\{y_k\right\}_{k=1}^{N}$ оценить значения параметра λ и начального состояния x_1.

Классический подход к выбору оценки степени соответствия модели наблюдениям при использовании вероятностной модели погрешностей измерения состоит в применении метода максимального правдоподобия, который в случае независимых нормально распределенных ошибок измерений сводится к решению задачи наименьших квадратов:

$$Q(\lambda, x_1) = \sum_{k=1}^{N} \left(y_k - x_k(\lambda, x_1) \right)^2 \to \min.$$

Аналитическое решение данной задачи затруднено, при использовании численных методов оптимизации возникает вопрос существенной многоэкстремальности целевой функции и сложности поиска глобального минимума [2]. Пример графика целевой функции для модельного примера – временной ряд $\{y_k\}_{k=1}^{N}$ представлен зашумленной реализацией логистического отображения (соотношение с/ш 20дБ) изображен на рис. 1. Для преодоления многоэкстремальности, получаемой при использовании метода наименьших квадратов, используется однородный алгоритм глобальной оптимизации.

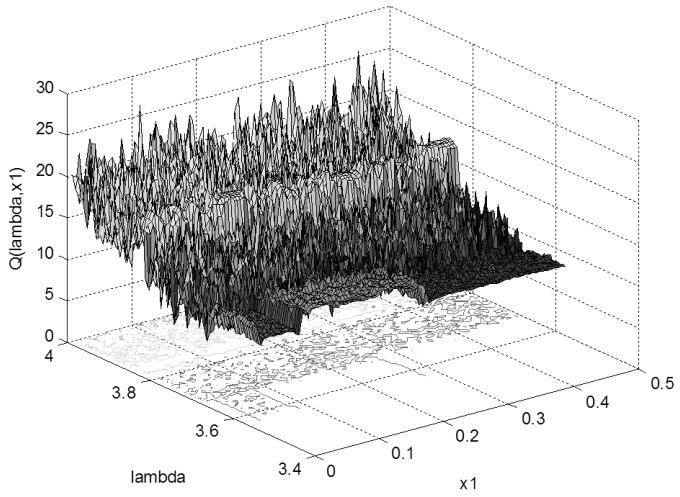


Рис. 1. Пример графика целевой функции

В соответствии с [4,5], будем говорить, что алгоритм оптимизации функции $f(x)$, определенной на множестве X, проводящий вычисления (испытания) функции в последовательности точек $\{x_k\}_{k=1}^{\infty}, x_k \in X$, относится к классу однородных алгоритмов гло-бальной оптимизации, если выполнены три условия:

1. Для любых двух целевых функций, отличающихся на константу, последовательности точек испытаний $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$ совпадают.

2. Функции $m_k\left(x, x_1, f\left(x_1\right),..., x_k, f\left(x_k\right)\right)$ и $s_k\left(x, x_1, f\left(x_1\right),..., x_k, f\left(x_k\right)\right)$ определены на каждой итерации алгоритма и удовлетворяют условиям:

A1) $m_k\left(x_i\right) = f\left(x_i\right), i = \overline{1,k}$;

A2) $s_k\left(x_i\right) = 0, i = \overline{1,k}$;

A3) $s_k\left(x\right) > 0, x \neq x_i, i = \overline{1,k}$;

A4) $m_k\left(x\right), s_k\left(x\right)$ удовлетворяют условию Липшица на X.

3. Алгоритм может быть представлен в виде следующих шагов.

Шаг 1. Выбрать начальные точки $x_i \in \mathbb{R}^d, i = \overline{1,M}$. Положить $k = M$.

Шаг 2. Вычислить $x_{k+1} = \arg\min_{x \in X} P\left(m_k\left(x\right), s_k\left(x\right)\right)$, где $P\left(m_k\left(x\right), s_k\left(x\right)\right): \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ – функция выбора.

Шаг 3. Вычислить значение $f\left(x_{k+1}\right)$, положить $k = k + 1$.

Шаг 4. Если выполнено условие выхода φ, то выйти, иначе вернуться на шаг 2.

В [5] сформулированы достаточные условия сходимости, накладывающие дополнительное ограничение на функции $m_k\left(x\right)$, $s_k\left(x\right)$:

A5) $m\left(x, x_1, f\left(x_1\right) + c,..., x_k, f\left(x_k\right) + c\right) = m\left(x, x_1, f\left(x_1\right),..., x_k, f\left(x_k\right)\right) + c$, $k \in \mathbb{N}, c \in \mathbb{R}$;

A6) $s\left(x, x_1, f\left(x_1\right) + c,..., x_k, f\left(x_k\right) + c\right) = s\left(x, x_1, f\left(x_1\right),..., x_k, f\left(x_k\right)\right), k \in \mathbb{N}, c \in \mathbb{R}$;

A7) $s_k\left(x\right) \geq \min_{i=\overline{1,k}} \left\| x - x_i \right\|$.

В качестве функции $m_k\left(x\right)$ использовалась минимаксная модель липши-цевой целевой функции [6] – выпуклая линейная комбинация липшицевых миноранты и мажоранты:

$$m_k\left(x\right) = \alpha \min_{i=1,k}\left(f\left(x_i\right) + L\left\| x - x_i \right\|\right) + \left(1 - \alpha\right)\max_{i=1,k}\left(f\left(x_i\right) - L\left\| x - x_i \right\|\right),$$

где $\alpha \in \left[0;1\right]$ – коэффициент выпуклой линейной комбинации, $L = r \max_{i,j=1,k,i\neq j} \left| f\left(x_i\right) - f\left(x_j\right)\right| / \left\| x_i - x_j \right\|$ – оценка константы Липшица для целевой функции, корректируемая в ходе работы алгоритма, $r \geq 1$ – доверительный коэффициент. Предложенная функция $m_k\left(x\right)$ удове-творяет условиям A1, A4, A5, позволяющим использовать её в однородном алгоритме глобальной оптимизации.

В ходе вычислительного эксперимента, производилась оценка параметров для модельных примеров – зашумленных реализаций логистического отображения длины $N = 20$ (соотношение с/ш 20дБ). Пример реализации процесса с параметрами $\lambda = 3.8$, $x_1 = 0.3$ и его зашумления (соотношение с/ш 20дБ) изображен на рис. 2.

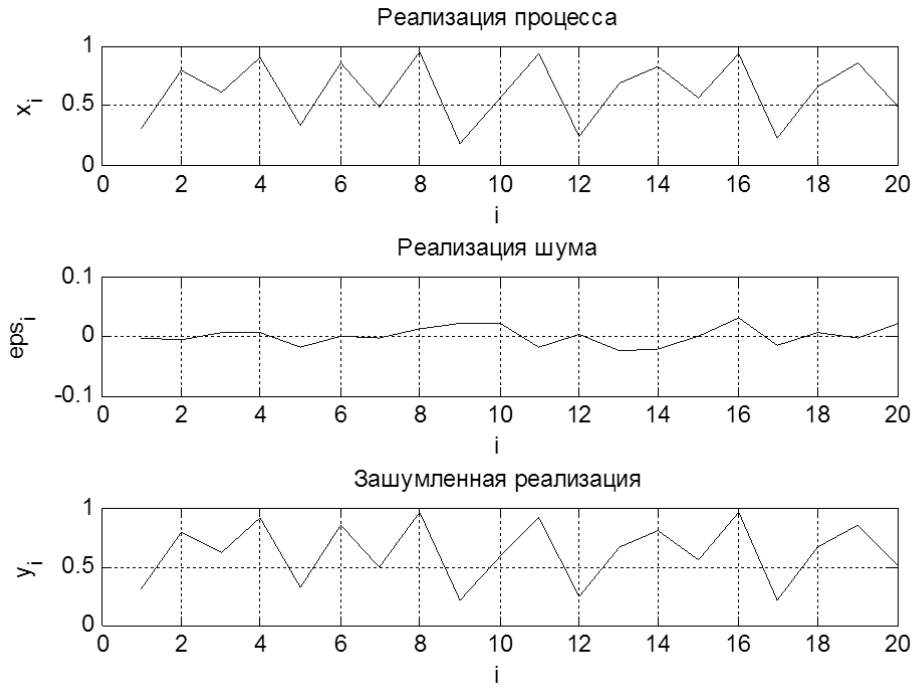


Рис. 2. Реализация процесса и шума измерений

Вычислительный эксперимент был ориентирован на работу алгоритма оценивания в контуре системы управления, поэтому в отличие от [3], испытания проводились при ограничении времени работы алгоритма оценивания – 60 секунд. На рис. 3. изображен совмещенный график ошибки аппроксимации и прогноза. Стоит заметить, что для целей прогнозирования параметры отображения должны быть найдены с высокой точностью из-за высокой чувствительности логистического отображения к значению параметра и начального условия.

По результатам вычислительного эксперимента средняя абсолютная погрешность для оценок параметра λ составила 0.02, для оценок начального значения x_1 – 0.03. Такая точность нахождения параметров оказывается неприемлемой для построения качественного прогноза.

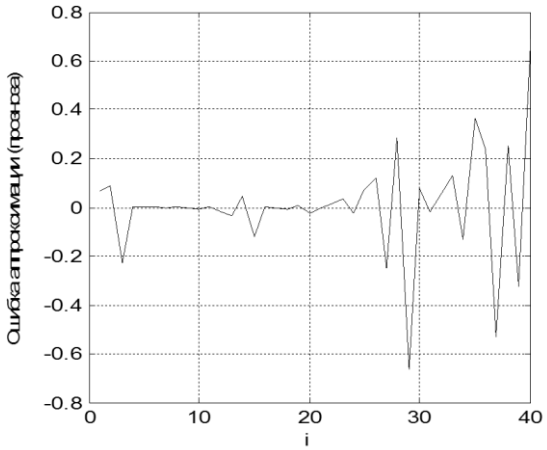


Рис. 3. График ошибки аппроксимации (прогноза)

В работах [7, 8] обозначен ряд трудностей применения метода наименьших квадратов в практических задачах. Применение подходов к оцениванию, основанных на методе наименьших квадратов, для нелинейных моделей помимо вышеупомянутых трудностей может приводить к существенным трудностям, связанных с многоэкстремальностью минимизируемого функционала. Рассматриваемые алгоритмы глобальной оптимизации позволяют частично решить задачу, но для целей прогнозирования подобных нелинейных процессов при работе в контуре системы управления требуется разработка более эффективных методов.

Библиографический список

1. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 368 с.

2. Смирнов, Д.А. Метод оценки параметров одномерных отображений по хаотическим рядам / Д.А. Смирнов, В.С. Власкин, В.И. Пономаренко // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, № 3. – С. 18–26.

3. Манько, Н.Г. Повышение точности оценок в алгоритме обработки измерений на выходе волоконно-оптического гироскопа с помощью применения моделей детерминированного хаоса / Н.Г. Манько, Л.Н. Шалимов, Г.В. Шестаков, А.Н. Штыков, А.С. Шелудько, В.И. Ширяев // Труды науч.-пр. конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления». – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ. – 2013. – С. 43–46.

4. Елсаков, С.М. О многоэкстремальности в задачах оценивания систем детерминированного хаоса / С.М. Елсаков, В.И. Ширяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – № 3. – С. 37–41.

5. Елсаков С.М. Однородные алгоритмы многоэкстремальной оптимизации / С.М. Елсаков, В.И. Ширяев // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. – 2010. – № 10. – С. 1727–1740.

6. Цыбулевский, А.Г. Однородный алгоритм глобальной оптимизации на основе минимаксной модели липшицевой целевой функции и его применение при решении задачи параметрической идентификации с использованием логисти-ческого отображения / А.Г. Цыбулевский // Труды науч.-пр. конференции «Актуальные проблемы автоматизации и управления» – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ. – 2013. – С. 108–112.

7. Эльясберг, П.Е. Измерительная информация: сколько её нужно? Как её обрабатывать? / П.Е. Эльясберг. – М.: Наука, 1983. – 208 с.

8. Матасов, А.И. Метод гарантирующего оценивания / А.И. Матасов. – М.: Изд-во МГУ, 2009. – 100 с.

К содержанию

ФИЗИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УДК 669.017:536 + 669.14.018.4

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБРАЗОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРИСТАЛЛИЗУЮЩИХСЯ РАСПЛАВАХ СТАЛИ Х25Т1

Н.М. Танклевская, Г.Г. Михайлов

В работе выполнен термодинамический анализ процессов образования включений при охлаждении и кристаллизации жидкого металла, близкого по составу коррозионностойкой стали Х25Т1. Показано, что для предотвращения проявления дефекта титановой неоднородности, необходимо снижать концентрацию азота в жидком металле. Обнаружено, что повышение содержания алюминия в исходном металле приводит к снижению массы оксинитридов титана,образующихся при охлаждении, за счет образования корунда.

Ключевые слова: термодинамический анализ, коррозионностойкие стали, «титановая пористость», включения, охлаждение расплава, кристаллизация, расплава, оксинитриды титана, корунд.

Основным дефектом коррозионностойких сталей, содержащих титан, является так называемая «титановая пористость». Этот дефект выявляется в макроструктуре в виде скоплений небольших пор, которые обычно располагаются у края образца. Исследование дефекта показало, что поры сопровождаются грубыми скоплениями оксидов и нитридов титана [1].

В связи с этим в данной работе предполагалось провести термодинамический анализ процессов образования включений в жидком металле при охлаждении и кристаллизации стали Х25Т1.

С точки зрения термодинамического анализа данную сталь можно рассматривать как девятикомпонентную систему Fe – Ti –Al – Si – Cr – Mn – C – N – O.

Выполненный ранее термодинамический анализ [2] позволил установить, что в зависимости от концентраций титана и азота равновесными жидкому металлу системы Fe – Ti – Ni – Cr – Al – C – N – O (сталь типа Х25Т1) неметаллическими фазами могут быть либо твердый раствор оксидов (Al_2O_3, Cr_2O_3), либо твердый оксикарбонитридный раствор (TiO, TiC, TiN). Поскольку никель как компонент не входил в состав неметаллических фаз, находящихся в равновесии с жидким металлом исследуемой стали, а влиял на строение поверхности растворимости кислорода в металле лишь через коэффициенты активности компонентов металлического расплава, исключение его из рассмотрения не может качественно изменить картину фазовых равновесий. Следовательно, можно предположить, что

жидкий металл системы, близкой по составу рассматриваемым коррозионностойким сталям будет находиться в равновесии с теми же твердыми растворами: оксикарбонитридным раствором титана (TiO,TiC,TiN) и оксидом алюминия с примесью оксида хрома (Al_2O_3,Cr_2O_3), образующимися по реакциям:

$$|Al_2O_3|_{тв.р.} = 3[Al]_ж + 5[O]_ж; \quad (1)$$

$$|Cr_2O_3|_{тв.р.} = 3[Cr]_ж + 5[O]_ж; \quad (2)$$

$$|TiO|_{тв.р.} = [Ti]_ж + [O]_ж; \quad (3)$$

$$|TiC|_{тв.р.} = [Ti]_ж + [C]_ж; \quad (4)$$

$$|TiN|_{тв.р.} = [Ti]_ж + [N]_ж. \quad (5)$$

Индексы: тв.р. – твердый раствор; ж – растворенные в жидком металле.

Исходные данные для анализа приведены в работе [2]. Исследуемые составы металла приведены в таблице. При проведении расчетов твердые растворы считали совершенными и активности их компонентов приравнивали мольным долям. Активности компонентов металлического расплава рассчитывали по теории Вагнера с использованием литературных значений параметров взаимодействия элементов в жидком железе.

Таблица

Составы исследуемого металла

№	Химический состав металла, мас. %						
	[N]	[Al]	[Ti]	[Si]	[Cr]	[Mn]	[C]
1	0,035	0,05	0,60	0,50	25,00	1,00	0,08
2	0,030	0,05					
3	0,035	0,01					
4	0,030	0,01					

Результаты расчета представлены на рис. 1 и 2 в виде изотермических изосоставных сечений поверхности растворимости компонентов в жидком металле (ПРКМ) системы Fe – Ti – Al – Si – Cr – Mn – C – N – O.

На рис. 1 показаны фазовые равновесия, реализующиеся при T=1823 K в жидком металле, близком по составу стали Х25Т1, в зависимости от содержания растворенных титана и азота ([Al]=0,05 мас. %; [Cr]=25 мас. %; [Si]=0,5 мас. %; [Mn]=1 мас. %; [C]=0,08 мас. %).

В области I заданы составы жидкого металла, находящегося в равновесии с практически чистым корундом. В области II – составы жидкого металла, находящегося в равновесии с твердыми растворами (TiO, TiC, TiN). Контрастная линия ab соответствует составам жидкого металла, находящегося в равновесии с обеиминеметаллическими фазами. Тонкими линиями на рисунках нанесены изокислородные сечения.

Расчеты показали, что состав равновесного оксикарбонитридного раствора существенно зависит от содержания азота в жидком металле. В случае реализации равновесия $Me_{ж}$–$(Al_2O_3,Cr_2O_3)_{тв.р}$–$(TiO,TiC,TiN)_{тв.р.}$ увеличении его концентрации с 0,0032 до 0,3162 мас. % (линия ab, рис. 1) приводит к росту содержания TiN в твердом растворе с 3,56 до 92,34 мол. %. Содержание TiO при этом падает с 96,69 до 7,57 мол. %. Уменьшается и содержание TiC (с 0,75 до 0,09 мол. %).

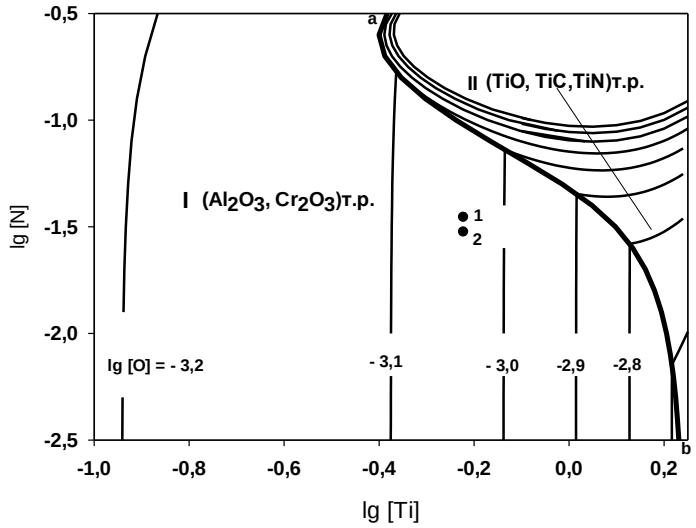


Рис. 1. Фазовые равновесия в металлических расплавах системы Fe-Ti-25 %Cr-Al-Mn-Si-N-C-O при T = 1823 К([Al] = 0,05 мас. %)

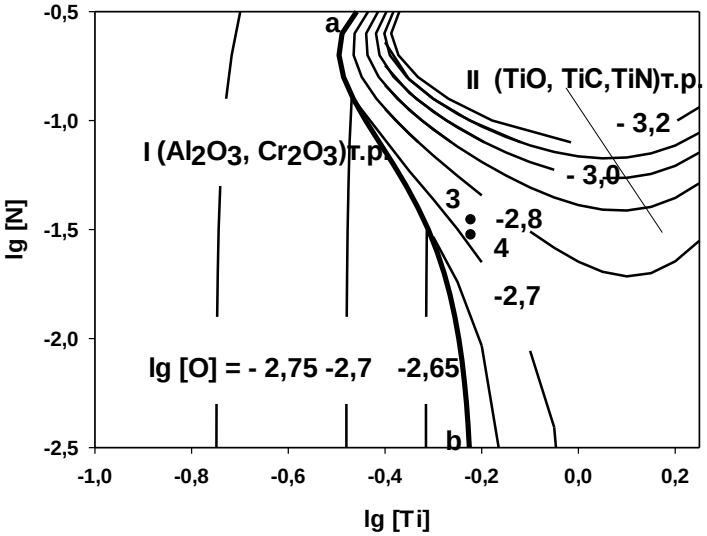


Рис. 2. Фазовые равновесия в металлических расплавах системы Fe-Ti-25 %Cr-Al-Mn-Si-N-C-O при T = 1823 К([Al] = 0,01 мас. %)

Из сравнения рис. 1 и 2 следует, что снижение содержания алюминия сужает область составов жидкого металла, равновесного с корундом.

Для анализа перераспределения компонентов жидкой стали Х25Т1 при охлаждении и кристаллизации металлического расплава, были проведены балансовые расчеты для составов металла, представленных в таблице.

На рис. 1 и 2 этим составам соответствуют точки, обозначенные цифрами 1–4. Видно, что металл составов, соответствующих точкам 1 и 2, находится в равновесии с корундом, а металл составов, соответствующих точкам 3 и 4, попадает в область равновесияс твердым раствором (TiO, TiC, TiN).

При снижении температуры растворимость кислорода, углерода и азота в жидком металле падает, что приводит к образованию неметаллических включений. Для описания процессов перераспределения компонентов жидкой стали между металлом и образующимися неметаллическими фазами необходимо провести балансовые расчеты процессов, протекающих при охлаждении и кристаллизации расплава.

Распределение элементов между фазами при охлаждении металла можно описать системой уравнений типа:

$$\frac{[Э]^0_{ж}}{100}\cdot m^0_{мет} = \frac{[Э]_{ж}}{100}\cdot m^{ж}_{мет} + \frac{y_{э}\cdot A_{э}}{M_{вкл}}\cdot m_{вкл}, \qquad (6)$$

где $[Э]^0_{ж}$ и $[Э]_{ж}$ – содержание элемента в жидком металле до и после охлаждения, мас. %; $m^0_{мет}$ – масса металла до охлаждения, кг.

Варьируя с определенным шагом температуру (ΔТ=2 град), для конкретного состава металла можно рассчитать массу и состав включений, образующихся при охлаждении до температуры ликвидус, а также состав металла перед кристаллизацией.

При проведении дальнейших расчетов были сделаны следующие допущения. Кристаллизация металла протекает порционно. При этом в случае образования определенных (в соответствии с уравнением изотермы реакции) включений распределение компонентов жидкого металла можно описать системой уравнений типа:

$$\frac{[Э]^0_{ж}}{100} m^0_{мет} = \frac{[Э]_{ж}}{100} m^{ж}_{мет} + \frac{[Э]_{тв}}{100} m^{тв}_{мет} + \frac{y_{э} A_{э}}{M_{вкл}} m_{вкл}, \qquad (7)$$

где $[Э]_{тв}$ – содержание элемента в твердом металле, мас. %; $m^{тв}_{мет}$ – масса затвердевшей порции металла, кг.

Концентрации компонентов в твердом металле определяли с помощью равновесных коэффициентов распределения, рассчитанных из двойных диаграмм состояний Fe – Э как отношение массовой концентрации элемента в твердом металле к аналогичной концентрации в расплаве. Численные значения коэффициентов приведены в работе [2].

Задавая величину порций кристаллизующегося металла в размере не более пяти процентов от массы металлического расплава, можно рассчитать массу и состав образующихся кристаллизационных включений.

Результаты балансовых расчетов процессов, протекающих при охлаждении и кристаллизации 1 тонны жидкой стали Х25Т1 (состав I) представлены на рис.3.

Расчеты показали, что при охлаждении металла данного состава сначала вплотьдо температуры 1750 К происходит образование включений корунда. Затем в качестве равновесных металлу фаз начинают выделяться оксикарбонитриды титана, исходный состав которых (в мол. %) равен: (TiO) = 27,65; (TiC) = 0,48; (TiN)= 71,87.

Доля карбида титана в образующихся включениях мала и по ходу охлаждения металла она практически не меняется.Зато растет доля TiN за счет уменьшения доли TiO. В связи с этим в интервале температур охлаждения концентрации титана и азота в жидком металле снижаются (участки ab и a′′b′′ соответственно, рис. 2), а концентрация углерода практически не изменяется (участок a'b', рис. 2). К началу кристаллизации равновесные включения имеют состав (в мол. %):(TiO) = 18,25; (TiC) = 0,51; (TiN)= 81,24 (точка h).

Далее кристаллизация металла сопровождается образованием равновесных неметаллических включений (TiO, TiC, TiN), доля карбида титана в которых постепенно возрастает,а доля оксида титана падает. При этом концентрации титана и углерода в жидкой части металла увеличиваются (участки b'd' и bd, рис. 3 соответственно), а концентрация азота сначала увеличивается (участок b"c"), а затем, когда содержание TiOв равновесных включениях падает до нуля (участок c"d", рис. 3),снижается.

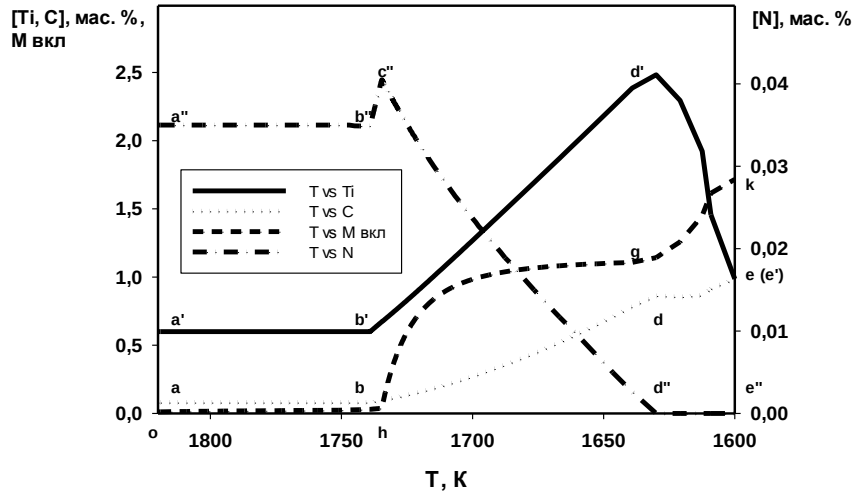


Рис. 3. Изменение концентраций титана, углерода и азота в жидком металле и масса образовавшихся включений при охлаждении и кристаллизации стали Х25Т1 в зависимости от температуры

В точке d″ концентрация азота снижается до нуля и дальнейшее затвердевание металла, согласно результатам расчета, сопровождается выделением чистого карбида титана (участок gk).

На рис. 4 показано изменение состава оксикарбонитридов титана, образующихсяпри охлаждении и кристаллизации стали Х25Т1 (состав I).

При кристаллизации происходит интенсивное выделение включений карбонитридов титана, в которых доля карбида титана, как было сказано выше, постепенно возрастает (участок b'd'). В конце кристаллизации выделятся значительное количество карбидов титана (участок d″e″).

Результаты расчетов показали, что снижение концентрации алюминия в исходном металле (до 0,01мас. %)исключает выделение включений корунда.Снижение же содержания азота (до 0,030мас. %) в исходном металлическом расплаве качественно не меняет тип включений, образующихся при охлаждении металла,но уменьшает интенсивность выделения включений оксикарбонитридов титана, даже при высоком содержании алюминия.

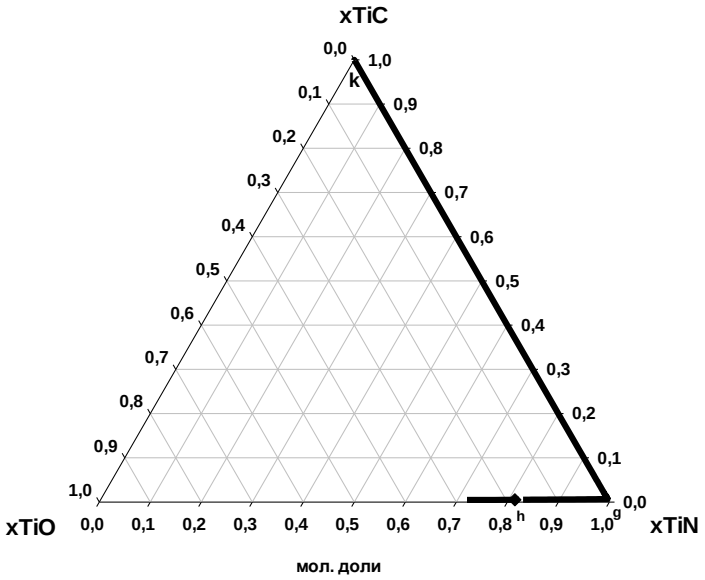


Рис. 4. Составы равновесных оксикарбонитридов титана

Выводы

В работе .выполнен термодинамический анализ процессов образования включений при охлаждении и кристаллизации жидкого металла, близкого по составу коррозионностойкой стали Х25Т1.

Расчеты показали, что при концентрации [Al]=0,05мас. % и [N]=0,035мас. % в исходном металле, его охлаждение сначала сопровождается образованиемвключений корунда. Затем, начиная с температуры 1750 К начинают выделяться оксинитриды титана в качестве равновесных неметаллических включений.

Снижение концентрации алюминия до 0,01мас. % исключает образование включений корунда, но приводит к увеличению массы образовавшихся при охлаждении металла оксинитридов.

Снижение содержания азота (до 0,030мас. %) в исходном металлическом расплаве качественно не меняет тип включений, образующихся при охлаждении металла. Однако этоуменьшает интенсивность выделения включений оксинитридов титанапри охлаждении стали, даже при низком содержании алюминия.

Кристаллизационные включения, согласно результатам расчета, представляют собой оксикарбонитриды титана, состав которых постепенно меняется от оксинитридов к карбонитридам и карбидам.

Таким образом, для предотвращения проявления дефекта титановой неоднородности, причиной которого является выделение при охлаждении металла большого количества оксинитридов титана, необходимо снижать концентрацию азота в жидком металле. Повышение содержания алюминия в исходном металле приводит к снижению массы образующихся при охлаждении оксинитридов титана, но за счет образования корунда.

Библиографический список

1. Охримович, Б.П. Дефекты слитков легированных сталей и выбор оптимальных усовий разливки / Б.П. Охримович, Ю.Г. Гуревич, А.К. Петров. – Челябинск: Южно-Уральское кн. изд., 1966. – 96 с.

2. Танклевская, Н.М. Фазовые равновесия в кристаллизующихся расплавах системы Fe–Ti–Cr–Mn–Si–Al–C–N–O / Н.М. Танклевская, Г.Г. Михайлов // Журнал физической химии. – 2006. – Т.80. – № 11. – С. 2087–2091.

К содержанию

УДК 669.046.41

ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ФАЗ ПРИ ОКИСЛИТЕЛЬНОМ ОБЖИГЕ ХРОМОВЫХ РУД

И.Ю. Пашкеев, Г.Г. Михайлов

В статье обобщены результаты многолетних исследований и изменений физико-химических свойств в хромовых рудах Рай-Из и Алапаевского массива в процессе окислительного нагрева и обжига при температурах до 1500 ^{o}C. Приведеные результаты исследований авторов дают экспериментальное обоснование новым технологическим схемам комплексной переработки хромовых руд с извлечением из них полезных примесных элементов и повышение качества кончентратов.

Ключевые слова: хромовая руда, обогащение, окислительный обжиг, образование фаз, примесные элементы.

В статье основной объем приводимых результатов получен при исследовании хромовой руды месторождения «Центральное» массива Рай-Из Полярного Урала. К последним результатам следует отнести данные, полученные прииссследовании хромовых руд Алапаевского массива.

Месторождение «Центральное» представлено сплошной и вкрапленной хромовой рудой. Сплошная хромовая руда практически нацело (более 95 %) сложена зернами хромшпинелида размером до 10 мм. Зерна хромшпинелида трещиноваты. Нерудные минералы (оливин, серпентин и хлорит) располагаются в промежутках между зернами хромшпинелида в виде вкраплений сложной формы, размером до 4 мм.

Минеральный состав рудных минеральных агрегатов месторождения «Центральное» массива Рай-Из по данным рентгенофазового анализа включает:

- хромшпинелиды: хромпикотит (Mg, Fe)(Cr, $Al)_2O_4$ и пикохромит $MgCr_2O_4$;
- серпентины: $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$, $Mg_{4,5}Al_{1,5}(Si_{2,5}Al_{1,5})O_{10}(OH)_8$;
- оливины: $2(Fe_{0,44}Mg_{0,56})O{\cdot}SiO_2$, $Mg_{1,38}Fe_{0,61}Ca_{0,01}SiO_4$;
- бруситMg$(OH)_2$.

Согласно неоднократно проведенным исследованиям, в т. ч. Всероссийским научно-исследовательским институтом минерального сырья им. Н.М. Федоровского, руды массива Рай-Из содержат МПГ (г/т): Pt (платина) до 2,0, Pd (палладий) до 1,35, Ru (рутений) до 0,2, Os (осмий) до 0,16, Rh (родий) до 0,1, Ir (иридий) до 0,095.

По результатам выполненных нами исследований, хромовые руды месторождения «Центральное» массива Рай-Из были условно разделены по содержанию никеля на две группы: с обычным содержанием никеля (0,15–

0,18 %) и с высоким содержанием никеля (0,46–0,60 %). Руда с высоким содержанием никеля по внешним признакам отличается от руды с обычным содержанием: магниевый силикат имеет более темный серо-голубой цвет, что связано с повышенным содержанием никеля. Это дает возможность разделять хромовые руды непосредственно на месте добычи и в дальнейшем перерабатывать по различным технологическим схемам.

Химический состав никельсодержащей хромовой руды массива Рай-Из, а также состав хромшпинелида и вмещающей породы представлены в таблицах 1, 2 и 3.

Таблица 1

Химический состав никельсодержащей хромовой руды массива Рай-Из, мас. %

MgO	Al_2O_3	SiO_2	Cr_2O_3	FeO	NiO	Сумма
31,71	7,27	18,06	33,21	9,28	0,47	100,00

Таблица 2

Химический состав хромшпинелида, мас.%

Cr_2O_3	$FeO_{общ}$	Al_2O_3	MgO	Cr_2O_3/FeO
60,36	14,78	11,06	13,73	4,08

Таблица 3

Химический состав вмещающей породы, мас.%

Cr_2O_3	$FeO_{общ}$	MgO	SiO_2	NiO
0,55	3,09	51,95	43,67	0,73

В ходе исследований установлено, что никель в исходной руде находится в сульфидной форме, и скопления сульфидов располагаются в «пустой» породе руды, рис. 1. Элементное содержание сульфида приведено в таблице 4.

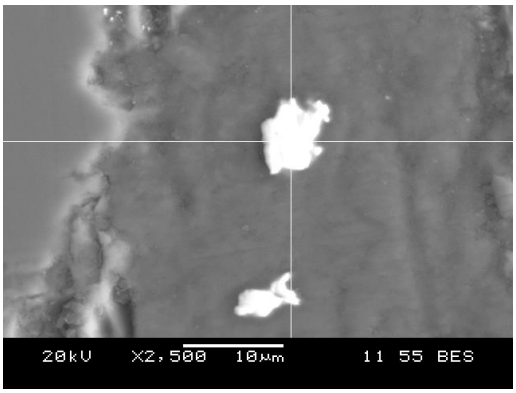


Рис. 1. Сульфид никеля в пустой породе хромовой руды

Таблица 4

Элементное содержание сульфида никеля, мас.%

S	Fe	Ni
24,54	0,72	74,74

Исследование превращений в руде в процессе окислительного обжига проводилось на хромовой руде массива Рай-Из с высоким содержанием никеля. Экспериментально установлено, что в результате окислительного обжига в хромовой руде массива Рай-Из при 1000–1200 °С параллельно протекают различные диффузионные процессы.

Из сравнения распределения элементов в хромовой руде после окислительного обжига с распределением элементов в исходной руде была установлена диффузия катионов (двухвалентного) железа Fe^{+2} из зерна хромшпинелида к межфазной границе «хромшпинелид – магниевый силикат». При этом хром остается в зерне хромшпинелида в исходном количестве.

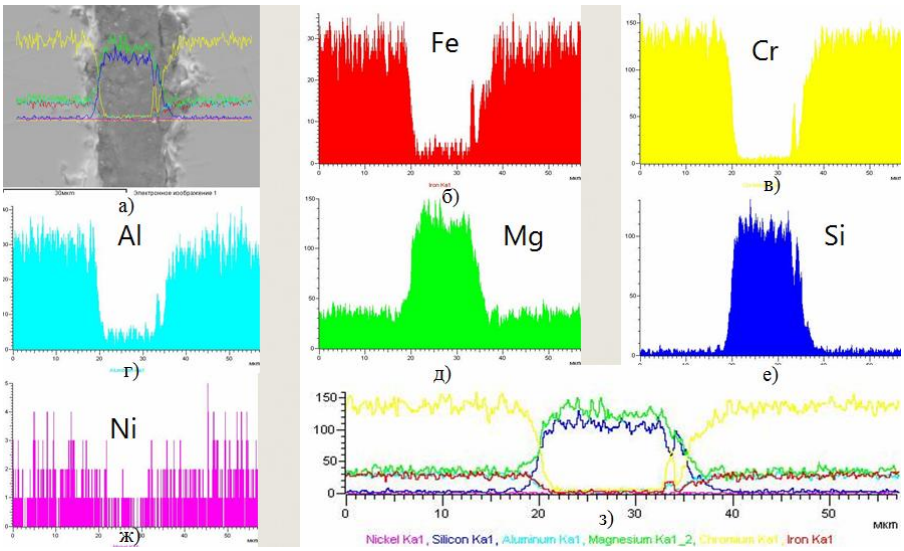


Рис. 2. Результаты линейного сканирования образцов хромовой руды массива Рай-Из с высоким содержанием никеля: а – структура; б, в, г, д, е, ж – распределение железа, хрома, алюминия, магния, кремния, никеля соответственно; з – распределение элементов по линии сканирования. Ордината – содержание элементов в импульсах, абсцисса – размер линии сканирования в мкм

По достижении межфазной границы «хромшпинелид – магниевый силикат» катионы железа Fe^{+2} окисляются до Fe^{+3} и диффундируют в силикаты, образуя при этом оливины, метасиликат магния и магнезиоферрит, что описывается следующими уравнениями:

$$[FeO] + ½\ O_2 = Fe_2O_3; \quad (1)$$

$$2\ MgSiO_{3\ (тв)} + Fe_2O_{3\ (тв)} = 2\ (MgFe)_2SiO_{4\ (тв)}; \quad (2)$$

$$Mg_2SiO_{4\ (тв)} + Fe_2O_{3\ (тв)} = MgFe_2O_{4\ (тв)} + MgSiO_{3\ (тв)}. \quad (3)$$

При окислительном обжиге изменяется состав хромшпинелида. Содержание железа в зерне уменьшается при одновременном увеличении отношения Cr/Fe.

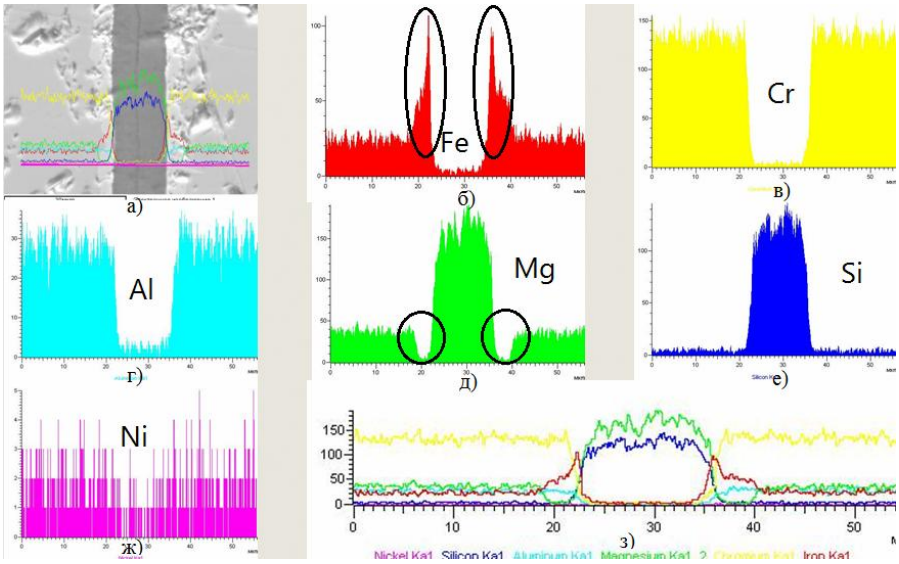


Рис. 3. Результаты линейного сканирования образцов хромовой руды массива Рай-Из с высоким содержанием никеля, после изотермической выдержки при 1000 ˚С в течение 4 часов: а – структура; б, в, г, д, е, ж – распределение железа, хрома, алюминия, магния, кремния, никеля соответственно; з – распределение элементов по линии сканирования. Ордината – содержание элементов в импульсах, абсцисса – размер линии сканирования в мкм.

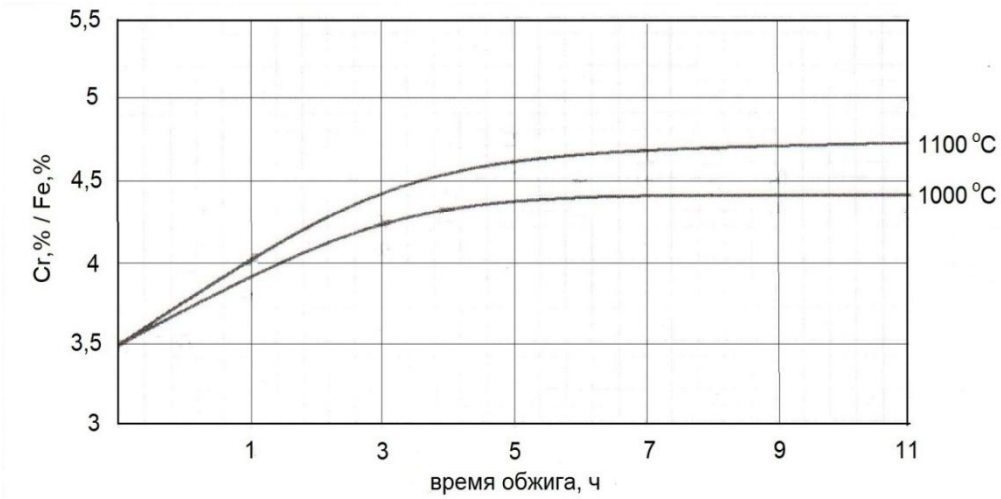


Рис. 4. Изменение отношения Cr/Fe в хромите в результате окислительного обжига от времени изотермической выдержки при 1000 и 1100 ˚С.

Установлен эффект снижения содержания оксида магния в хромшпинелиде за счет диффузии магния в магниевый силикат. На линии сканирования (рис. 2–3) интенсивность магния падает до нуля в пограничной области с магниевым силикатом. Этот процесс не зависит от окислительного по-

тенциала атмосферы обжига и протекает без участия кислорода воздуха, что экспериментально подтверждается значительным увеличением содержания магния во вмещающей породе. При этом MgO взаимодействует с SiO_2, выделившегося при разложении серпентина, с образованием форстерита:

$$2MgO + SiO_2 = Mg_2SiO_4. \quad (4)$$

Образование феррита магния $MgFe_2O_4$ из MgO и Fe_2O_3 также термодинамически возможно:

$$MgO + Fe_2O_3 = MgFe_2O_4. \quad (5)$$

В результате окислительного обжига сульфид никеля переходит в оксидную форму:

$$NiS + 1{,}5O_2 \rightarrow NiO + SO_2. \quad (6)$$

Изменение состава NiS в процессе окислительного обжига представлено в таблице 5.

Таблица 5

Элементное содержание оксида никеля в никельсодержащем включении после окислительного обжига при 1100 ˚С, мас.%

O	Mg	Si	Fe	Ni
20,10	3,60	0,61	1,12	74,57

Образование фаз Fe_3O_4, $FeCr_2O_4$ и $MgFe_2O_4$ в магниевом силикате, увеличивающих магнитную восприимчивость вмещающей породы, позволяет получить концентрат из хромовой руды методом магнитной сепарации после окислительного обжига. Отношение Cr/Fe в концентрате и содержание в нем MgO определяются температурным режимом и продолжительностью обжига (рис. 4). При обжиге хромовой руды происходит удаление воды из кристаллической решетки серпентинита и хлорита до 13 мас.%, что приводит к разрыхлению пустой породы. Включения самородной платины освобождаются и могут быть извлечены при дальнейшей переработке, рис. 5.

Исследования структуры хромовых руд Алапаевского массива (месторождение «Лесное») после окислительного обжига дало новые результаты. Микротвердость исходного хромшпинелида (1420–1480 HV (100 г)) мало изменяется в течение 10 часов обжига, но по достижении 12 часов падает с 1600–1700 HV (100 г) до 1075–1100 HV (100 г). Микротвердость исходной вмещающей породы (32,3–49,9HV (100 г)) повышается до 300HV (100 г)., появляется новая фаза алюмо-магниевый силикат с высоким содержанием железа и твердостью 500 HV (100 г) при 4-х часах обжига и твердостью 755 HV (100 г) при 12 часах обжига. Образование фаз с различной твердостью и учитывая, что минералы, в том числе и хромовые руды, обладают селективным разрушением, появляется возможность обоснованно подойти к выбору дробильного оборудования для выделения железистого алюмомагниевого силиката.

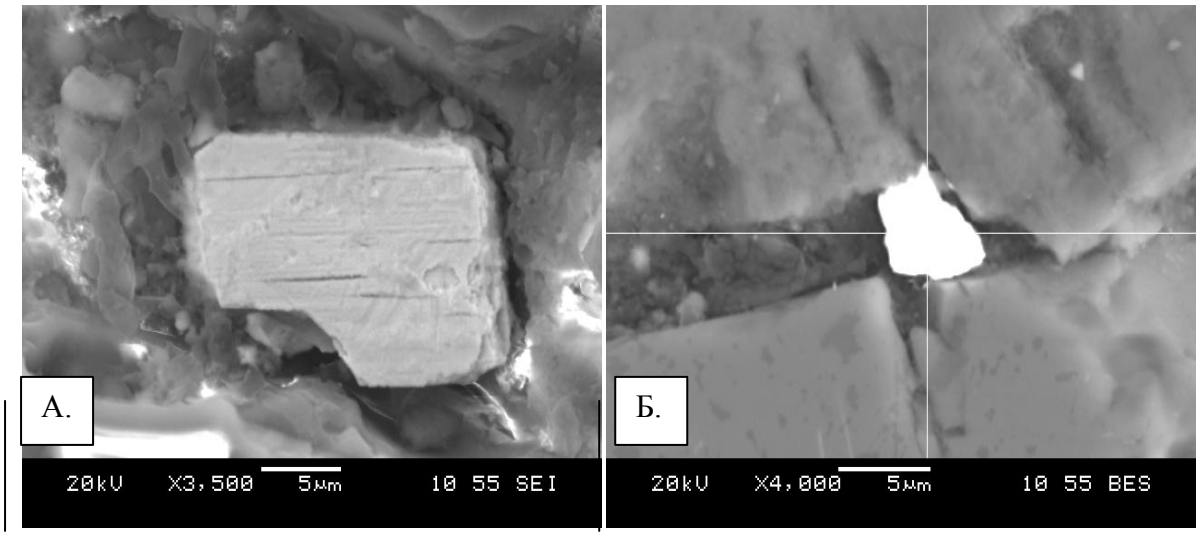


Рис. 5. Включения платины А. Pt– 92 мас.% Б. Pt- 97,46 мас.%

Нами были рассмотрены различные схемы приготовления концентрата по простой, с использованием магнитной сепарации, и комбинированной, с включением дополнительно мокрого обогащения, схемам обогащения. Наиболее эффективной оказалась следующая схема (рис. 6).

Рис. 6. Схема обогащения и извлечения сопутствующих элементов из хромовых руд массива Рай-Из с высоким содержанием никеля

Руда после окислительного обжига (Т = 1100˚С, время выдержки 8 часов) дробилась до фракции – 1,0 мм сначала на щековой дробилке, затем измельчалась на конусной. Далее проводилось выделение магнитной фракции на сепараторах с постоянными магнитами. Немагнитную фракцию подвергали мокрому обогащению. Данные химического анализа и баланса представлены на рис. 7.

Рис. 7. Комбинированная схема обогащения руды массива Рай-Из с высоким содержанием никеля

По результатам комбинированного обогащения руды массива Рай-Из с высоким содержанием никеля следует:

– выход по Cr_2O_3 – 90,83 %;

– выход по NiO – 40,77 %.

В результате выполнения работы:

– установлена диффузия катионов железа и магния в результате окислительного обжига, заметно изменяющая составы хромшпинелида и вмещающей породы;

– при окислительном обжиге установлено образование феррита магния и магнетита в сопряженных слоях магниевого силиката и хромшпинелида, приводящее к повышению магнитной восприимчивости «пустой» породы руды;

– определена форма нахождения Ni в руде и возможность его извлечения в магнитную фазу и шлам, используя комбинированную схему обогащения;

– положительным эффектом предварительного обжига руды является получение концентрата с пониженным содержанием MgO, что приводит в свою очередь к повышению термодинамической активности оксида хрома в расплавах силикотермического процесса выплавки феррохрома и увеличению степени извлечения хрома.

К содержанию

УДК 548.55

ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ФЕРРИТА БАРИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО КОБАЛЬТОМ

Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, Г.Г. Михайлов

В работе изложены результаты экспериментальной работы по выращиванию легированного кобальтом феррита бария из флюса. Представлены результаты исследований состава и структуры полученных образцов с помощью рентгеноструктурного анализа, а также данные измерения магнитных свойств.

Ключевые слова: феррит бария, монокристаллы, легирование.

Ферриты бария применяются во многих областях современной промышленности, включая радио- и микроэлектротехнику, энергетику, машиностроение. Это обусловлено высоким значением температуры Кюри, химической стабильностью и высокой анизотропией магнитных свойств. При этом ферриты бария обладают самопроизвольной намагниченностью, что позволяет их использовать в качестве магнитных материалов в устройствах записи и хранения данных, в катушках индуктивности, а также в качестве композитных материалов.

В данной статье представлены результаты работы по получению феррита бария. В качестве исходных компонентов шихты были использованы оксиды железа и кобальта, а также карбонаты бария и натрия в соотношениях, представленных ниже.

На основе анализа литературных данных был установлен состав раствора, обеспечивающий оптимальные условия кристаллизации феррита бария BaFe12O19 [1]. Молярное соотношение исходных веществ для получения нелегированного феррита бария следующее Fe_2O_3 – 63,17 мол.%, $BaCO_3$ – 10,53 мол.%, Na_2CO_3 – 26,30 мол.%. Состав для получения легированных образцов оксид кобальта добавляли в количестве 1, 2, 4 %. Результаты выращивания легированных, а также чистых монокристаллов гексаферрита бария представлены также в работах [2, 3].

Исходную шихту, общий вес которой составил 20 г, перетирали в агатовой ступе и засыпали в платиновый тигель объёмом 30 мл. Затем тигель устанавливали в резистивную печь. Для измерения температуры использовали термопару ПР-30/6.

Для гомогенизации раствора ростовую систему выдерживали при температуре 1260 °С в течение 3 часов, после чего включали охлаждение со скоростью 4,5 °С/ч до 900 °С. Затем печь охлаждали до комнатной температуры. Полученные кристаллы отделяли от растворителя кипячением в азотной кислоте.

Состав полученных образцов были исследованы на электронном микроскопе Jeol JSM7001F с энергодисперсионным спектрометром Oxford INCA X-max 80 для элементного анализа. В таблице ниже приведена концентрация легирующего элемента (Co) в выращенных монокристаллических образцах.

Рентгенофазовый анализ полученных образцов проводили с помощью порошковогодифрактометраRigakuUltima IV в диапазоне углов от 10^0 до 90^0. Шаг сканирования составил $0{,}02^0$, скорость – 2^0/ч. Для исследования кристаллы были перетёрты до состояния мелкодисперсного порошка, а затем нанесены тонким слоем на подложку из монокристаллического кремния. Было установлено, что все образцы представляли собой гексаферрит бария. Рассчитанные параметры ячеек приведены в таблице. Выявлено влияние ионов кобальта на параметры ячейки гексаферрита бария.

Таблица

Значения параметров ячейки образцов феррита бария

№	Co, масс.%	a, A	c,A	V, A^3
1	0,3	5,904(4)	23,342(12)	704,6(6)
2	2,7	5,883(5)	23,469(22)	703,4(7)
3	4,1	5,859(21)	23,641(11)	702,9(3)

Библиографический список

1. R.J. Gambino, F. Leonhard. Growth of Barium Ferrite Single Crystals. // Journal of the American Ceramic Society. 1961. V. 44. № 5. pp. 221–224

2. D.A. Vinnik, D.A. Zherebtsov, L.S. Mashkovtseva. Growing doped barium ferrite single crystals using the flux method. Dokladyphysicalchemistry. 2013. Vol. 449. p. 1. pp. 39–40.

3. Винник, Д.А. / Д.А. Винник, Л.С. Машковцева, Д.А. Жеребцов, В.В. Дьячук, Г.Г. Михайлов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2011. – № 36(253). – С. 41–44.

К содержанию

УДК 621.74.002.6

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ПОРИСТОСТИ В ХОДЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВКИ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

И.Н. Ердаков, А.В. Герасимчук, К.С. Якшимбетова, Р.Д. Габбасов

В статье с применением конечно-элементного пакета LVMFlow проведен анализ процесса образования пористости при затвердевании отливки сложной формы.

Ключевые слова: отливка, течение расплава, пористость, метод конечных элементов.

Качество отливки во многом определяется характером движения расплава в полости литейной формы [1]. Именно на последней стадии заполнения формы в отливке образуются многие дефекты такие, как засоры, рыхлоты, газоусадочная пористость и др.Перемещение расплава в этой части формыопределяется скоростью вытекания металла из питателей, направлением потока, высотой его падения и конфигурациейполости.

В первоначальный момент заполнения формы струя металла либо будет плавно стекать по стенке, либо отрываться от неё и свободно падать, либо ударяться о противоположную стенку и стекать вниз. При любом из вариантов заполнения формы существует вероятность размыва её поверхности или местного разогрева. В следствие чего отливка может загрязняется неметаллическими включениями или из-за медленного охлаждения в разогретой части формы могут образоваться усадочные рыхлоты.

Наиболее опасным при заполнении формы является образование открытых вихрей, захват окислов воздуха и разбрызгивание расплава. Это в первую очередь касается сплавов склонных к окислению – алюминиевых или магниевых. Интенсивно выделяющийся на оксидных подложках замешанный в расплав водород при кристаллизации приводит к формированию газоусадочной пористости. Сложная конфигурация литейной полости только усугубляет проявление данного дефекта. Чем конфигурация сложней, тем больше внимания следует уделять динамике потока металла в форме при разработке технологического процесса.

Современный уровень развития методов компьютерного моделирования позволяет проводить высокоточный анализ сложных физических процессов, протекающих в литейной форме. Например, течение расплава в форме и его затвердевание можно изучать для отливок с конфигурацией любой сложности. Для этого используют системы компьютерного моделирования CAE (computeraidedengineering), а перед расчётом твердотельная модель отливки с литниковой системой и прибылями строится в системе компьютерного конструирования CAD (computeraidedengineering).

В рамках данной статьи проведем исследование процесса образования пористости в алюминиевой отливке «корпус теплообменника», конфигурация которой считается сложной.

Сначала построим в CAD-системе SolidWorks трехмерную модель литой детали (рис. 1). Затем достроим литниково-питающую систему, включающую два щелевых питателя и четыре прибыли (рис. 2).

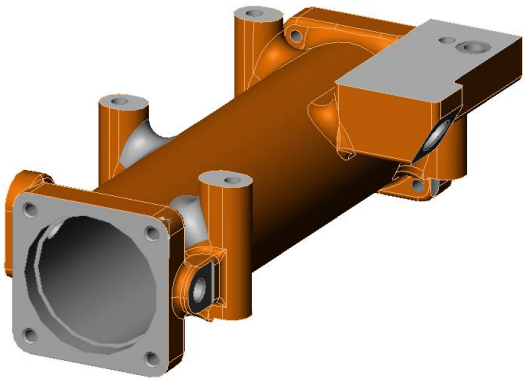


Рис. 1. Трёхмерные модели детали «корпус теплообменника»

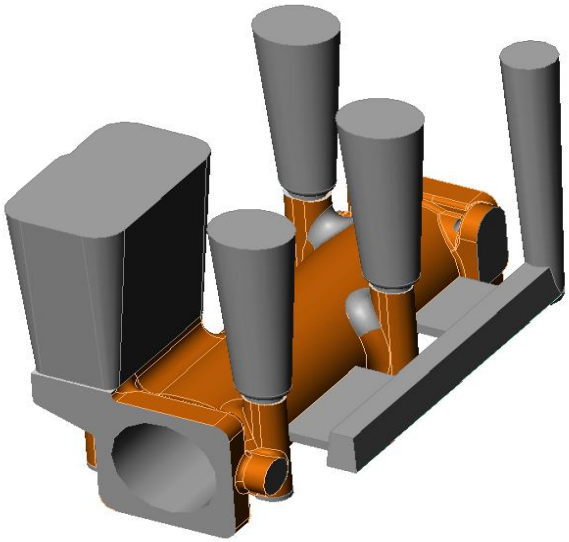


Рис. 2. Трёхмерные модели отливки с литниково-питающей системой

Большая прибыль исключит образование усадочную пористость в массивной части отливки и обеспечит качество плоской поверхности детали после механической обработки [2].

В CAE-системеLVMFlow создадим конечно-разностную модель исследуемой системы (рис. 3), зададим начальные и граничные условия. При этом расчёт будем вести для сплава АК7ч и формы из холодно-твердеющей смеси, температура заливки сплава будет 720 ºС, температура формы – 20 ºС.

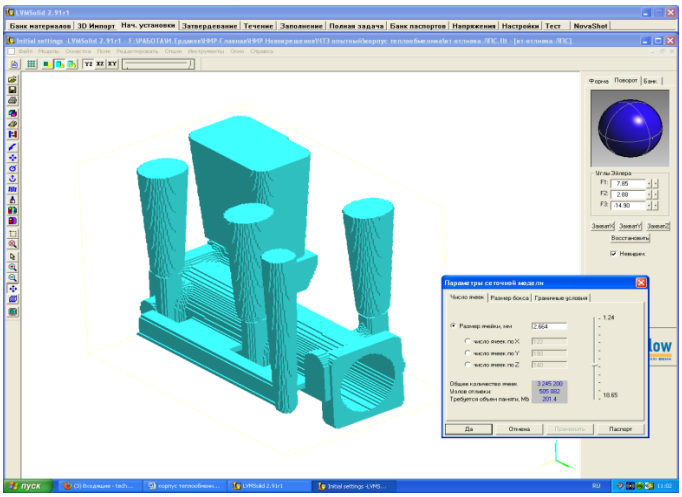
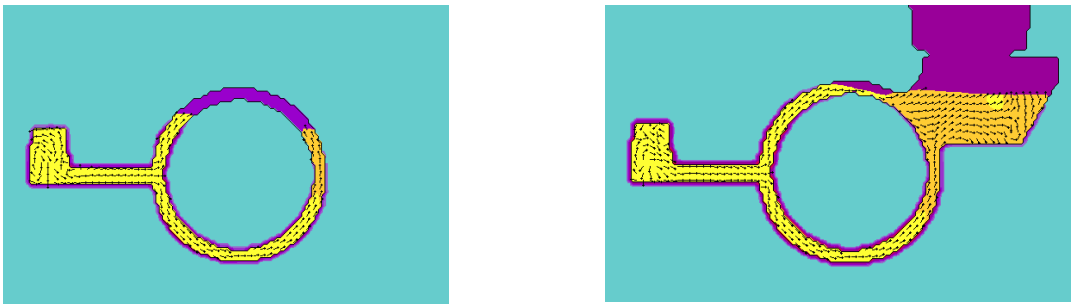


Рис. 3. Конечно-разностная модель в системе LVMFlow

Результаты компьютерное моделирование процесса заполнения формы и остывания расплава для отливки «корпус теплообменника» представим на рис. 4 и 5.



а б

Рис. 4. Захват воздуха расплавом в конце заполнения литейной полости:
а – поперечное сечение формы в средней части отливки;
б – поперечное сечение формы в части отливки в с массивной прибылью

Заполнение формы сложной конфигурации начинается с соударения впускного потока метала о стержень. В этот момент поток силумина становится дисперсным и начинает насыщается окислами. По мере заполнения формы дисперсный поток расплава становится сплошным.

В конце стадии заполнения в верхней цилиндрической части отливки запертый воздух замешивается в расплав (см. рис. 4). В следствие характерного распределения температуры расплава перед началом затвердевания распадающихся комплексов $(Al_2O_3)xH$, $((Al_2O_3)xH_2O)yH$ начинает выделяться водород.

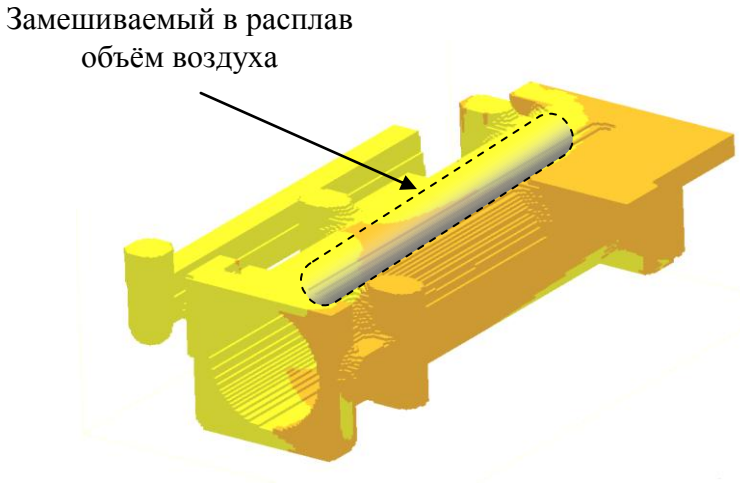


Рис. 5. Распределение температуры расплава перед началом затвердевания отливки (светлая область соответствует температуре заливки сплава)

В подтверждение рассмотренному механизму образования пористость следует привести тот факт, что данный вид дефекта в верхней части отливки проявляется при её изготовлении на опытном производстве челябинского тракторного завода.

Вывод. Совершенствование технологии литья отливки «корпус теплообменника» следует вести в направлении тщательного рафинирования сплава перед заливкой, снижения образования открытых вихрей металла при входе потока расплава в полость формы, и обеспечения удаления воздуха в конце заполнения полости через выпора или воздушный канал литейного стержня. Дополнительно к этим мероприятия в проблемной зоне отливки может быть применено импульсное электромагнитное воздействие на расплав [3].

Библиографический список

1. Гуляев, Б.Б. Теория литейных процессов / Б.Б. Гуляев. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1976. – 216 с.

2. Пименов, Д. Ю. Определение оптимального варианта многопереходной обработки торцовым фрезерованием / Д. Ю. Пименов // Металлообработка. – 2006. – № 5–6. – С. 73–74.

3. Новокрещенов, В.В. Производство высококачественных литых деталей из алюминиевых сплавов / В.В. Новокрещенов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 208–210.

К содержанию

УДК 669-154:537.8 + 669-154:534-8

ИМПУЛЬСНАЯ И УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ОБРАБОТКА РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ

Н.А. Шабурова

Проведен краткий обзор литературных данных по современным способам ультразвуковой обработки расплавов цветных и черных металлов. Определены основные закономерности такого воздействия на структуру и свойства литого металла. Установлена корреляция полученных данных с результатами обработки расплавов мощными электромагнитными импульсами.

Ключевые слова: расплавы, цветные металлы, черные металлы, ультразвуковая обработка, обработка электромагнитными импульсами, структура металла, свойства металла.

В работе [1] описано воздействие ультразвуковых колебаний на зарождение и рост кристаллов алюминиевого сплава марки А356. Использовался УЗ генератор мощностью 1,5 кВт с частотой 20 кГц.

Температуры начала и конца кристаллизации сплава составляют 614 °С и 554 °С, соответственно. Первичные дендриты алюминия образуются при 614 °С, двойная эвтектика при 574 °С, тройная эвтектика и комплекс интерметаллидных фаз формируются на последних стадиях кристаллизации.

Проводили три типа экспериментов, а именно, непрерывная УЗ обработка, прерывистая обработка и изотермическая обработка. При непрерывной обработке ультразвуковую энергию вводили в расплав алюминия в диапазоне температур от 634 до 574 °С (охлаждение в печи). При прерывистой обработке, акустическая энергия вводилась в расплав ступенчато в интервале температур от 614 до 574 °С с шагом в 5 °С (длительность воздействия на каждой ступени варьировалась: 5, 10 и 20 с). При изотермической обработке длительность ее варьировалась от 5, 10 и 20 с.

Без УЗ обработки микроструктура дендритная со средним размером зерна порядка нескольких мм. После УЗ обработки зерна приобретают сферическую форму со средним размером зерна 200 мкм.

В прерывистом режиме, так же как и непрерывной обработке устраняется дендритная структура, и формируются округлые зерна. В то же время, такое воздействие эффективнее измельчает зерно, т.к. в этих условиях охлаждение идет быстрее, чем при непрерывной УЗ обработке. Увеличение длительности УЗ воздействия в изотермических условиях до 10 и 20 с, незначительно улучшило структуру.

Таким образом, наилучшие результаты по измельчению и сфероидизации зеренной структуры были получены при прерывистой изотермической обработке.

В работе [2] исследовалось влияние ультразвуковой обработки расплава на качество поверхности слитков непрерывнолитой заготовки сплава Al-1% Si. Использовался генератор УЗ с максимальной мощностью 1 кВт и частотой 22,3 кГц.

В отсутствии ультразвукового воздействия температура по длине разливочного устройства 100 мм снижается на 11°С. При УЗ же воздействии распределение температуры по сечению более равномерное и максимальный градиент составляет 2 °С.

При ультразвуковой обработке поверхность слитка сгладилась настолько, что отпала необходимость в последующей операции зачистки поверхностного слоя. Шероховатость поверхности верхней части слитка снизилась с 30 мкм до 10 мкм; на дне с 40 до 10 мкм. Исследование микроструктуры полученных слитков показало, что в отсутствии ультразвуковой обработки расплава структура состоит главным образом из крупных зерен (средний размер зерна составляет 94,1 мкм). Ультразвуковая обработка расплава при непрерывном литье (Р= 1000 Вт), приводит к измельчению зерна, а средний размер зерна снижается до 31,2 мкм. Так же, согласно полученным данным после УЗ воздействия повышается растворимость кремния в α-фазе, первичные кристаллы кремния становятся тоньше.

Авторы работы [3] использовали ультразвуковую обработку для изменения литой структуры и улучшения механических свойств сплава AlSi9Cu3. Масса обрабатываемого металла 0,4 кг. Металл нагревался до температуры 700 °С и гомогенизировался в течении 15 минут. Затем расплав переливался в предварительно подогретые стальные изложницы. УЗ обработка проводилась в изотермических условиях при температурах 615, 620, 630 и 640 °С в течение 120 с, при погружении излучателя в расплав на 10 мм. Выбранные температуры обработки обеспечивали перегрев расплава на 3 °С, 8 °С, 18 °С и 28 ºС, соответственно, относительно температуры ликвидус. Частота используемых УЗ колебаний 19,8±0,25 кГц, мощности 200, 400, 600 Вт для каждой температуры обработки.

Микроструктура образца, отлитого без УЗ обработки расплава полностью дендритная, длина отдельных ветвей достигает 700 мкм. УЗ обработка при 640 °С способствовала формированию грубых розеточных зерен алюминия со средним размером около 65 мкм. Для температур 630 °С и 620 °С микроструктура сплава представляет собой смесь небольших розеткоподобных и округлых зерен со средним размером около 55 мкм. Эффект УЗ воздействия при 615 °С намного выше, что проявляется в преобладании в микроструктуре сферических зерен со средним размером зерен около 43 мкм. Кроме изменения размера и формы выделения зерен отмечено изменение размера, толщины и межфазного расстояния эвтектических выделений кремния. Для каждой температуры обработки повышение мощности способствовало измельчению зерна.

Результаты механических испытаний образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики сплава AlSi9Cu3

Режим обработки образца	$\sigma_в$, МПа при мощности			δ, % при мощности		
	200 Вт	400 Вт	600 Вт	200 Вт	400 Вт	600 Вт
Обработка УЗ при 615°С	266	296	332	0,9	1,6	2,9
Без УЗ обработки	220			0,6		

В работе [4] исследовали микроструктуру и механические свойства сплава: Al–17 Si, 2 Fe, 2 Cu, 1 Ni, 0,8 Mn, отлитого литьем под давлением. Применялся генератор УЗ мощностью 1,6 кВт с частотой 20 кГц. В микроструктуре авторы отмечают изменение формы и количества кристаллов первичного кремния и железосодержащих фаз. Результаты механических испытаний литого металла и после термообработки по режиму Т6 показаны в таблице 2.

Таблица 2

Механические свойства образцов

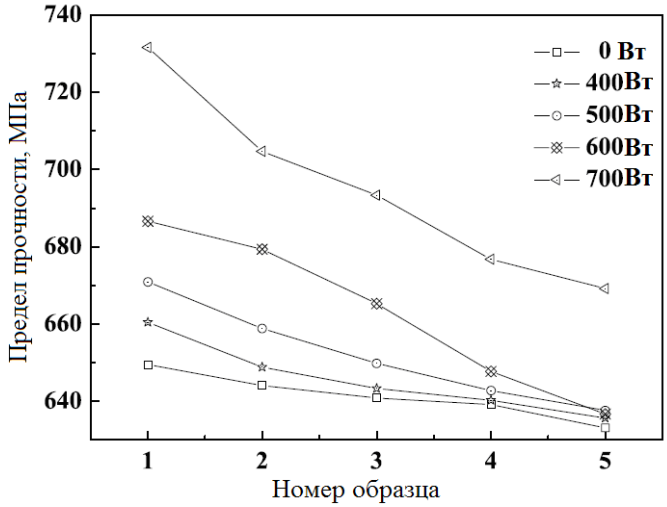
Режим обработки	σв при комн. температуре, МПа		δ, % при комн. температуре (т/о по Т6)	σв при 350 °С (т/о по Т6), МПа	δ, при 350 °С (т/о по Т6), %	НВ (т/о по Т6)
	Литой	т/о по Т6				
Без УЗ	185	229	0,57	112	0,70	Без УЗ
685–665 °С	198	261	0,67	122	0,93	685–665 °С
665–645 °С	234	309	0,80	135	1,20	665–645 °С
645–625 °С	210	282	0,73	130	1,10	645–625 °С

В работе [5] исследовали магниевый сплав AZ91. Температуры ликвидус и солидус сплава – 598 °С и 468 °С, соответственно. Температура для УЗ воздействия была выбрана от 615 °С◦до 580 °С.Максимальная мощность используемого УЗ генератора 1,2 кВт, частота 19 кГц. Излучатель погружался в расплав, перегретый до 720 °С. Затем печь выключалась. При испытаниях образцов на растяжение были обнаружены различия. Для образца, необработанного УЗ в процессе кристаллизации, предел текучести, прочности и относительное удлинение составили соответственно 81 МПа, 288 МПа и 14,9 %. Для обработанного образца те же характеристики – 94 МПа, 376 МПа и 22,0 %.

В работе [6] исследовали воздействие УЗ на коррозионно-стойкую сталь, содержащую: C – 0,06 %; Cr – 17,45 %; Ni – 8,96 %; Ti – 0,41 %, остальное Fe. Мощность УЗ генератора 400, 500, 600 и 700 Вт, частота 20 кГц.

Сталь нагревали до 1650 °С, затем разливали в литейную форму размером 120х60х60 мм и обрабатывали УЗ мощностью 0, 400, 500, 600 и 700 Вт. Затем вырезали по пять образцов вдоль направления распространения УЗ: первый ближе всего к излучателю и, далее, 2-й, 3-й, 4-й, 5-й по удалению от излучателя.

Результаты определения предела прочности образцов показаны на рисунке.



Прочностные свойства стальных образцов,
обработанных по различным режимам

Видно, что при увеличении мощности прочность всех исследуемых образцов возрастает. Более того, при 700 Вт наблюдается крутой подъем и наибольший прирост прочности, по сравнению с использованием других мощностей. Прирост прочности первого образца при повышении мощности составляет 10,8, 21,4, 39,7 и 82,0 МПа, соответственно для 400, 500, 600 и 700 Вт. В то же время вдоль направления действия УЗ интенсивность прироста прочности снижается и для образца 5 составляет 2,5, 4,6, 10,6 и 36 МПа.

В микроструктуре авторы отмечают замену дендритного строения равноосными зернами после УЗ обработки.

Анализ, вошедших в обзор и других многочисленных литературных источников позволил сформулировать основные эффекты, производимые УЗ на структуру и свойства металлов. А так же сравнить их с эффектами, производимыми электромагнитной импульсной обработкой расплавов [7–8] (таблица 3).

Видно, что, несмотря на существенное отличие в характеристиках используемого оборудования изменения структуры и свойств металла после обоих видов обработок схожи.

Таким образом, логичным является предположение о том, что механизм воздействия на металл электромагнитными импульсами аналогичен действию ультразвука.

Таблица 3

УЗ обработка расплавов	Электромагнитная импульсная обработка расплавов
Характеристики генераторов	
Частота 20 кГц Мощность до 1,5–4 кВт Длительность обработки 10 сек – 5 мин	Частота 1000 Гц Мощность до 1МВт Длительность обработки 10–15 мин
Изменения в макро и микроструктуре	
Измельчение макроструктуры. Не влияет на фазовый состав. Микроструктурные составляющие как измельчаются, так и огрубляются (в зависимости от температурного интервала обработки) Повышение растворимости элементов в α-фазе Изменение формы и размеров кристаллов первичных фаз. Уменьшение шероховатости поверхности.	Макрозерно практически не изменяется или укрупняется. Изменение кристаллического строения слитка. Не влияет на фазовый состав. Микроструктурные составляющие как измельчаются, так и огрубляются (в зависимости от длительности и температуры воздействия обработки) Повышение растворимости элементов в α-фазе Уменьшение шероховатости поверхности.
Изменения в механических характеристиках литого металла	
Предварительная УЗ обработка повышает характеристики прочности и пластичности. Эффективность воздействия зависит от температуры обработки.	Предварительная обработка расплава повышает характеристики прочности и пластичности.
Преимущества / недостатки	
Результат обработки сильно зависит от выбора мощности, при удалении от излучателя эффективность воздействия снижается- обработка металла небольшого объема. Сильное охлаждение расплава (10 сек – 30 °С). Сложность промышленного оборудования.	Простота использования генератора. Стабильные результаты для малых и больших объемов металла.

Т.е. при электромагнитной импульсном воздействии в расплаве возникает ударная ультразвуковая волна, порождающая такие процессы как кавитация и акустические течения. Следовательно, для описания происходящих процессов можно применить математическую теорию УЗ воздействия. Чему и будет посвящена дальнейшая работа.

Библиографический список

1. Jian, X., Effect of power ultrasound on solidification of aluminumA356 alloy / X. Jian, H. Xu ,T.T. Meek, Q. Han // MaterialsLetters 59 (2005), pp. 190–193.

2. Xin-tao, Li. Study of ultrasonic melt treatment on the quality of horizontal continuously cast Al–1%Si alloy / Li Xin-tao, Li Ting-ju, Li Xi-meng, Jin Junze // Ultrasonics Sonochemistry. 13 (2006). – Pp. 121–125.

3. Puga, H. Influence of ultrasonic melt treatment on microstructure and mechanical properties of AlSi9Cu3 alloy / H. Puga, S. Costa, J. Barbosa, S. Ribeiro, M. Prokic. // Journal of Materials Processing Technology 211 (2011), pp. 1729– 1735.

4. Chong, Lin. Microstructure and mechanical properties of rheo-diecast hypereutectic Al–Si alloy with 2%Fe assisted with ultrasonic vibration process / Chong Lin, Shusen Wu , Shulin Lü, Ping An, Li Wan // Journal of Alloys and Compounds 568 (2013), pp. 42–48 .

5. Xinbao, Liu. Microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy produced with ultrasonic vibration / Xinbao Liu, Yoshiaki Osawa, Susumu Takamori, ToshijiMukai // Materials Science and Engineering A 487 (2008), pp. 120–123.

6. Qingmei, Liu. Influence of ultrasonic vibration on mechanical properties and microstructure of 1Cr18Ni9Ti stainless steel / Liu Qingmei, Zhang Yong, Song Yaoling, Qi Feipeng, ZhaiQijie // Materials and Design 28 (2007), pp. 1949–1952.

7. Шабурова, Н.А. Обработка металлов и сплавов наносекундными электромагнитными импульсами / Н.А. Шабурова; под ред. В.В. Крымского. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2011. – 94 с.

8. Балакирев, В.Ф. Наноимпульсные технологии / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Н.А. Шабурова. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2012. – 124 с.

К содержанию

УДК 621.774

АНАЛИЗ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РАЗРАБОТОК, НАПРАВЛЕННЫХ НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО ВИНТООБРАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА И ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПРЕССОВАННЫХ ТРУБ

Я.И. Космацкий

В статье представлен анализ теоретических исследований, направленных на определение устойчивого винтообразного течения металла, в частности, при изготовлении горячепрессованных труб с оребрением внутренней поверхности.

Ключевые слова: прессование полых профилей, винтообразное течение металла, трубы с винтообразным оребрением внутренней поверхности.

Для обоснования выбора оптимальной технологии прессования труб с внутренним винтообразным оребрением, энергосиловых параметров, температурно-скоростных режимов деформации, а также расчетов прочности и долговечности прессового инструмента, необходим комплекс математических моделей процесса, обеспечивающий определение усилия прессования и крутящего момента пресс-иглы.

Характер изменения усилия прессования зависит от угла подъема винтовой линии. В результате подпора, образующегося в спирально-расположенных каналах оребрения на пресс-игле, со стороны закручивающейся части заготовки после выхода из обжимной зоны возникает противодавление, которое с увеличением угла подъема винтовой линии оребрения вызывает значительное повышение пластических сдвигов в плоскости, перпендикулярной оси изделия, и соответственно деформирующего усилия [1].

Известна методика оценки технической возможности изготовления изделий прессованием, путем вычисления коэффициента прессуемости [2]. Однако все предложенные коэффициенты прессуемости не могут быть без изменения использованы для случая оребренных изделий, так как не учитывают толщину элементов (ребер, трубы), а также число наружных и внутренних ребер. Сравнительно простая количественная оценка сложности ребристых изделий выполнена по относительным размерам отдельных трудновыполнимых элементов этих изделий [3]. Рассмотрено поперечное сечение ребристой трубы с наружными и внутренними продольными ребрами. В качестве основных параметров, характеризующих геометрию цилиндрической части трубы, выбраны следующие: толщина стенки, средний радиус, количество наружных и внутренних ребер соответственно, толщина ребра.

Как показано в работе [4], форма поперечного сечения прессуемого изделия влияет на усилие и скорость прессования, характеризуемого высокой сложностью изготовления. изделия. Нагрев слитка позволяет снизить величину усилия прессования. Кроме того, известно [5], что при прочих равных условиях быстрее прессуются изделия круглых поперечных сечений, медленнее изделия сложных форм, особенно тонкостенные.

Усилие прессования можно определять по зависимостям представленным в работе [5], однако, требуется определенная корректировка, применительно к прессованию труб с внутренним винтообразным оребрением. Поперечное сечение этих труб – сложная фигура, образованная сопряжением ребер и гладкой части трубы, ввиду чего задача аналитически не решается. Поэтому трубу можно представить, состоящей из отдельных элементов: цилиндра с винтовым расположением волокон металла и внутренних спиральных ребер, для которых, известны аналитические решения. В этом случае усилие необходимое для пластической деформации можно записать как сумму сил, необходимых для образования цилиндра и сил для образования оребрения. В свою очередь, для учета деформации кручения, необходимо вести учет еще одной дополнительной составляющей.

Для оценки усилия прессования необходимо знание сопротивления металла пластической деформации. Существует методика для определения среднего значения сопротивления металла пластической деформации, сущность которой заключается в скручивание двух сплошных образцов разных диаметров, что сводит к минимуму ошибки, связанные с неравномерным распределением скорости и величины деформации в поперечном сечении сплошного образца. Этот метод особенно перспективен для определения сопротивления металла пластической деформации при прессовании винтовых профилей, так как величина деформации в этом случае велика и ее нельзя получить другими способами испытаний [6].

Одними из основных граничных условий математического описания процесса прессования труб с внутренним винтообразным оребрением являются геометрические параметры прессового инструмента, обеспечивающего получение изделий заданной геометрии, а также, надежное отделение отпрессованной трубы от инструмента. При этом, как показано в работе [3], при прессовании изделий с тонкими ребрами, из-за неравномерности скоростей истечения, могут возникать дефекты (гофры, коробление, невыполнение формы и т.д.), что подтверждает необходимость оптимальной конструкции инструмента. Если при прессовании на изделии появляются гофры, коробление, то для их устранения на матрице рекомендуется применять тормозные пояски различной ширины, «питатели» или коническо-ступенчатые пресс-иглы. Например, регулируя положение пресс-иглы относительно матрицы, всегда можно добиться выравнивания скоростей истечения ребер и цилиндрической части трубы [3].

Для прессования изделий с внутренним продольным оребрением используют чаще всего цилиндрические пресс-иглы с пазами. Если пресс-игла неподвижна, то рекомендуется контур оребрения выполнять на калибрующем участке пресс-иглы, заходящем в очко матрицы. Если пресс-игла подвижная, то для получения труб с продольными ребрами применяют пресс-иглы с внутренними пазами, длина которых равна длине хода пресс-иглы. Это может создать определенные трудности как при изготовлении пресс-игл, так и при их эксплуатации. Кроме того, вследствие значительной протяженности зоны трения металла, формирующего ребра, на их поверхности часто наблюдаются гофры, риски и надрывы. Поэтому, подвижные пресс-иглы целесообразно применять при прессовании труб с «низкими» ребрами, неподвижные – для прессования труб с высокими ребрами [3].

Металл, затекающий в пазы на пресс-игле, образует ребра. Высота ребра зависит, прежде всего, от величины радиального контактного давления,чем оно больше, тем выше ребро в данной точке. Кроме того, высота ребра зависит от ширины паза: чем меньше ширина паза, тем большее давление необходимо для формирования ребра. Для цилиндрической неподвижной пресс-иглы высота ребра также зависит от угла подъема винтовой линии паза и шага ребра: с уменьшением шаг, уменьшается высота ребра [3]. Поэтому если требуется оценить новый вариант, например режимы прессования или техническую возможность изготовления ребер заданной геометрии используют пропорцию в которую входит высота ребра, ширина паза, угол подъема винтовой линии и радиальные напряжения. Высота получаемых ребер зависит от конструкции и технологических параметров процесса. Чтобы исключить это влияние, в работе [7] предложено применять питатели для ребер.

В работах [5, 7, 8] для получения труб с внутренними ребрами большой высоты предложена конструкция фасонной пресс-иглы с питателем. Пресс-игла содержит тело, шейку и рабочую часть с рассекателем и реброобразующими каналами. Тело пресс-иглы имеет больший наружный диаметр, чем рабочая часть. Это создает благоприятное течение металла в направлении реброобразующих пазов. В начале прессования металл, обтекая пресс-иглу, накапливается в пространстве, образованном сужением рабочей части пресс-иглы (питателе), заполняет пазы пресс-иглы и дальнейшим движением пресс-штемпеля выдавливается в зазор, образуемый матрицей и пресс-иглой.

Таким образом, при проектировании технологии прессования труб с винтообразным оребрением внутренней поверхности возникает система взаимосвязанных теоретических задач, от правильного решения которых, зависит соответствие профилей, требуемым геометрическим параметрам, механическим свойствам и, как следствие, экономической эффективности их изготовления.

Во-первых, определение угла упругой раскрутки. Упругое раскручивание уменьшает угол подъема винтовой линии ребра после снятия нагрузки по сравнению с ее значением в активной стадии деформации. Для получения профиля и труб с заданной закруткой требуется определение угла упругой раскрутки и его учета в процессе прессования.

Во-вторых, определение оптимальных геометрических параметров профилировки прессового инструмента.

В-третьих, определение энергосиловых параметров, в числе которых, определяющими возможность выполнения профиля являются усилие прессования и момента вращения пресс-иглы.

Библиографический список

1. Северденко, В.Н. Горячее гидродинамическое выдавливание режущего инструмента / В.Н. Северденко, В.С. Мурас, Э. Ш. Суходрев. – Минск: Наука и Техника, 1979. – 256 с.

2. Технология процессов прессования: учебное пособие / сост. Б.В. Баричко, Я.И. Космацкий, К.Ю. Панова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 70 с.

3. Старостин, Ю.С. Прессование ребристых труб / Ю.С. Старостин, В.Р. Каргин // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1982. – № 7. – С. 82–86.

4. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин. – М.: Металлургия, 1964. – 344 с.

5. Старостин, Ю.С. / Ю.С. Старостин, М.Ф. Головинов, В.Р. Каргин, В.К. Ерохов. – «Цветные металлы». – 1979. – №8 – с. 95–96

6. Грищенко, Н.А. Определение сопротивления деформации при прессование испытанием на скручивание / Н.А Грищенко, Д.И. Суян // Цветные металлы. – 1978. – № 1. – С. 66–67.

7. Каргин, В.Р. Проектирование инструмента для прессования труб со спиральным оребрением / В.Р. Каргин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1991. – № 2. – С. 26–28.

8. Шевченко, А.А. Микроструктура и механические свойства профильных горячепрессованных труб с винтовым истечением металла / А.А. Шевченко, К.Н. Черкасов, А.И. Ризоль, Г.М. Фесенко, В.Ф. Рябоконь, Р.Г. Коваль // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. – № 7. – С. 5–7.

К содержанию

УДК 621.762.4

ПРОБЛЕМЫ ДЕГАЗАЦИИ ПОРОШКОВОЙ НАСЫПКИ ПРИ ПРЕССОВАНИИ В ПРЕСС-ФОРМАХ С ЖЕСТКИМИ СТЕНКАМИ

В.А. Иванов, Б.А. Яров, А.В. Лепихов, К.Г. Мовчан

В статье рассмотрены вопросы дегазации порошковой насыпки при прессовании. На примере пресс-формы для прессования цилиндрических образцов проведен анализ газодинамических характеристик. Выявлено, что с повышением скорости движения пуансона, существенно изменяется характер истечения газа из формовочной полости пресс-формы. Представлены результаты экспериментального исследования влияния повышенного давления газовой фазы в формовочной полости пресс-формы на качество образцов, получаемых при прессовании со скоростями 3…6 м/с.

Ключевые слова: порошки, графит, адсорбированные газы, газодинамические характеристики, высокоскоростное прессование, давление газа, расслойные трещины.

Введение

Хорошо известно, что порошковые материалы в исходном состоянии содержат значительное количество адсорбированных газов. Показателем газонасыщенности порошкового материала можно считать относительную насыпную плотность, которая, например, для тонкодисперсных порошков вольфрама составляет величину всего 0,06 (при среднем размере частиц порошка 3 мкм), а для порошка графита – величину 0,3 (при среднем размере частиц порошка 300 мкм). Уменьшение среднего размера частиц приводит к увеличению удельной поверхности порошка и к соответствующему увеличению объёма адсорбированных в насыпке порошка газов. Вместе с тем, одним из перспективных путей улучшения механических свойств и уменьшения пористости материалов на основе графита [1] является увеличение дисперсности исходного порошка. Это требует детального рассмотрения влияния адсорбированных газов на качество прессованных заготовок и готовых изделий.

Неотъемлемой операцией технологического цикла получения изделий из порошков является операция формования [2]. При формовании порошков в закрытых пресс-формах удаление адсорбированных газов возможно только через зазоры между матрицей и пуансонами. При повышении скорости формования в массе порошка формируется характерная картина поперечных расслойных трещин, количество которых обычно не меньше двух [3].

Проблема нарушения сплошности прессованных заготовок известна давно. Особенно отчётливо эта проблема проявляется для порошков из труднодеформируемых металлов, твердых сплавов, оксидной керамики, графита. Для повышения их качества был предложен ряд конструкторских и технологических решений.

Дж. Куллидж [4], известный своими работами по компактированию штабиков из порошков вольфрама и молибдена, рекомендовал величину зазора между матрицей и пуансоном принимать равной 155 мкм.

В работах Баркова Л.А., Мымрина С.А. [5] по компактированию порошков молибдена и вольфрама, возникновение расслойных трещин у штабиков предотвращалось ограничением скорости перемещения пуансона до 2,5 мм/с, а так же применением предварительного бокового обжатия порошковой насыпки в пресс-формах специальной конструкции, на специализированных прессах [6].

При прессовании керамических материалов [7], удаление газов из порошка осуществлялось вакуумммированием формовочной полости пресс-формы перед началом компактирования. Авторы [7] также отмечают, что сведения о влиянии вакуумммирования на качество получаемых полуфабрикатов в различных источниках носят противоречивый характер, что связанно с недостаточной изученностью механизмов дегазации порошков в процессе компактирования, а так же различием в условиях проведения экспериментов. Применение вакуумммирования при формовании коксопековой порошковой композиции [2], позволяет значительно (до 6 раз) снизить упругое увеличение размеров «зеленой заготовки» после снятия формующего усилия.

В патенте Кромского Е.И. [8], предложена конструкция пресс-формы для прессования керамической массы, формующая полость которой имеет продольные щели, ширина которых выбирается равной утроенному среднему диаметру частиц компактируемого порошка. Данная конструкция опробована на практике и позволила повысить плотность полуфабрикатов после компактирования на 5 %, а так же снизить количество брака по расслойным трещинам.

При прессовании с нагревом изделий из дисперсно-наполненных полимерных композиционных материалов на основе термореактивных фенолоформальдегидных связующих рекомендуется выполнять две, три подпрессовки с выводом верхнего пуансона из полости матрицы, для удаления газов, выделяющихся в процессе нагрева и отверждения [9].

Постановка задачи

В рамках данной работы последовательно решалось две задачи. Первая: путем компьютерного моделирования исследовать газодинамические характеристики пресс-формы заданной конструкции. Вторая: экспериментально установить влияние избыточного давления в полости матрицы на плотность и наличие дефектов сплошности образцов после высокоскоростного компактирования порошков на основе графита.

Конструкция пресс-формы показана на рисунке 1. Диаметр формующей полости матрицы $30H7(^{+0,021})$ мм, диаметры верхнего и нижнего пуансо-

на $30f7(^{-0.020}_{-0.041})$ мм, гарантированный зазор между матрицей и пуансонами 20 мкм, максимальный зазор 62 мкм. Ширина направляющей части верхнего пуансона 30 мм, ширина направляющей части нижнего пуансона 6 мм.

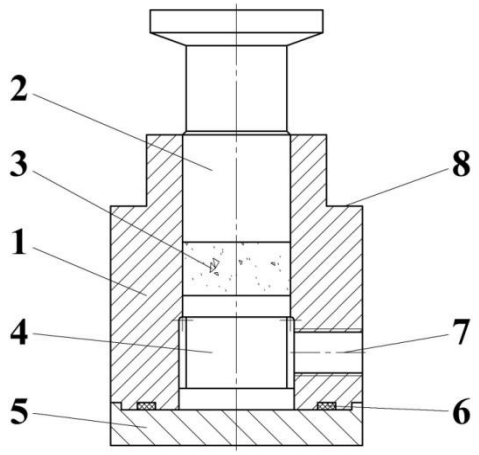


Рис. 1. Пресс-форма: 1 – матрица; 2 – верхний пуансон; 3 – порошок; 4 – нижний пуансон; 5 – крышка; 6 – прокладка; 7 – отверстие для подвода / отвода воздуха; 8 – заплечики для фиксации матрицы на столе копра

Исследование газодинамических характеристик пресс-формы

Исследование газодинамических свойств пресс-формы проводилось методом конечных элементов в пакете ANSYSFluent[1]. Пакет предназначен для решения широкого класса задач гидрогазодинамики.

Задача решалась в двухмерной осесимметричной постановке. В качестве рабочей среды использовался воздух, без порошка. В начальный момент времени воздух в полости матрицы находился при нормальных условиях: температура 300 К, давление 1 атм. Расстояние от между верхним и нижним пуансонами составляло 15 мм. Расчеты проводились для ряда скоростей движения верхнего пуансона: 2,5; 25; 250; 3000 мм/с. Полное перемещение верхнего пуансона составляло 12 мм. Схема расчетной области представлена на рисунке 2. На выходе 1 давление принималось равным атмосферному в течение всего времени расчёта. Выход 2 полагался закрытым.

В качестве контролируемых параметров были выбраны давление P, температура T в контрольных точках, расходы газа S на входе в зазоры между пуансонами и матрицей. Расположение контрольных точек и мест контроля расхода показано на рисунке 3.

Результаты расчетов представлены на рисунках 4 и 5.

[1] Моделирование процесса истечения воздуха из формовочной полости выполнено Лепиховым А.В.

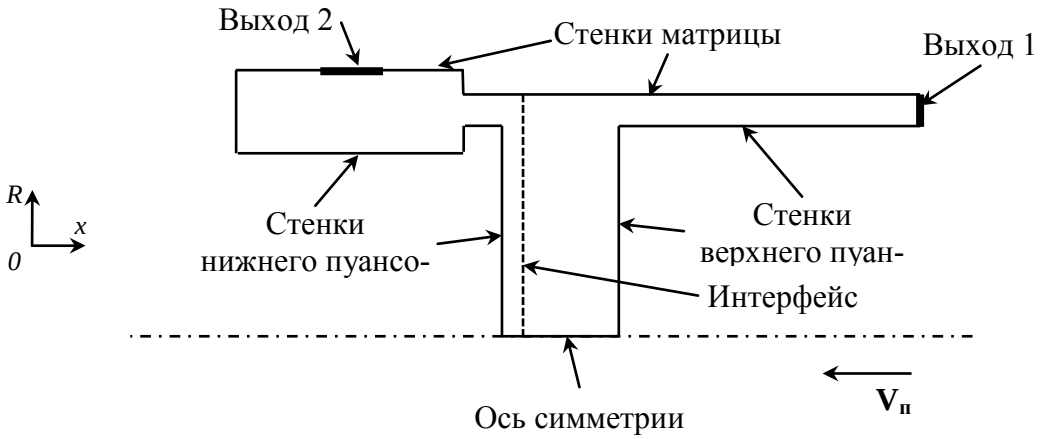


Рис. 2. Схема расчетной области: $V_п$ – направление движения верхнего пуансона

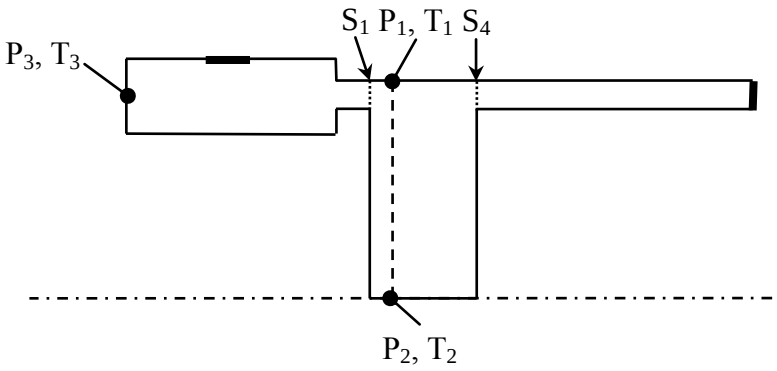


Рис. 3. Схема расположения контрольных точек и сечений

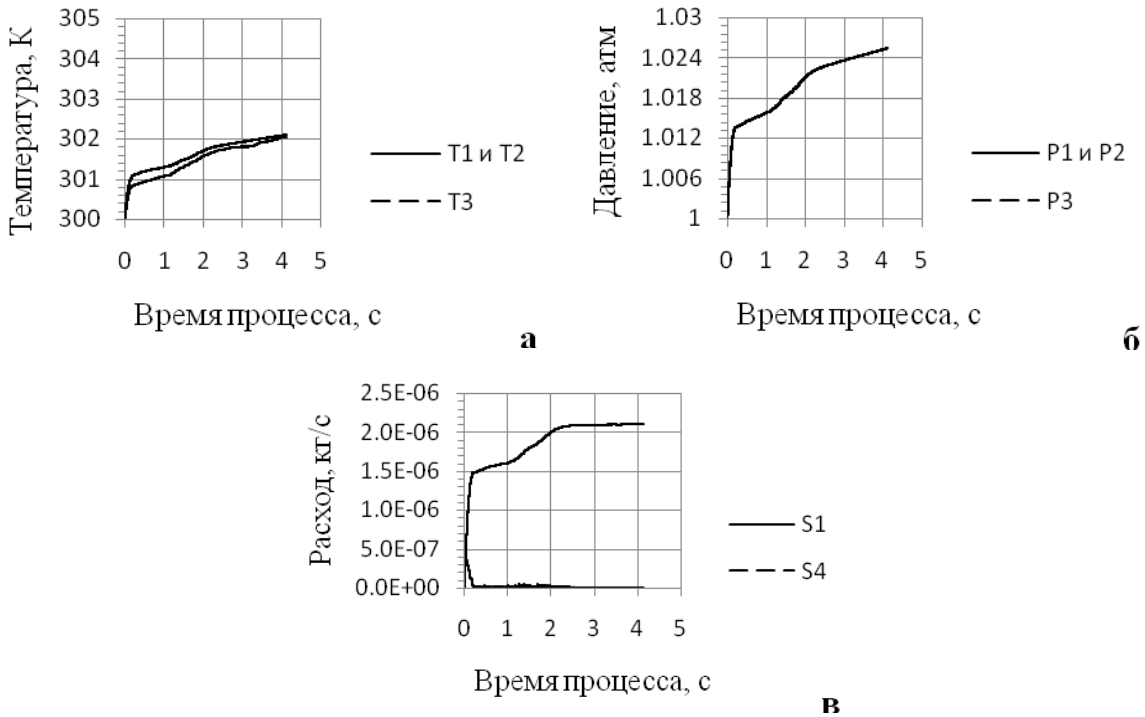


Рис. 4. Параметры в контрольных точках и сечениях при скорости движения верхнего пуансона 2,5 мм/с: а – температура; б – давление; в – расход

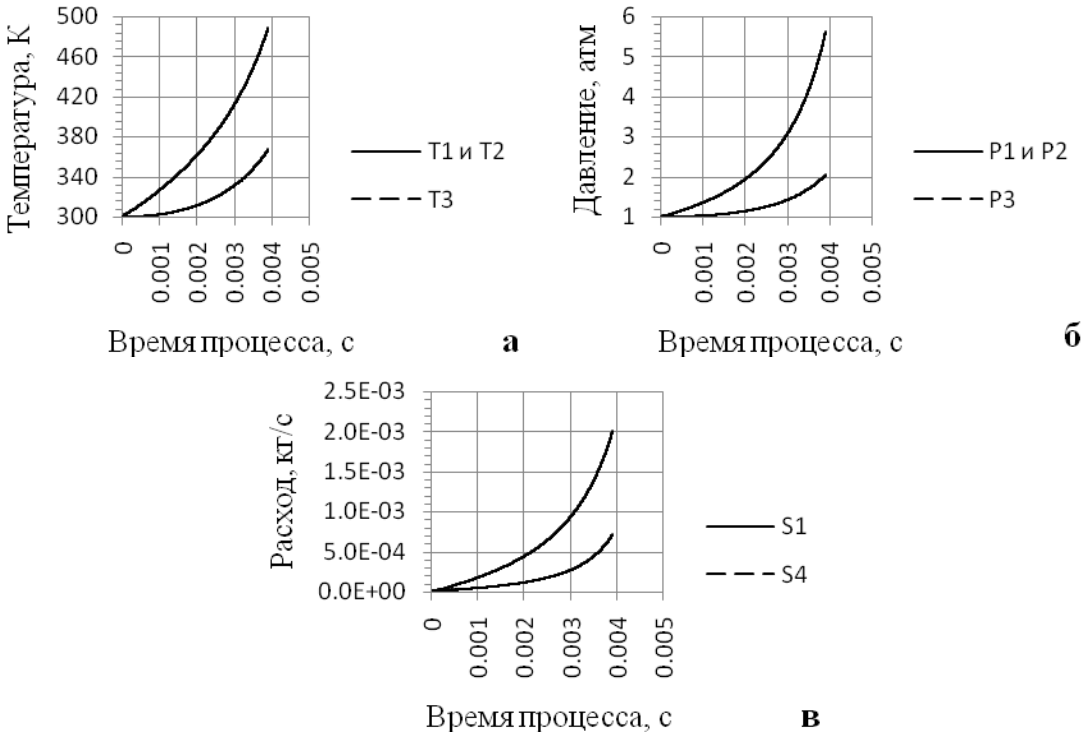


Рис. 5. Параметры в контрольных точках и сечениях при скорости движения верхнего пуансона 3000 мм/с: а – температура; б – давление; в – расход

Исследование влияния избыточного давления воздуха на качество образцов

Экспериментальные исследования влияния избыточного давления воздуха в полости матрицы на плотность и наличие дефектов в компактируемых образцах проводилось на копре конструкции кафедры МиТОМД, с использованием пресс-формы показанной на рисунке 1.

Компактированию подвергалась смесь порошков искусственного графита по ТУ 1916-109-71-2000, который получен из отходов электродного производства ОАО «ЭНЕРГОПРОМ–ЧЭЗ», и фенолформальдегидной смолы новолачного типа марки СФП-011А по ТУ 6-05751768-35-94, в соотношении 86 % графита – 14 % смолы. Гранулометрический состав смеси, определенный методом ситового анализа, представлен на рисунке 6. Масса засыпки порошка составляла 10±0,02 г. Компактирование осуществлялось со скоростями удара 3, 4 и 6 м/с. Масса падающих частей копра 21,12 кг.

Перед проведением опыта к входному отверстию 7 (см. рисунок 1) подключали систему подачи воздуха (рисунок 7). Вакуумирование формовочной полости матрицы, вместо компрессора в магистраль подключался форвакуумный насос с аккумулятором вакуума, вместо манометра М1 устанавливался вакуумметр.

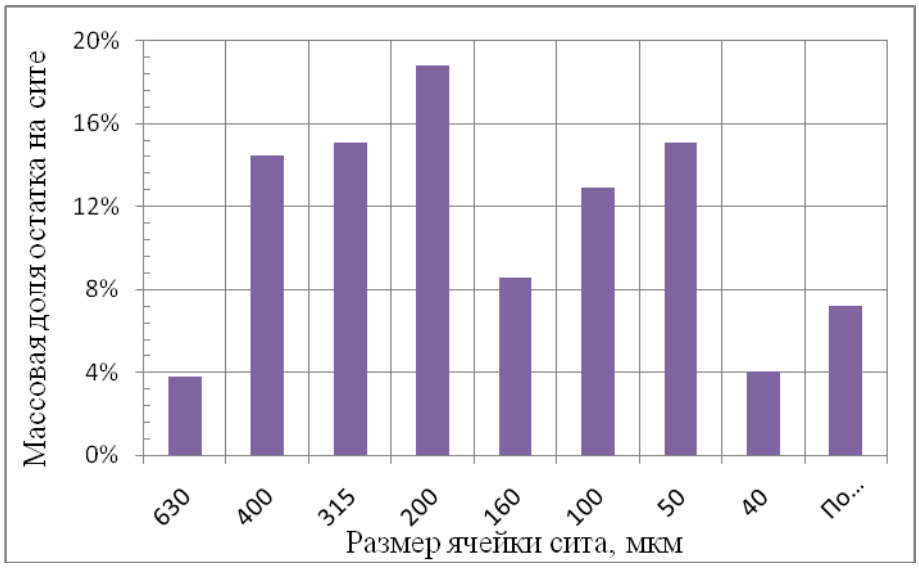


Рис. 6. Гранулометрический состав исследуемой смеси

Избыточное давление в полости матрицы устанавливалось по манометру М1. Изменение давления осуществлялось регулятором расхода Д1, при этом воздух через зазор между нижним пуансоном и матрицей попадал в формовочную полость, а затем через насыпку порошка и зазор между верхним пуансоном и матрицей выходил в атмосферу.

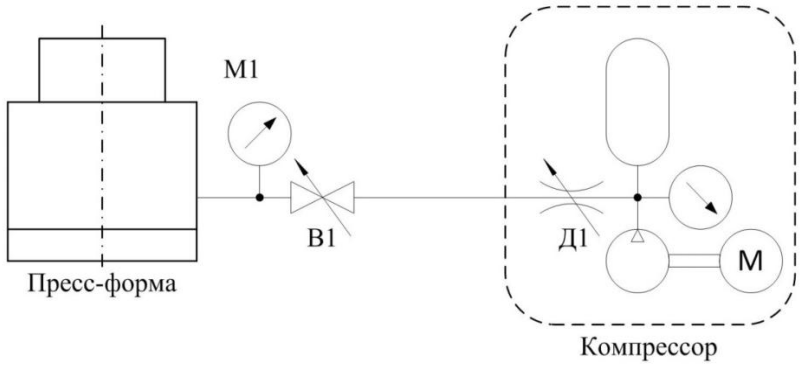


Рис. 7. Схема подачи воздуха в матрицу: М1 – манометр на входе в пресс-форму; В1 – запорный вентиль; Д1 – регулятор расхода воздуха в компрессоре

Результаты опытов приведены в таблице 1.

Типичным дефектом образцов, полученных при повышенном давлении в формовочной полости, являются расслойные трещины расположенные перпендикулярно направлению движения верхнего пуансона (рисунке 8). Для сравнения на рисунке 9 показан образец № 4, подвергнутый компактированию без подачи избыточного давления в формовочную полость.

Таблица 1

Результаты опытов по определению влияния воздуха
на плотность и качество образцов из порошков на основе графита

№	Давление по манометру М1, атм.	Скорость удара, м/с	Масса образца, г	Диаметр образца, мм	Высота образца, мм	Плотность образца, кг/м^3
1	$1 \cdot 10^{-3}$	3	9,96	30,41	9,75	1406
2		4	9,98	30,28	9,29	1493
3		6	10,0	30,17	9,06	1545
4	0	3	9,98	30,35	10,03	1375
5	1	3	9,84	30,51	10,98	1225
6		4	9,98	30,16	10,60	1317
7		6	9,98	30,07	10,18	1379
8	2	3	9,98	30,08	11,25	1248
9		4	9,98	30,03	10,77	1307
10		6	9,98	30,05	10,91	1289

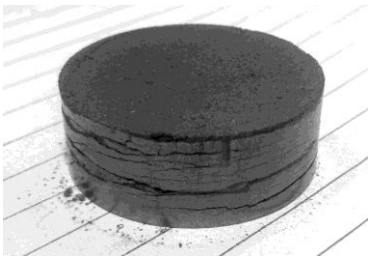


Рис. 8. Образец № 9

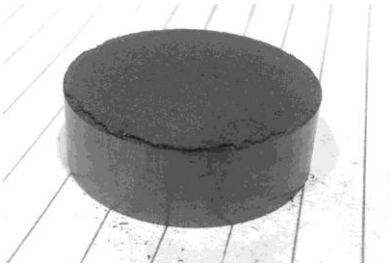


Рис. 9. Образец № 4

Выводы

При исследовании газодинамических характеристик пресс-формы выявлено, что с ростом скорости прессования давление и температура газа в пресс-форме значительно возрастает, величины зазоров между матрицей и пуансонами оказывается не достаточно для эффективного удаления газов из полости матрицы.

При повышении давления газа в матрице над атмосферным наблюдается характерное нарушение сплошности образцов в виде расслойных трещин, уменьшается их относительная плотность.

Т.о. при проектировании пресс-форм для прессования порошков, а особенно для прессования с повышенными скоростями движения пуансона, следует проводить оценку газодинамических характеристик пресс-формы.

Библиографический список

1. Самойлов, В.М. Получение тонкодисперсных углеродных наполнителей и разработка технологии производства тонкозарнистых графитов на их основе: дис. … докт. техн. наук / В.М. Самойлов. – М., 2006. – 357 с.

2. Фиалков, А.С. Процессы и аппараты производства порошковых углеграфитовых материалов / А.С. Фиалков. – М.: Аспект-Пресс, 2008. – 687 с.

3. Чурин, С.А. Образование газовых складок в процессе прессования порошка $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ / С.А.Чурин // Письма в ЖТФ. – 1999. – Т. 25. – № 15. – С. 74–78.

4. Смителлс, К.Дж. Вольфрам / К.Дж. Смителлс. – М.: Металлургиздат, 1958. – 414 с.

5. Оборудование для обработки давлением порошков и порошковых заготовок / под ред. Л.А. Баркова. – Челябинск: Металл, 1992. – 296 с.

6. Барков, Л.А. Теоретические и экспериментальные исследования процесса холодного формования порошков / Л.А. Барков, С.А. Мымрин, В.Э. Кузнецов // Сб. науч. трудов «Машины и технологии обработки материалов давлением». – Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С. 79–92.

7. Попильский, Р.Я. Прессование порошковых керамических масс / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский. – М.: Металлургия, 1983. – 176 с.

8. Пат. РФ2147520, МПК^{5}B30B11/00, B28B3/00,B 22 F 3/02. Устройство для прессования порошкообразных материалов / Кромский Е.И., Агальцов А.И., Никитенков В.В. [и др.]. – № 98113887/02; заявл. 20.07.1998; опубл. 20.04.2000, Бюл. № 11. – 4 с.

9. Крыжановский, В.К. Производство изделий из полимерных материалов / В.К. Крыжановский, М.Л. Кребер, В.В. Бурлов [и др.]. – СПб.: Профессия, 2008. – 460 с.

К содержанию

УДК 628.745 + 614.842.1

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ПОРОШКОВЫХ ВЫСТРЕЛОВ С ПИРОТЕХНИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Ю.П. Болдов, С.В. Фирстова, Н.Л. Кувшинова

Рассматривается история развития отечественных ручных мини-огнетушителей, предназначенных для борьбы с локальными пожарами. Показана работа огнетушителя и схема устройства. Приводятся данные о студенческом конструкторско-исследовательском бюро «Пламя», которое было создано в Челябинском политехническом институте для изучения физических явлений, сопутствующих мгновенному выбросу порошков. Рассказано, кто и когда занимались изготовлением, испытанием и приемкой отечественных порошковых огнетушителей «Малыш».

Ключевые слова: порошковые огнетушители, конструкция, изготовители.

В 1979 году Киевский филиал Всесоюзного Научного Исследовательского Института Противопожарной обороны (ВНИИПО) обратился к руководству Челябинского завода по производству сигнальных средств, с предложением организовать выпуск ручных мини-огнетушителей, используя для этой цели корпус осветительной ракеты, серийно выпускаемой заводом. Предполагалось использовать такой мини-огнетушитель для борьбы с локальными пожарами на предстоящей «Олимпиаде-80» (рис. 1).

Рис. 1. Ручной огнетушитель «МИГ–1»

На рисунке 2 показан момент испытания огнетушителя. Большинство из них отказали в работе по причине уплотнения порошка в корпусе при транспортировке. Именно этот отрицательный результат заставил разработчиков отказаться от серийного и массового изготовления огнетушителей «МИГ-1» и побудил их обратиться к кафедре «Машиностроение» автоматно-механического факультета Челябинского политехнического института (ЧПИ) за помощью. Необходимо было определить причины отказа огнетушителей «МИГ-1» и применять в дальнейшем научный подход к проектированию аналогичных огнетушителей, в которых выброс ОПС осуществлялся из цилиндрических труб продуктами горения пороха.

На рисунке 3 показана принципиальная схема таких огнетушителей.

Рис. 2. Работа ручного огнетушителя с терочным приводом

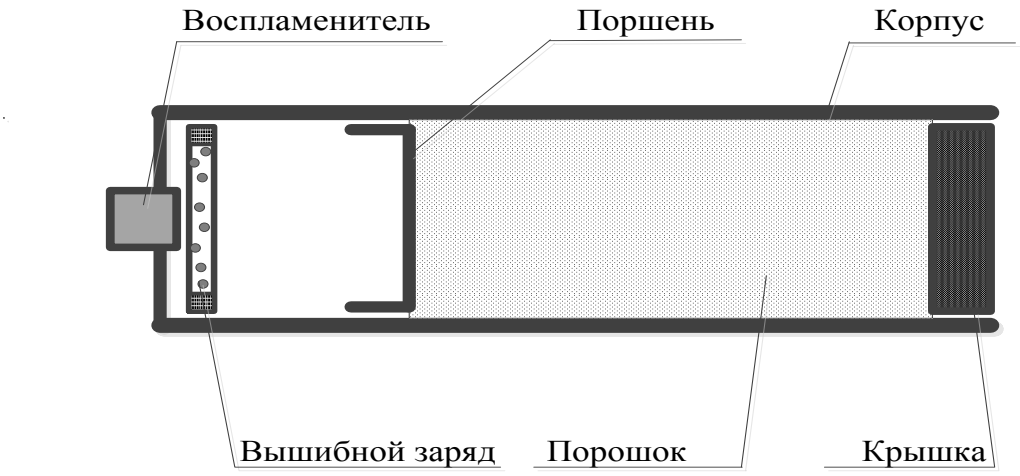
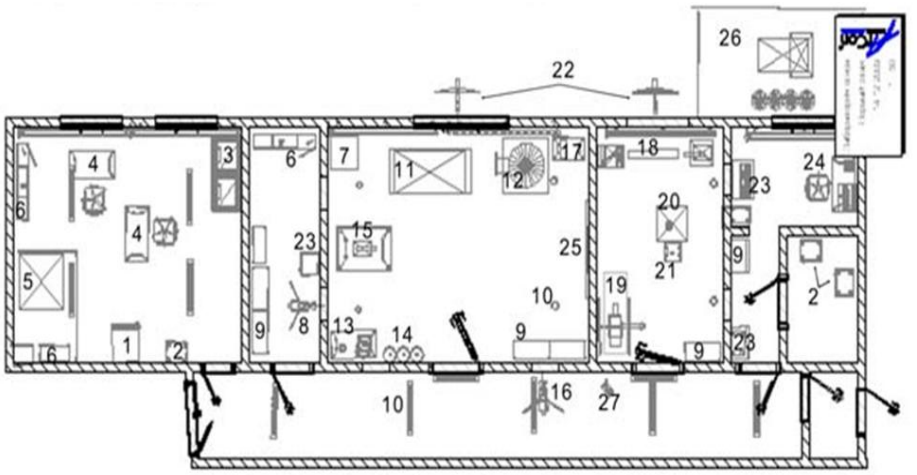


Рис. 3. Схема устройства мини-огнетушителя

При срабатывании воспламенителя происходит зажжение вышибного заряда, который при сгорании создает давление на перегородку (или поршень), выталкивающую порошковый заряд и крышку.

Постановлением правительства СССР Киевский ВНИИПО был назначен головной организацией по созданию экзотических средств порошкового пожаротушения, а ЧПИ, готовящий инженерные кадры для оборонных предприятий по специальности «Газодинамические импульсные устройства» (ныне «Боеприпасы и взрыватели» 170100), был привлечен в качестве соисполнителя к созданию этих средств пожаротушения. С 1981 по 1985 годы работы проводились по Постановлению Президиума ВЦСПС, ГКНТ и Госплана СССР от 22 декабря 1980 года № 14/529/269, задание 12-ОИ «Разработать и внедрить новые эффективные методы и средства, обеспечивающие пожаровзрывобезопасность объектов народного хозяйства и спасения людей на пожарах» программы работ по решению научно-технической проблемы 0.74.08. Кафедра «Машиностроение» усиленно начала заниматься порошковыми выстрелами, а ВНИИПО выделяло средства кафедре на научные исследования по созданию ручных мини-огнетушителей импульсного действия, в которых порошок выбрасывался на очаг из стальных и алюминиевых направляющих.Работы по созданию огнетушителей проводились в специализированной лаборатории кафедры.

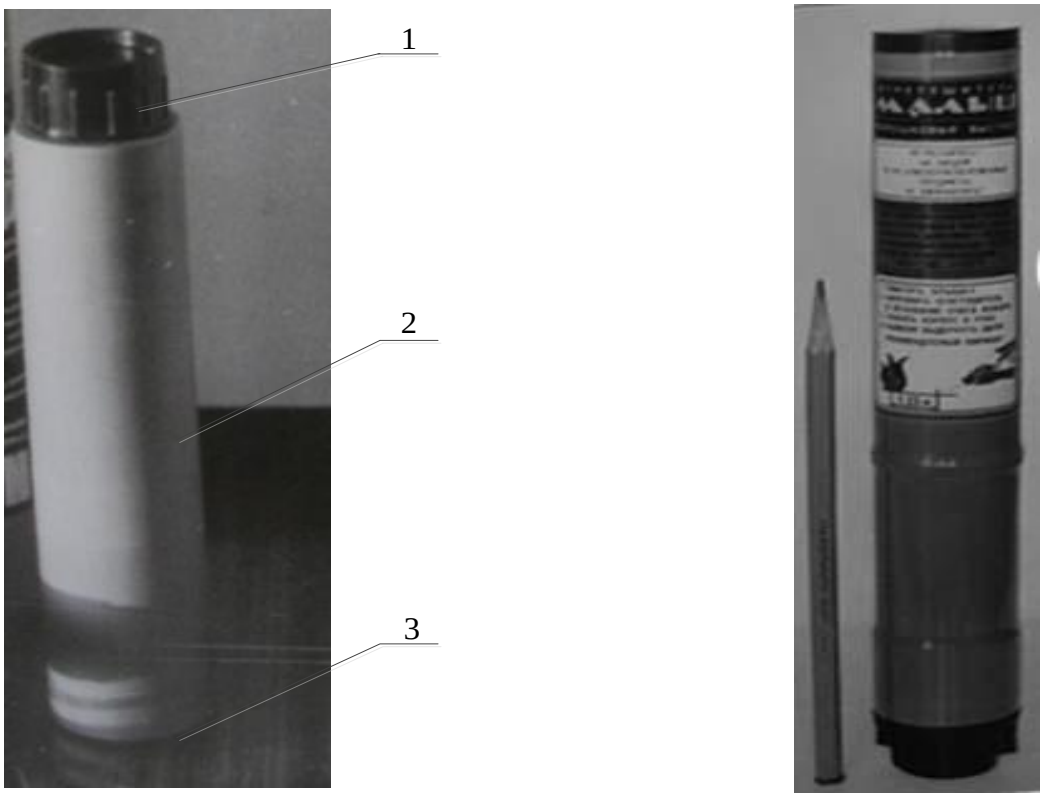


1. Холодильник
2. Сейф
3. Вытяжной шкаф
4. Стол для снаряжания
5. Силовая
6. Навесной шкаф
7. Вибростенд
8. Видеокамера
9. Стеллажи
10. Потолочный светильник
11. Камера сгорания
12. Камера для подрыва
13. Вибратор
14. Емкости с ОПС
15. РДТТ
16. Скоростная кинокамера
17. Манометрическая бомба
18. Ствол, трасса, ловитель
19. Баллистический маятник
20. РДТТ
21. РДТТ (микродвигатель)
22. Вентилятор
23. Регистрирующая аппаратура
24. Компьютер
25. Экран
26. Компрессорная
27. Прожектор

Рис. 4. План лаборатории огневых испытаний выстрелов и реактивной техники

Сотрудникам кафедры пришлось изучать новые физические явления, сопутствующие мгновенному выбросу порошков из длинных труб [1, 2]. Для этих целей было созданы ТОО «Пламя», а при ЧПИ студенческое конструкторско-исследовательское бюро «Пламя». Были изучены: звуковой эффект при выбросе порошка, прессование порошка газом, фильтрация порошков, тушение ударной волной, распыл порошка, воздействие порошка и ударной волны на горящий объект, тепло-массообменные процессы между газом и порошком, сила отдачи на руку, концентрация газа в порошке, состав газов, полнота сгорания навесок ДРП, работоспособность, дальнобойность, надежность работы огнетушителя.

В 1981 году Центральный научно-исследовательский институт технологии судостроения города Николаева сделал заказ кафедре «Машиностроение» на создание ручного порошкового мини-огнетушителя с пиротехническим приводом и металлическим корпусом. Эти огнетушители предназначались для тушения локальных очагов пожаров, возникающих при строительстве или утилизации судов. Совместная работа ЧПИ и ЦНТИИС закончилась в 1985г. получением обеими организациями патента на создание безопасного в обращения ручного порошкового мини-огнетушителя с пиротехническим приводом (огнетушителя «Гном», рис. 5а).



а) б)

Рис. 5. Ручные мини-огнетушители
1 – съемная крышка пластиковая; 2– корпус; 3 – съемная крышка металлическая;
а – огнетушитель « Гном»; б – огнетушитель «Малыш»

После распада СССР огнетушитель «Гном» продолжал выпускаться и продаваться на Украине, а Россия осталась без малогабаритного огнетушителя. Исправить эту историческую несправедливость взялось Управление Государственной противопожарной службы Челябинской области, которое помогло организовать изготовление, испытание и приемку отечественных порошковых выстрелов. Проектирование и испытание ручного огнетушителя «Малыш» (рис. 5б) было поручено к.т.н. Болдову Ю.П. и группе инженеров, работающих на кафедре «Машиностроение» ЧПИ.

Изготовление деталей огнетушителя и окраска корпуса осуществлялась на Машиностроительном заводе в городе Касли, а его сборка, снаряжение и испытания на производственном объединении «Сигнал» в городе Челябинске. Предполагалось использовать «Малыш» в комнатах гостиниц, административных зданиях, коттеджах, в автомобилях и непосредственно на рабочих местах, связанных с огнеопасной работой.

Заготовкой для корпусов огнетушителей «МИГ-1» служил корпус осветительной ракеты РБ-40, серийно выпускаемой заводом. Корпус представлял собой катанную из патронной бумаги картонную трубу от сигнального патрона, вставленную на эпоксидном клее в металлический цельнотянутый цоколь из листовой стали (рис. 6).

Рис. 6. Корпус огнетушителя «Миг-1»

Время показало, что малогабаритные ручные переносные огнетушители оказались особенно востребованными в учреждениях с большой площадью охраняемой территории (в школах, институтах, училищах, магазинах, гостиницах). Совершая обход помещений, дежурный должен брать огнетушитель с собой. Обнаружив возгорание, он сможет немедленно приступить к его ликвидации.

В настоящее время число многоэтажных офисных зданий растет, также возрастает количество пожаров, возникающих в них от локальных очагов, поэтому тема создания и модернизации малогабаритных ручных переносных огнетушителей остается актуальной и востребованной.

Также мини-огнетушители предназначены для оснащения рабочих, ведущих огнеопасные работы с использованием ЛВЖ (легковоспламеняющейся жидкости) и ГЖ (горючей жидкости), сотрудников патрульно-постовой службы полиции и МЧС, работников вневедомственной охраны.

Библиографический список

1. Васильев, П.П. Разработка и испытание газогенераторов для техники порошкового пожаротушения: науч.-техн. отчет по теме «Пирант» / П.П. Васильев, Ю.П. Болдов. – Челябинск: ЧПИ, 1982.

2. Болдов, Ю.П. Проведение исследований по созданию экспериментального образца мини-огнетушителя с пороховым приводом на порошке ПСБ-3 массой не более 0,15 кг для тушения локальных очагов пожара / Ю.П. Болдов. – Челябинск: ЧПИ, 1989.

К содержанию

УДК 621.791.75.037

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ НАПЛАВКИ ТОЛКАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

А.М. Осипов, Н.Л. Зайцев, Ю.В. Безганс

По результатам проведенных исследований влияния ультразвуковых колебаний на качество наплавленного чугуна установлено, что при воздействии колебаний в период кристаллизации в зоне сплавления устраняется дендритное строение. При наплавке без воздействия ультразвуковых колебаний видно дендритное строение кристаллов избыточного аустенита. Проведенные опыты с подогревом индукторами показали, что верхний подогрев обеспечивает перегрев и кипение наплавленного металла, что приводит к уменьшению брака по пористости.

Ключевые слова: ультразвуковые колебания; толкатель; наплавка; чугун; индуктор; нагрев; пористость.

Одним из методов повышения долговечности деталей, работающих на износ трением в сопряженных местах, является наплавка их рабочей поверхности износостойкими материалами. В качестве таких материалов наиболее распространенным является отбеленный чугун, обладающий хорошими литейными свойствами, высокой износостойкостью и др. Недостатками белого чугуна являются низкая пластичность, высокая хрупкость.

При наплавке наблюдаются дефекты литой структуры, пористость, дендритное строение, неоднородность. В связи с этим улучшение свойств наплавленного чугуна представляет важную практическую задачу. Для улучшения структуры и механических свойств металла возможно применение активных методов воздействия на процесс кристаллизации. Положительный результат возможно получить при использовании энергии высокочастотных механических колебаний (колебаний ультразвуковой частоты).

Под действием ультразвука из расплава выделяются растворенные в нем газы и неметаллические включения, равномерно распределяются легирующие элементы. В процессе кристаллизации под воздействием ультразвука происходит измельчение микро- и макроструктуры. Существенно улучшаются механические свойства.

В данной работе приведен анализ возможности применения высокочастотных механических колебаний при индукционной наплавке чугуна на рабочую поверхность толкателя. Основной целью данного процесса является достижение снижения брака по пористости наплавляемой поверхности.

С понижением растворимости газ выделяется из раствора в виде газовых пузырей, которые в зависимости от их диаметра и вязкости чугуна могут всплыть на поверхность, либо остаться в металле в виде газовых раковин, газовой пористости или неметаллических включений. Сплав, наплавляемый на толкатель, представляет собой доэвтектический белый чугун, который кристаллизуется с образованием дектритов аустенита и затем ледебурита.

Для доэвтектических чугунов, имеющих значительный интервал затвердевания, характерно объемное затвердевание. Отливки такого чугуна имеют по всему объему усадочную пористость, так как жидкость оказывается замкнутой между кристаллами. Усадочная пористость уменьшается в случае выделения графика, поэтому можно сказать, что белый чугун склонен к образованию усадочных раковин.

Исследование качества наплавленного чугуна показали, что процесс наплавки является многофакторным, и улучшение качества наплавленного металла возможно в результате комплексного исследования всех учтенных факторов.

Одним из эффективных способов воздействия на расправленный металл является ультразвуковая обработка. Под действием ультразвука из расплава выделяются растворенные в нем газы и неметаллические включения. В процессе затвердевания под действием ультразвука происходит измельчение микро- и макроструктуры и структурных составляющих сплава. Существенно улучшается способность металла к пластической деформации [1, 2]. В опытах по изучению влияния ультразвука на кристаллизацию серого чугуна [3, 4] была получена значительная дегазация, полное устранение газовых раковин.

Наплавки чугуна с ультразвуковыми колебаниями производили на экспериментальной установке в лабораторных условиях. Температурные режим при наплавке подбирался приближенно к существующей технологии и обеспечивал существование жидкого металла в течением от 3 до 15 секунд. Ультразвуковые колебания вводились в расплав в период кристаллизации. Изменялось время озвучивания и амплитуда колебаний.

Исследование макроструктуры наплавленного металла производилось визуально (макропористость) и под микроскопом (микропористость). Подсчитывалось количество пор на одном толкателе (количество толкателей с порами составляло процент брака), по этим данным строились гистограммы распределения пор, а также площадь, занятая порами. Наплавка толкателей с ультразвуковыми колебаниями производилась в несколько этапов по сериям в зависимости от задач исследований.

Исследование микроструктуры чугуна в эоне сплавления [5] показало, что при воздействии колебаний в период кристаллизации в зоне сплавления устраняется дендритное строение. При наплавке в обычных условиях видно дендритное строение кристаллов избыточного аустенита, направленных перпендикулярно наплавляемой поверхности. Подобное строение имеет металл и во всем наплавленном слое.

При электродинамическом методе возбуждение колебаний расплава на высокочастотное поле индуктора накладывается постоянное магнитное поле. Возникающие при воздействии полей электродинамические силы вызывают развитие упругих колебаний без увеличения перемешивания.

При использовании магнитного поля, накладываемого на жидкий металл, по схеме электромагнит подключался через дроссель и трансформатор к сети переменного ока. Наплавка образцов с магнитным полем проводилась по трем режимам:

1 – контрольный (без поля);

2 – положение поля в период жидкого состояния I=200 А;

3 – то же, что и 2, толькоI=300 А.

В результате замера микропористости подсчитано, что среднее количество пор на один образец $n_{ср}$ =0,63 %, а без поля $n_{ср}$ =2,8 %, что почти в 4 раза больше. Таким образом, при наложении поля был уменьшена пористость наплавленного слоя.

Для создания электродинамического возбуждения колебаний в жидком металле, а также дополнительного подогрева с целью получения направленной кристаллизации при наплавке толкателей использовался дополнительный индуктор.

Расплавленный чугун выливается на поверхность толкателя, и некоторое время идет процесс кипения, при этом идет более интенсивное, в зависимости от режима генератора и продолжительности цикла, перемещение позиций. Максимальное время цикла 12 секунд. От условий режима кипения и кристаллизации зависит, как пойдет процесс газовыделения и образования усадочной пористости. Исследования микроструктуры наплавленного слоя показали, что кристаллизация металла идет снизу от зоны сплавления, о чем свидетельствует расположение дендритов первичного аустенита. Небольшой слой дендритов, расположенных перпендикулярно поверхности, говорит о кристаллизации металла сверху, в результате такого

направления кристаллизации усадочные поры и невыделившиеся газы оказываются под закристаллизовавшейся коркой металла. При данном способе наплавки кристаллизация металла идет только в одном направлении – снизу, газовые и усадочные поры оказываются закрытыми, а особенности охлаждения способствуют образованию скопления пор по краям наплавленного слоя.

Проведенные опыты с подогревом индукторами показали, что важнейшим условием эффективности применения верхнего подогрева является достаточный перегрев, а следовательно, и кипение наплавленного металла. Это обеспечивает при существующем цикле наплавки направленную кристаллизацию, что и приводит к уменьшению брака по пористости.

Применение верхнего подогрева вызывает смещение пор на поверхность, в то время как при обычной наплавке они сосредоточиваются под слоем закристаллизовавшегося металла. При последующей механической обработке поры, залегающие у краев под слоем металла, не всегда удаляются, а возможность удаления поверхностных пор наиболее вероятна.

После окончательной обработки наплавленных толкателей брак составил 0,17–0,2 %.

Библиографический список

1. Серковский, В.А. // Литейное производство. – 1960. – № 5. – С. 25–27.

2. Половинкин, П.И. Рациональные технические процессы литья: сборник трудов МВТУ / П.И. Половинкин. – М.: Машгиз, 1958.

3. Николайчик, И.П. // Сталь. – 1959. – № 4. – С. 15–18.

4. Николайчик, И.П. // Литейное производство. – 1958. – № 2. – С. 14–16.

5. Погодин-Алексеев, Г.И. Ультразвук и низкочастотная вибрация в производстве сплавов: материалы семинара по применению ультразвука в машиностроении / Г.И. Погодин-Алексеев. – М.: НТО «Машпром», 1963.

К содержанию

УДК 621.791.753.5 + 621.791.05

РАСЧЕТ РЕЖИМОВ СВАРКИ ДЛЯ СТАНДАРТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ФЛЮСОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПО «МАТКАД»

В.С. Рыбин, Ю.В. Безганс

Разработана модель сварки под флюсом на базе ПО «Маткад», позволяющая выполнять расчет режимов по ранее опубликованным методикам, предназначенным для графоаналитического расчета. Для оценки влияние геометрии шва на режимы сварки в оперативном порядке определены зависимости площади наплавки от типа сварного соединения и толщины изделия для стыковых сварных соединений по ГОСТ 8713. Используемая расчетная схема предусматривает возможность ее распространения на иные методы сварки оплавлением путем дополнения соответствующими расчетными схемами, в частности, при моделировании и расчете режимов по заданным геометрическим параметрам швов для сварки в среде защитных газов, для сварки открытой дугой, для процессов одно- и двухдуговой сварки стыковых и тавровых соединений, для нагрева и охлаждения изделия и т.п.

Ключевые слова: сварка под флюсом, площадь наплавки, тип сварного соединения, толщина изделия, модель расчета режимов для ПК, Маткад.

В связи с широким применением вычислительной техники при разработке и управлении технологическими процессами, а также при выполнении научно-исследовательских работ появилась настоятельная необходимость в разработке математических моделей технологии сварки, методик расчета параметров режима, количественной оценке термических деформаций и пр.

В настоящее время известны методики расчетов режимов сварки плавлением [1, 2, 3, 4], однако они в основном построены на эмпирических формулах и диаграммах, что затрудняет разработку универсальной схемы расчета, позволяющей использовать современные компьютеры для оптимизации режимов сварки в условиях многообразия требований, предъявляемых к сварным соединениям. Помимо указанных недостатков существующими методиками предусмотрена необходимость сравнения получаемых промежуточных результатов с допускаемыми граничными значениями и принятия корректирующих решений.

Коммерческие программы вследствие скрытого алгоритма вычислений имеют ограниченные рамки применения и используются, главным образом, сотрудниками проектных организаций для укрупненной оценки энергетических и материальных затрат. Скрытый и однозначно заданный алгоритм не позволяет использовать коммерческие программы для моделирования сварочных процессов и оптимизации режимов сварки.

Широко распространенный вариант графоаналитического расчета режимов сварки предусматривает следующие шаги:

– оценочное определение площади наплавки в зависимости от толщины изделия и выбранного типа сварного соединения;

– определение скорости сварки из уравнения материального баланса между расплавленным и наплавленным металлом;

– определение погонной энергии, затраченной на выполнение сварного шва;

– определение глубины провара, ширины шва и высоты валика.

Однако после определения расчетных значений ширины шва и высоты валика выясняется, что они отличаются от ранее принятых значений, и потому площадь наплавленного металла не соответствует значению, принятому при вычислении скорости сварки, что ведет к нарушению материального баланса и, соответственно, конфликту промежуточных результатов вычислений. Расхождение обычно превышает допустимые 5…7 %, при этом повторные вычисления формального характера не всегда приводят к уменьшению расхождения и, как правило, требуют принятия логических решений.

Целью работы является на основании опубликованных ранее результатах исследований и методик разработать универсальную расчетную модель режимов сварки применительно к сварке под флюсом, исключающую возникновение конфликта промежуточных результатов. Универсальность расчетной модели предусматривает возможность ее распространения на иные методы сварки оплавлением путем дополнения соответствующими расчетными схемами.

Геометрические характеристики сварного шва в полной мере оцениваются глубиной провара, шириной шва и высотой валика. Перечисленные показатели позволяют определить площади наплавленного и расплавленного металла, размеры которых существенно зависят [5] от количества теплоты, выделяемой дугой, и условий ввода этого тепла в изделие.

Из перечисленных выше конструктивных параметров сварного шва глубина провара однозначно задается конструкторской документацией, и потому принята в расчетной схеме задаваемой величиной. Значения ширины шва и высоты валика могут быть скорректированы в ходе расчета с учетом выбранного типа сварного соединения, вводимых ограничений на мгновенную скорость охлаждения или по иным причинам, что позволяет отнести их к группе расчетных параметров.

Основными параметрами режима автоматической сварки под флюсом, оказывающими влияние на размеры и форму шва, являются: диаметр электрода, сварочный ток или плотность тока в электроде, род и полярность тока, напряжение на дуге, скорость сварки. Из технологических параметров к задаваемым следует отнести диаметр электрода (электродной прово-

локи), что обусловлено дискретным характером его номенклатурных значений по ГОСТ 2246. Значения сварочного тока и скорости сварки могут достаточно легко корректироваться при настройке режима, поэтому их целесообразно отнести к группе расчетных технологических параметров.

Разработку универсальной схемы расчета режимов сварки оплавлением целесообразно выполнять с использованием широко распространенной программы «Маткад», что дает возможность видеть алгоритм расчета, поскольку он представлен в виде удобных для восприятия формул. ПО «Маткад» позволяет квалифицированному пользователю вносить изменения в алгоритм вычислений для адаптации расчета к разнообразным конкретным условиям. Для исключения конфликта промежуточных результатов расчет режимов предусмотрено выполнять в виде решения системы уравнений с использованием встроенного в «Маткад» алгоритма решения систем уравнений.

В качестве начальных присвоений величина сварочного тока определена из условия средней плотности тока из допустимого диапазона для выбранного диаметра электрода. Граничные значения плотности тока и соответствующие им граничные значения сварочного тока для ряда номинальных диаметров электродных проволок представлены в форме функциональных зависимостей, полученных интерполированием широко распространенных табличных значений [5].

Зависимые от значений сварочного тока и диаметра электрода напряжение на дуге и коэффициента формы провара определяются известными уравнениями согласно [5]:

$$U_д = 20 + [5*I/(100*d^{0,5})],$$
$$\Psi = k * (19-0,01*I) * d * U / I,$$

где Uд, I, d – соответственно напряжение, сварочный ток и диаметр электрода,

ψ, k – соответственно коэффициенты провара и влияния рода и полярности тока на форму шва.

Величина коэффициента k, учитывающего влияние рода и полярности сварочного тока, определена по известным формулам согласно [5] в зависимости от величины тока и диаметра электрода.

Графоаналитическая методика расчета коэффициента наплавки для сварки под флюсом, предложенная в [5], является весьма приближенной и трудоемкой, а для сварки в среде активных газов методика его расчета вообще отсутствует. По этой причине величина коэффициента наплавки определена путем коррекции значения коэффициента расплавления электродного металла на величину потерь при переходе расплавляемой проволоки в сварной шов (для сварки под флюсом потери приняты на уровне 5…7 %).

Распространенная методика определения коэффициента расплавления основана на диаграмме, моделирующей функцию двух аргументов (диаметра электрода и величины сварочного тока), которая может быть использована исключительно для графоаналитического расчета. В литературе отсутствуют табличные и эмпирические зависимости, положенные в основу указанной диаграммы. Поэтому для использования указанных функциональных зависимостей в рассматриваемой расчетной схеме выполнена ее «оцифровка». Повышение точности вычислений коэффициента расплавления от диаметра электрода и значения сварочного тока достигнуто применением двухмерной сплайн-интерполяции.

В конечном итоге, система уравнений для расчета режима сварки включает четыре задаваемые параметра: глубина провара, диаметр электродной проволоки, род и полярность тока, тип сварного соединения по ГОСТ 8713 и четыре расчетных параметра: величина сварочного тока, скорость сварки, ширина шва, высота валика. Остальные параметры режима сварки являются зависимыми и могут быть определены по результатам решения системы уравнений.

Начальное присвоение скорости сварки выполнено из условия оптимального значения произведения сварочного тока на скорость сварки, являющегося условием удовлетворительного формирования сварного шва [5].

Значения напряжения на дуге, коэффициента расплавления электрода, коэффициента наплавки, коэффициента влияния рода и полярности тока, коэффициента провара и погонной энергии определены как функции двух переменных: диаметра электрода и величины тока с тем, чтобы в ходе промежуточных вычислений значения указанных параметров оставались корректными.

Система уравнений включает известные уравнения [5]:

$$h = 0,076 \left(\frac{\frac{U(d,I)\, I\, \eta}{V}\, 0,01\ 3600}{\Psi(d,I)} \right)^{0,5}$$

$$b = h\, \Psi(d,I)$$

$$\Psi(d,I) = 2,2$$

где h, V, η – соответственно глубина провара, скорость сварки и коэффициент использования тепла при сварке под флюсом (η = 0,85),

α, Fн(h), b,g – соответственно коэффициент и площадь наплавки без учета площади валика, ширина и высота усиления шва.

Последнее уравнение позволяет задать требуемый коэффициент формы провара в соответствии с конструктивно задаваемыми размерами сварного соединения. Для расширения области применения рассматриваемой модели в состав системы можно вводить уравнение ограничения мгновенной скорости охлаждения и др.

Площадь наплавленного металла в системе уравнений представлена в виде:

$$F = Fн(h) + 0,73*b*g.$$

Она наряду с диаметром электрода, величиной сварочного тока и скоростью сварки относится к основным технологическим параметрам, влияющим на режим сварки. Однако из-за отсутствия в литературе функциональных зависимостей между толщиной металла и площадью наплавленного металла ее корректировка в оперативном режиме при моделировании режимов затруднена. Для сокращения трудозатрат при использовании предлагаемой расчетной модели по результатам обработки геометрических параметров всех стыковых сварных соединений по ГОСТ 8713 определены зависимости площади наплавленного металла от толщины изделия без учета площади сечения валика. Указанные зависимости определены методами математической статистики с учетом размерных допусков по их усредненным значениям.

Разделение площади наплавки на две составляющие (площадь сечения разделки с зазором и площадь валика) обусловлено тем, что с учетом значений ширины и высоты валика площадь наплавленного металла является функцией уже трех аргументов, что усложняет расчетную модель. Кроме того, значения ширины и высоты усиления шва зависят от режимных параметров сварки, что, в конечном итоге, существенно затрудняет алгоритм вычислений.

Указанные зависимости представлены на рис. 1 и в табл. 1. Анализ показывает, что параметры сечений разделки, подчиняются алгоритмам, использованным разработчиками ГОСТ, без существенных отклонений, и потому с удовлетворительной точностью аппроксимированы квадратичными, а в некоторых случаях, и линейными уравнениями.

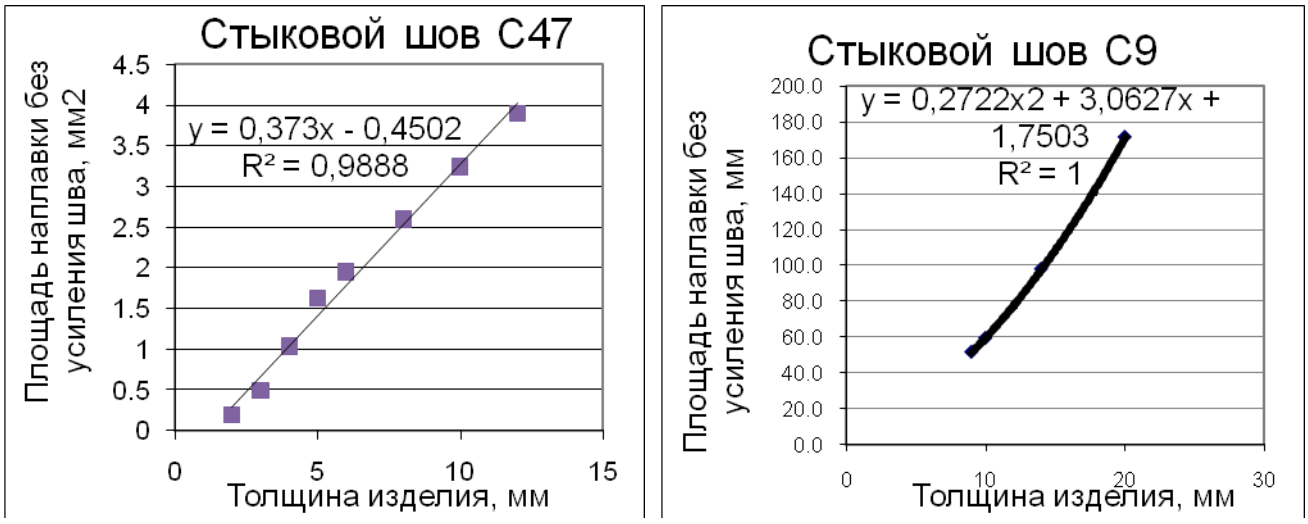


Рис. 1. Зависимость площади наплавки от толщины изделия для двух типов сварных соединений по ГОСТ 8713 (фрагмент)

Использование выявленных таким образом закономерностей между глубиной провара (толщиной изделия) и площадью наплавки позволяет в оперативном порядке выполнять расчет режимов сварки для различных типов сварных соединений и оценить их влияние на параметры тепловых процессов в изделии.

Таблица 1

Зависимости площади наплавленного металла (без учета площади сечения усиления шва) от типа стыкового сварного соединения и толщины основного металла (фрагмент)

Тип сварного соединения	Уравнение	Коэффициент корреляции
С47	$F_{C47}= 0,373 * s + 0,4502$	0,988
С4	$F_{C4}= 0,0381 *s^2 + 2,0149 * s- 3,5925$	0,982
С34	$F_{C34}= 0,1799 *s^2 + 14,446 * s + 98,098$	0,998
С9	$F_{C9}= 0,2722*s^2 + 3,0627* s + 1,7503$	1

Расчеты выполняются в следующем порядке:

– запустить программу на ПК;

– задать глубину провара;

– задать диаметр электродной проволоки;

– с помощью ключей встроенных панелей управления задать род и полярность тока;

– с помощью ключей встроенных панелей управления задать типа сварного соединения по ГОСТ 8713;

– пуск.

Результаты вычислений выводятся в виде матрицы или таблицы, в которой сведены все параметры сварного соединения и режима сварки, а также все дополнительные показатели (рис. 2), которые могут быть использованы для оценки материальных и энергетических затрат.

Q2 =

	0	1	2	3	4	5	6
0	"h, мм"	"b, мм"	"g, мм"	"F, мм2"	"Коэфф провара"	"Коэфф усиления"	"Толщина,
1	8	17.6	1.82	38.41	2.2	9.64	
2	"d, мм"	"I, А"	"Макс. I, А"	"Мин I, А"	"U, В"	"V, м/ч"	"q, Дж/
3	4	800	756.19	442.75	40	37.81	1944
4	""КПД"	"Потери"	"ар, г/(А*ч)"	"а, г/(А*ч)"	"k"	"Vпп, м/ч"	"j, А/м
5	0.8	0.05	15	14.25	1	121.71	63

Рис. 2. Таблица результатов вычислений для одного режима на дисплее ПК

Совокупность таблиц удобно использовать для анализа и оптимизации режимов сварки. Для корректировки режимов таблица результатов содер-

жит предельные значения сварочного тока, определяемые по условию максимально и минимально допустимой плотности тока для различных диаметров электрода. При выходе величины тока за предельные значения пользователь осуществляет корректировку путем изменения диаметра электрода или с меньшей эффективностью – путем изменения коэффициента формы провара. Если площадь наплавки превышает 60…80 мм^2, то схема позволяет использовать модель для расчета режима двухдуговой сварки и т.п. Имеется возможность изменения типа сварного соединения, а также изменения режима для корректировки формы усиления шва и других показателей.

Сопоставление расчетных режимных параметров с экспериментально полученными данными [6] указывает на их удовлетворительную сходимость и возможность использования представленной модели для практических расчетов с целью моделирования и оптимизации сварочных режимов.

Таблица 2

Сопоставление расчетных и экспериментально полученных данных

Параметры режима	Режим 1	Режим 2	Режим 3	Режим 4
	экспер. / *расчет*	*экспер.* / *расчет*	*экспер.* / *расчет*	*экспер.* / *расчет*
Диаметр электрода, мм	5 / 5	5 / 5	4 / 4	4 / 4
Сварочный ток, А	550...600 / 545	650...700 / 613	560...600 / 547	730...770 / 700
Напряжение дуги, В	34...36 / 32,2	32...36 / 33,7	35...36 / 33,7	38...41 / 37,5
Скорость сварки, м/ч	34...36 / 36	28...30 / 23	50...52 / 45,5	50...52 / 34,7
Глубина провара, мм	4,5 / 4,5	6,5 / 6,5	4,5 / 4,5	7 / 7
Ширина шва, мм	18 / 18	23 / 23	15 / 15	18 / 18
Высота усиления шва, мм	2,5 / 1,6	3,7 / 2,2	2,2 / 1,4	2,5 / 1,9
Площадь наплавки, мм^2	30 / 27,5	60 / 48,4	22 / 21,9	31 / 36,6

Представленная расчетная модель может быть распространена на иные методы сварки оплавлением путем дополнения ее соответствующими расчетными схемами. В частности, планируется использование программы

для расчета режимов по заданным геометрическим параметрам швов для сварки в среде защитных газов, для сварки открытой дугой [7, 8], для процессов одно- и двухдуговой сварки стыковых и тавровых соединений, для нагрева и охлаждения изделия и т.п.

Библиографический список

1. Луценко, В.Т. Методика расчета размеров шва при сварке (наплавке) под флюсом / В.Т. Луценко // Сварочное производство. – 1974. – № 8. – С. 21–23.

2. Шраерман, М.Р. Номограммы для определения режимов сварки под флюсом стыковых соединений / М.Р. Шраерман // Сварочное производство. – 1981. – № 8. – С. 17–20.

3. Иванов, М.А. Теоретический подход к расчету режима трехдуговой сварки под флюсом стыкового соединения деталей тележки рельсового транспорта / М.А. Иванов, А.М. Уланов, Ю.В. Безганс // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 146–149.

4. Уланов, А.М. Современный подход к разработке технологических параметров сварки в производстве труб большого диаметра / А.М. Уланов, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19. – № 39. – С. 150–151.

5. Акулов, А.И. Технология и оборудование сварки плавлением. Уч. для вузов / А.И. Акулов, Г.А. Бельчук, В.П. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1977. – 432 с.

6. Шраерман, М.Р. Номограммы для определения режимов сварки под флюсом стыковых соединений / М.Р. Шраерман. – Сварочное производство. – 1981. – № 8.

7. Норин, П.А. Технологические характеристики открытой сварочной дуги / П.А. Норин, А.Ю. Третьяков, А.М. Осипов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Мерия «Машиностроение». – 2012. – № 12 (271), вып. 19. – С. 214–217.

8. Норин, П.А. Анодное падение напряжения / П.А. Норин, А.М. Осипов // Тематический сборник научных трудов «Прогрессивные технологии в машиностроении» / гл. ред. В.И. Гузеев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 184–187.

К содержанию

УДК 621.791.052

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РАМЫ ВАГОНА ТРАМВАЯ

С.И. Ярославцев, М.А. Иванов, Ю.В. Безганс, А.М. Уланов

По результатам проведенных исследований нагружения типового сварного шва в рамной конструкции вагона трамвая получено поле напряжений и установлены максимальные растягивающие напряжения. Сделан вывод о технологичности использования труб круглого сечения для рамы вагона трамвая.

Ключевые слова: напряжения, сварка, сварное соединение, металлоконструкция, рама, трещина, дефект, вагон трамвая.

При изготовлении рамы вагона трамвая используются профильные и круглые трубы, а так же сваренные из листов протяженные балки. Они являются основой силового каркаса всей конструкции.

Концепция разработки сталей и сварных соединений [4, 5] для деталей рельсового транспорта предусматривает снижение содержание углерода; повышение чистоты металла по вредным примесям; рациональное микролегирование; термомеханическую прокатку; рациональный тепловой режим [6, 7, 15]; использование принципов ресурсосбережения [12–14]; снижение дефектности сварных швов [1, 18]; отсутствие трещин [8]; повышение стойкости сварных деталей против лавинных разрушений [2]; снижение остаточных сварочных напряжений [3]; качественную механическую обработку [9–11].

Проведенный анализ сварных соединений труб профильного сечения [16] выявил, что традиционное использование балок или труб профильного сечения снижает технологичность производства и требует повышенных классов точности на их сборку и сварку. Представляется логичным постепенный переход на трубы круглого сечения.

Сконструируем узел из круглых труб, аналогичный профильным трубам из работы [16], используя трубную деталь – штампованный тройник. Сечения труб подберем таким образом, чтобы моменты инерции сохранили своё значение. Радиус перехода от шва к основному металлу (скругление) обеспечим одинаковым в обоих вариантах – 2 мм.

Проанализируем напряжения в наименее защищенных от разрушения её элементах – сварных швах.

Сохранив все прочие линейные размеры неизменными и, нагрузив одинаковой нагрузкой (рис. 1.), получим картину напряжений рис. 2. Вспомогательная планка ступенчатого сплошного сечения (на рис. 1 показана стрелкой) служит площадкой для приложения нагрузки. Приложен изгибающий момент – пара сил. Показана половина узла – разрез по горизонтальной плоскости симметрии.

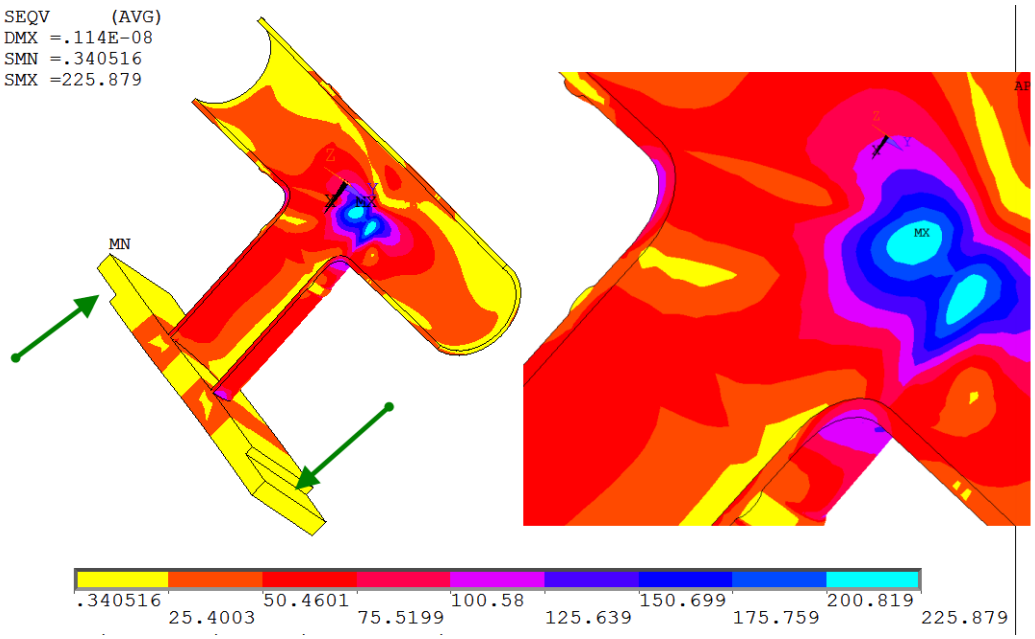


Рис. 1. Схема нагружения сварного узла рамы вагона

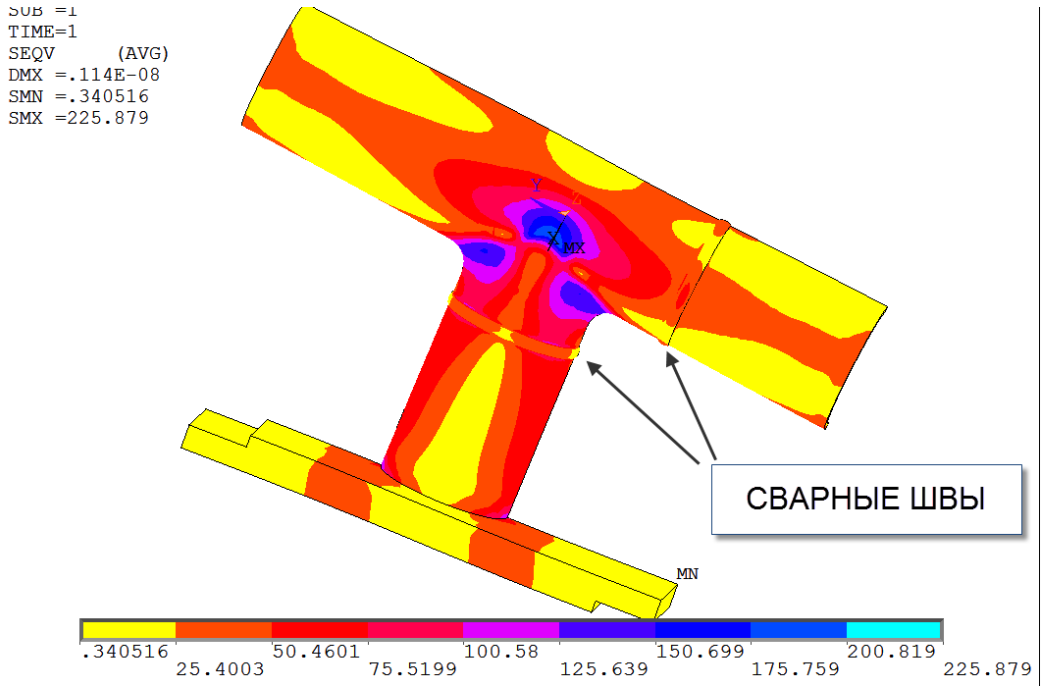


Рис. 2. Интенсивность напряжений по Мизесу в сварном узле рамы вагона, составленной из труб круглого сечения

Если для труб профильного сечения [16], максимальные напряжения были обнаружены в сварных швах и имели величину около 500 МПа, то для труб круглого сечения (см. рис. 2.) напряжения в сварных стыковых швах составили около 50МПа, а в основном металле 225 МПа.

Судя по результатам, напряжения в сварных швах уменьшаются в 10 и более раз при переходе от квадратногосечения [16] к круглому.

Помимо уменьшения напряжений в сварных швах, применение труб круглого сечения имеет следующие преимущества:

- появляется возможность использовать для изготовления каркаса модулей унифицированные серийные изделия: тройники, переходы, отводы, фланцы и прочие, выпускаемые предприятиями трубной отрасли;
- упрощаются операции подготовки деталей под сварку – токарная обработка взамен фрезерной для квадратного сечения;
- более высокая степень технологичности выполнения сварки труб круглого сечения;
- возможность повышения производительности труда при изготовлении рамы за счет применения пайки. Технология пайки труб круглого сечения достаточно отработана, существует гамма припоев, паст, оборудования, в совокупности обеспечивающих высокую производительность и качество соединений;
- возможность использования нахлесточных (телескопических), муфтовых соединений. Это важно, для позиционирования сварного шва относительно координатной системы робота;
- возможность использования в конструкции рамы трубных узлов, изготавливаемых на специализированных предприятиях, по аттестованным технологиям;
- относительная простота соединения каркасов модулей между собой, например, эксцентриковыми муфтами и сваркой (пайкой);
- снижение коробления конструкции за счет уменьшения протяженности сварных швов [17];
- применение унифицированных сборочно-сварочных приспособлений и стендов, разработанных и применяемых в трубной отрасли, для изготовления рамы вагона трамвая.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках комплексного проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда энергосберегающих низкопольных трамвайных вагонов модульной конструкции» по договору № 02.G36.31.0002 между Министерством образования и науки Российской Федерации и Федеральным государственным унитарным предприятием «Государственный космический научно-производственный центр имени М.В. Хруничева» в кооперации с головным исполнителем НИОКТР – Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Библиографический список

1. Пашков, Ю.И. Разработка классификатора дефектов для сварных труб / Ю.И. Пашков, В.А. Лупин, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18. – № 15. – С. 37–40.

2. Лупин, В.А. Проблемы лавинных разрушений газопроводов из сварных труб и способы их предотвращения / В.А. Лупин, Ю.И. Пашков, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18. – № 15. – С. 26–27.

3. Пашков, Ю.И. Остаточные сварочные напряжения и пути снижении стресс-коррозионных разрушений магистральных газопроводов / Ю.И. Пашков, М.А. Иванов, Р.Г. Губайдулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 18. – № 15. – С. 28–30.

4. Иванов, М.А. Методология расчета геометрических размеров сварных швов по параметрам режимов автоматической дуговой сварки под слоем флюса / М.А. Иванов, А.М. Уланов // IX Internationalcongress: Machines, Technologies, Materials 2012. Section «Technologies». Volume 1. – Bulgaria: Varna, 2012. –Vol. 1. – Pp. 86–88.

5. Уланов, А.М. Современный подход к разработке технологических параметров сварки в производстве труб большого диаметра / А.М. Уланов, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19. – № 39. – С. 154–155.

6. К вопросу влияния погонной энергии сварки на скорость охлаждения металла шва / М.А. Иванов, А.М. Уланов, В.В. Роде, П.А. Данилкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – Вып. 19. – № 39. – С. 159–160.

7. Иванов, М.А. Температурные поля изложницы при литье однотонных блоков цилиндра / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Б.А. Кулаков // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2005. – Вып. 6. – № 10 (50). – С. 99–101.

8. Иванов, М.А. Развитие теории трещиноустойчивости отливок / М.А. Иванов, В.И. Швецов, Е.Л. Волосатова, Д.В. Изотов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2011. – Вып. 17. – № 36 (253). – С. 48–50.

9. Гузеев, В.И. Нестационарностьнапряженного состояния на задней поверхности зуба фрезы, обусловленная деформациями в зоне сдвига / В.И. Гузеев, Д.Ю. Пименов // Технология машиностроения. – 2010. – № 7. – С. 20–24.

10. Пименов, Д.Ю. Изменение напряженного состояния задней поверхности зуба фрезы при торцевом фрезеровании / Д.Ю. Пименов, В.И. Гузеев, А.А. Кошин, П.П. Переверзев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 7. – С. 78–80.

11. Пименов, Д.Ю. Определение допустимого износа торцевых фрез для обеспечения требуемой точности / Д.Ю. Пименов, В.И. Гузеев, В.А. Пашнёв // Вестник машиностроения. – 2012. – № 10. – С. 68–72.

12. Ердаков, И.Н. Исследование процесса изготовления литой плиты методом планируемого эксперимента / И.Н. Ердаков, В.М. Ткачев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2010. – Вып. 15. – 2010. – № 34(210). – С. 46–49.

13. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающий аспект в производстве литых плит из стали Гадфильда / И.Н. Ердаков // Заготовительные производства в машиностроении. – 2011. – № 11. – С. 3–5.

14. Ердаков, И.Н. Ресурсосберегающие принципы в литейном производстве / И.Н. Ердаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – № 39. – С. 139–141.

15. Ердаков, И.Н. Метод измерения температур в исследовании характера затвердевания отливки / И.Н. Ердаков, В.В. Новокрещенов, И.В. Саламатов, Л.Н. Сабирова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2012. – № 39. – С. 124–144.

16. Ярославцев, С.И. Анализ напряженного состояния сварных соединений рамы при изготовлении деталей рельсового транспорта / С.И. Ярославцев, М.А. Иванов, Ю.В. Безганс // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 2. – С. 86–89.

17. Работоспособность сварных боковин модуля секции трамвая / С.С. Загребельный, А.А. Шакиров, А.М. Уланов, М.А. Иванов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 90–94.

18. Салимов, Р.Д. К вопросу работоспособности углового сварного шва подкрановой балки / Р.Д. Салимов, М.А. Иванов, И.А. Щербаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 147–150.

К содержанию

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

УДК 666.948 + 666.974.2

ЖАРОСТОЙКИЕ ФОСФАТНЫЕ ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ, КЛЕИ И СВЯЗУЮЩИЕ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНЫХ ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

В.А. Абызов

Приведена классификация высокоглиноземистых промышленных отходов, показаны их оптимальные области применения. Разработана широкая номенклатура фосфатных вяжущих, ячеистый жаростойкий газобетон и клеи на их основе, изучены их жаростойкие свойства.

Ключевые слова: высокоглиноземистые промышленные отходы, жаростойкий фосфатный газобетон, фосфатное связующее, фосфатный клей.

Вытеснение штучного огнеупора жаростойкими и огнеупорными бетонами приобрело широкие масштабы, особенно в черной металлургии, где бетоны применяются под различными названиями («неформованные огнеупоры», «безобжиговые огнеупоры»). В области температур 1400…1700 °С используются бетоны на глиноземистых (ГЦ) и высокоглиноземистых (ВГЦ) цементах, отличающиеся интенсивным набором прочности, твердеющие без применения термообработки, а также фосфатные связующие. Используются не только отечественные цементы, но и импортные (Secar, Gorkal, Fondu и др.).

Вопросы расширения сырьевой базы для вяжущих и бетонов за счет использования побочных продуктов промышленности, в особенности дисперсных высокоглиноземистых отходов, а также высокоглиноземистых шлаков алюминотермического производства, весьма актуальны. Кроме того, для фосфатных материалов большой интерес представляет снижение энергоемкости их производства.

В сфере применения промышленных отходов накоплен обширный опыт, однако многообразие местных разновидностей отходов сдерживает их применение. Кроме того, зачастую в побочных продуктах промышленности содержатся различные примеси, затрудняющие их использование.

Существующие направления переработки отходов можно сгруппировать следующим образом:

1. Заполнители на основе вторичных огнеупоров, шлаков черной и цветной металлургии, в особенности ферросплавного производства.

2. Тонкомолотые добавки из вторичных огнеупоров, шлаков и других материалов с повышенным содержанием огнеупорных соединений (корунда, шпинелей, форстерита, муллита, глинозема, оксида хрома и т.д.).

3. Высокодисперсные огнеупорные промышленные отходы, не требующие измельчения, как часть вяжущего или тонкомолотой добавки (пыль газоочистки ряда огнеупорных и химических производств, шламы химических, нефтехимических и абразивных предприятий, отработанные катализаторы нефтехимических производств).

4. Вяжущие на основе отходов, либо получаемые попутно с другой продукцией (глиноземистый и высокоглиноземистый цементы алюминотермического процесса, шламовая ортофосфорная кислота, фосфатные связки на основе отходов химической промышленности и др.).

Отражая генезис и косвенно – размер частиц, данная классификация недостаточна для выбора оптимальной области применения. Воспользоваться классификацией, принятой для обжиговых огнеупоров (по оксидам), не представляется возможным – состав компонентов бетона сложнее, чем обжиговых огнеупоров.

В зависимости от состава, можно выделить следующие требования к промышленным отходам, перспективным с точки зрения переработки:

Фракционный состав, позволяющий снизить затраты на измельчение:

– кусковые материалы (шлаки, вторичные огнеупоры), пригодные для использования в качестве заполнителя.

– дисперсные отходы для использования в составе вяжущего и тонкомолотой добавки (пыли, шламы, отработанные катализаторы и т.д.);

Дисперсные отходы можно разделить по составу [1]:

1. По химическому составу:

– алюмосиликатные отходы, обладающие хорошей активностью по отношению к фосфатному связующему (вторичные шамотные огнеупоры, отходы производства шамота и т.д.);

– глиноземистые отходы, обеспечивающие высокую температуру применения (шлаки выплавки вторичного алюминия, отходы производств корунда, катализаторов, отработанные катализаторы, шламы водоподготовки и т.д.);

– хромглиноземистые отходы, снижающие температуру формирования стабильных фосфатов (феррохромовые шлаки, отходы производств катализаторов, шламы абразивного производства, травления и т.д.);

– отходы, содержащие двуокись титана, которая обеспечивает быструю кристаллизацию фосфатов (шламы, отходы пигментных производств, производства титанистого корунда и т.д.);

– отходы, содержащие карбид кремния, повышающие термостойкость (бой тиглей, нагревателей, отходы производства абразивов);

– корундовые и шпинелидные отходы, являющиеся огнеупорными микронаполнителями (шлаки алюминотремических производств, отходы производства корунда;

2. По фазовому составу:

– отходы с преобладанием соединений в активной форме – для компонентов вяжущего (отходы химических производств, катализаторов, отработанных катализаторов, травильных производств и т.д.);

– отходы с преобладанием закристаллизованных, стабильных соединений, пригодные для производства для наполнителей и заполнителей (феррохромовые шлаки, отходы корундовых производств, шлаки алюминотермических производств и т.д.).

Кроме того, можно выделить группу отходов, содержащих активные примеси, обеспечивающие ранний набор прочности, либо экзотермический эффект при твердении вяжущего (это позволяет отказаться от термообработки или снизить ее температуру):

– наличие оксидов Fe_2O_3, CaO, MgO, R_2O (шлаки выплавки вторичного алюминия, отходы, богатые алюминатами кальция и т.д.);

– наличие металлического алюминия.

Основные требования к отходам с точки зрения энергоэффективности:

– дисперсность (отсутствие дополнительного измельчения);

– способность проявлять активность в фосфатных системах или глиноземистых цементах;

– снижение температуры термообработки или замена ее экзотермическими процессами, протекающими в вяжущей системе;

В удобной форме данные признаки сгруппированы в табл. 1.

Для фосфатных материалов общие классификационные признаки были сформулированы в работах Кинжери (бурное взаимодействие с кислотой, взаимодействие на холоду, взаимодействие при нормальной температуре, взаимодействие только при нагреве). Кроме того, для металлов и их соединений действует правило убывания активности в ряду:

металл – оксид – гидроксид – соль слабой кислоты.

В данные схемы не укладываются материалы, обладающие «избыточной» и «недостаточной» активностью. Отходы по рациональным областям применения можно, основываясь на табл. 1, расположить в ряду (по активности):

1) газообразователь в фосфатном газобетоне;

2) компоненты жидких фосфатных связующих (ФС), не требующих нагрева при приготовлении;

3) фосфатные клеи, цементы;

4) наполнители в фосфатном газобетоне;

5) тонкомолотые добавки в ГЦ.

В настоящей работе были использованы следующие материалы:

– отработанный алюмохромовый катализатор ИМ-2201 по ТУ 2123-093-16810126-2004, ТУ 2123-093-16810126-2004 ОАО «Каучук» (г. Стерлитамак);

– отсевы носителя катализатора дегидрирования углеводородов по ТУ 6-68-167-99 производства ООО «НПП Крона-СМ», (г. Новосибирск);

– шламы нормального электрокорунда ОАО «Челябинский абразивный завод», (г. Челябинск);

– тонкомолотый шамот и шамотный порошок производства Челябинского металлургического комбината (ЧМК), г. Челябинск;

– шлаки выплавки вторичного алюминия Сухоложского завода вторичных цветных металлов (Свердловская обл.)

– отходы обогащения шлака ШФХ-А (Ключевского завода ферросплавов), ООО «ЮжУралинструмент», (г. Челябинск);

– шлаки алюминотермического производства феррохрома (ШФХ-А), ферротитана (ШФТ), металлического хрома ПГ-75 по ТУ 14-00186482-048-03 производства ООО Ключевская обогатительная фабрика (Свердловская обл.) [2];

С учетом особенностей состава и свойств дисперсных высокоглиноземистых промышленных отходов, были разработаны жаростойкие фосфатные связующие, клеи и ячеистые бетоны.

Были получены следующие ФС:

– Алюмофосфатное (АФС) на основе отсевов носителя катализатора дегидрирования углеводородов, на основе шлака выплавки вторичного алюминия;

– Алюмомагнийфосфатное (АМФС), с решением проблем стабильности и огнеупорности магнийфосфатного, на основе отсевов носителя катализатора, дегидрирования углеводородов, пыли с фильтров производства магнезита);

– Алюмосиликофосфатное (АСФС) и его хромсодержащая разновидность (АСХФС) на основе отходов производства муллитокремнеземистого волокна и его хромсодержащей разновидности;

– Алюмохромфосфатное на основе отработанного катализатора нефтехимического производства ИМ-2201.

Жидкие огнеупорные фосфатные клеи разрабатывались на основе отработанного катализатора ИМ-2201, пыли с фильтров производства магнезита (ПМК-75,85), распадающегося феррохромового шлака алюминотермического производства).

В отличие от различных мертелей, основанных на принципе спекания, фосфатные клеи твердеют и набирают прочность в процессе сушки футеровки из штучного огнеупора, обладают высокой адгезией и термостойкостью. Смеси ФС и наполнителя характеризуются короткими сроками схватывания, необходимы жидкие клеи, способные длительно сохранять свойства.

Таблица 1

Классификация дисперсных глиноземистых промышленных отходов

<table>
<tr><td colspan="10">Глиноземистые промышленные отходы</td></tr>
<tr><td colspan="8">Дисперсные</td><td colspan="2">Кусковые</td></tr>
<tr><td colspan="5">Активные</td><td colspan="2">Инертные (кристаллические)</td><td rowspan="2">Активны после помола</td><td rowspan="2">Инертные</td></tr>
<tr><td colspan="2">Аморфные</td><td colspan="3">Мелкокристаллические</td><td colspan="2">Содержащие активные примеси</td><td>Чистые</td></tr>
<tr><td>Al_2O_3, $Al(OH)_3$</td><td>Al_2O_3+ Cr_2O_3</td><td>Al_2O_3, $Al(OH)_3$+ кислые оксиды</td><td>Алюмосиликаты</td><td>Алюминаты кальция</td><td>Кислые оксиды (TiO_2, Fe_2O_3)</td><td>Al (мет.)</td><td>- отходы абразив. пр-в (шламы);
- пыли огнеуп. пр-в;</td><td>- богатые кальцием шлаки алюминотермического процесса (шлак безуглеродистого феррохрома, обогащенный кальцием; шлак ферротитана):</td><td>– бедные кальцием шлаки алюминотермич. процесса;
– вторичные огнеупоры;</td></tr>
<tr><td>- отсевы носит. катализатора;
- отработанные. сорбенты;</td><td>- отраб. алюмохром. катализаторы;
- от. пр-ва огнеупорного волокна.</td><td>- пигментного производства;
- травильного производства, гальванические шламы;</td><td>- отх. шамотн. пр-ва (пыль с фильтров)</td><td>-распад. глиноземшлаки а/термич. процесса (Fe-Cr);
- распад. шлаки феррованадия;
- синтет. шлаки;
- отходы обогащ. шлаков а/термич. пр-ва</td><td>- отх. пр-ва титанистого корунда;
- отходы абразивных пр-в (пыль с фильтров, регенер.)</td><td>шлаки вторич. выплавки алюминия</td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Фосфатные связующие, цементы, добавки в цементы</td><td colspan="2">Фосфатные цементы, микронаполнители в фосфатном газобетоне</td><td>Фосфатные цементы, ГЦ и ВГЦ</td><td>Фосфатные цементы, микронаполнители в газобетон</td><td>Газообразователь</td><td>Добавки в ГЦ, микронаполнители</td><td>ГЦ и активные добавки в ГЦ и ВГЦ</td><td>Заполнители в жаростойком бетоне</td></tr>
</table>

На основе отработанного катализатора ИМ-2201, каолина и добавок дисперсных отходов, обеспечивающих умеренный разогрев клеевой композиции (до 40 °С) были получены фосфатные клеи (ТУ 1526-002-53829862-2001), проведено их промышленное внедрение на предприятиях Уральского региона, что позволило увеличить межремонтные сроки для нагревательных печей в 4 раза (ОАО Кама-Сталь), повысить стойкость арматурной зоны ковшей (ОАО Мечел), отказаться от промежуточных на мартеновских печах (ОАО ЧТПЗ) [3, 4].

На основе разработанных фосфатных связующих, а также выпускающегося промышленностью алюмоборфосфатного (АБФС), были разработаны жаростойкие бетоны с глиноземистыми огнеупорными наполнителями (отработанный алюмохромовый катализатор ИМ-2201, корундовые отходы, шамот тонкомолотый), свойства которых приведены в табл. 3. Процесс вспучивания и твердения протекает в течение нескольких минут, материал не требует термообработки. Температура применения, в зависимости от наполнителя и средней плотности, составляет 1400–1600 °С.

Таблица 2

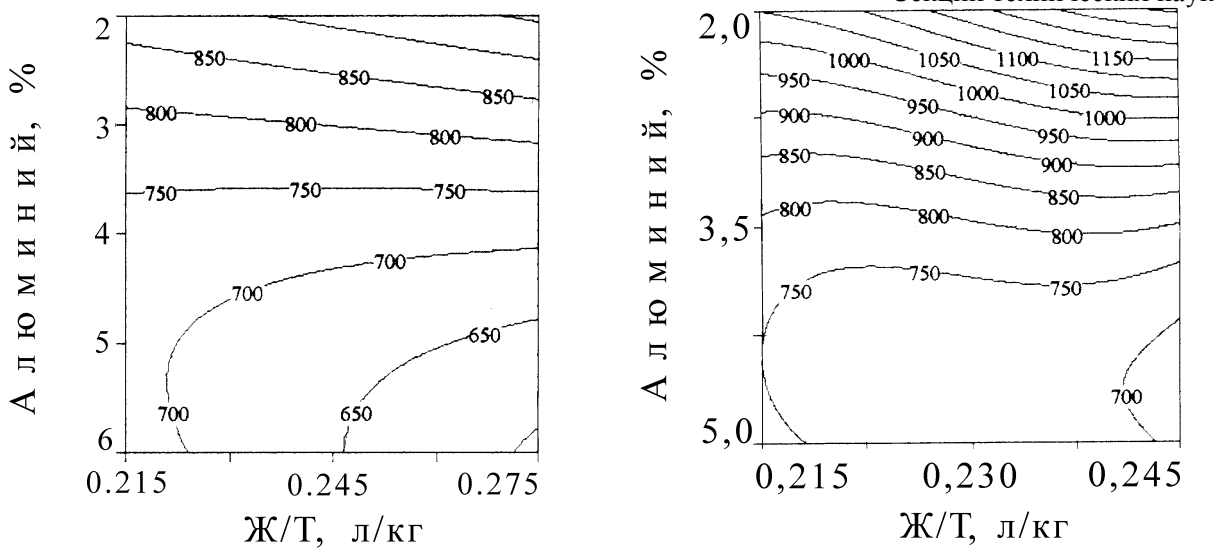
Основные свойства фосфатных клеев
на основе высокоглиноземистых отходов

№	Показатель	Величина
1	Жидко-твердое отношение (рекомендуемое), кг/л	0,8-1,1
2	Гарантийный срок хранения в жидком виде, сут.	60
3	Предел прочности при сдвиге после сушки при 300°С, МПа	4-8
4	Предел прочности при сдвиге после обжига 1000°С, МПа	3-4
5	Предел прочности при сдвиге после обжига при 1600°С, МПа	не менее 3
6	Огнеупорность, °С, не менее	1750
7	Температура применения, °С	1650

Получены зависимости, описывающие влияние Ж/Т отношения и дисперсного алюминия, а также отработанного алюмохромового катализатора на прочность и среднюю плотность газобетона, например, для бетона на АМФС они имеют следующий вид (рис.).

Методами физико-химического анализа изучены особенности изменения фазового состава композиций, показано, что конечными фазами являются стабильные α-Al_2O_3, $AlPO_4$ кристобалитового и тридимитового типа [5]. Все виды газобетона являются преимущественно алюмофосфатными, так как значительное количество фосфатов формируется при взаимодействии алюминия и ФС, однако введение соответствующих катионов в фосфатное связующее улучшает некоторые специальные свойства. Так, АСФС обеспечивает повышение прочности, а АБФС – повышает температуру кристаллизации фосфатов, сохраняя аморфную структуру до 560°С.

Основные свойства газобетона приведены в табл. 3 на примере алюмомагнийфосфатного.



а) б)

Влияние количества фосфатной связки и дисперсного алюминия на среднюю плотность корундового газобетона, кг/м^3:
а) 0,25-замещенное АМФС, средняя плотность, кг/м^3; б) 0,5-замещенное АМФС

Таблица 3

Свойства газобетона на основе АМФС, шлама электрокорунда и отработанного катализатора

№ п/п	Характеристика	Средняя плотность, кг/м^3			
		600	700	800	900
1	Предел прочности при сжатии после сушки, МПа	1,52	2,18	2,65	2,01
2	Предел прочности после нагрева до предельной температуры применения, МПа	1,17	1,98	2,12	1,93
3	Температурная усадка при предельной температуре применения, %	-0,70	-0,76	-0,80	-0,71
4	Остаточная прочность при 800 ºС, %	100	99	100	102
5	Термостойкость при 800 ºС, воздушные теплосмены	10	23	30	30
6	Огнеупорность, ºС, не менее	1770	1770	1770	1770
7	Предельная температура применения, ºС	1500	1600	1600	1600

Таким образом, на основе высокоглиноземистых промышленных отходов, с учетом особенностей их состава, разработана широкая гамма фосфатных связующих, клеев, ячеистых бетонов и глиноземистых вяжущих, модифицированных добавками.

Библиографический список

1. Абызов, В.А. Выбор рациональных областей применения промышленных отходов в технологии жаростойкого бетона / В.А. Абызов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – Вып. 7. – № 25(125). – С. 37–39.

2. Перепелицын, В.А. Техногенное минеральное сырье Урала / В.А. Перепелицын, В.М. Рытвин, В.А. Коротеев, А.Б. Макаров, В.Г. Григорьев и др. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 332 с.

3. Абызов, В.А. Разработка и опыт применения огнеупорных фосфатных клеев на основе высокоглиноземистых промышленных отходов / В.А. Абызов, Е.Н. Ряховский // Новые огнеупоры. – 2011. – № 3. – С. 73.

4. Абызов, В.А. Разработка и опыт применения огнеупорного клея на фосфатных связующих / В.А. Абызов, Е.Н. Ряховский // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 11. – С. 28–30.

5. Абызов, В.А. Жаростойкий газобетон на алюмоборфосфатном связующем / В.А. Абызов, А.Н. Абызов, В.А. Магилат, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы и изделия: Межвузовский сб. научн. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – С. 143–148.

К содержанию

УДК 666.948 + 669.15-198.046.58

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ГЛИНОЗЕМИСТЫЕ ВЯЖУЩИЕ НА ОСНОВЕ ШЛАКОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В.А. Абызов, Д.А. Речкалов, С.Н. Черногорлов

Изучено вяжущее из отходов обогащения шлака алюминотермического производства безуглеродистого феррохрома. Представлены результаты изучения влияния добавок пластификаторов на свойства данного вяжущего, получено вяжущее с нормальными сроками схватывания.

Ключевые слова: шлак алюминотермического производства, глиноземистый цемент, высокоглиноземистый цемент, суперпластификаторы.

В настоящее время в качестве вяжущих для жаростойких и огнеупорных бетонов как в нашей стране, так и за рубежом, наиболее широко применяются глиноземистые (ГЦ) и высокоглиноземистые цементы (ВГЦ). Технология их получения отличается высокой энергоемкостью, используется дорогостоящее сырье – бокситы и глинозем. Одним из путей снижения стоимости данных цементов является использование шлаков алюми-

нотермического производства ферросплавов, богатых глиноземом, значительное количество которых образуется на Ключевском заводе ферросплавов (табл. 1). Шлаки применяются в качестве сырья для получения клинкера (путем переплава шлаков или введения дополнительного оксида кальция в жидкий шлак) или добавки в вяжущее. Перспективной разновидностью таких шлаков с точки зрения получения цементов является шлак безуглеродистого феррохрома (ППГ-50), позволяющий получать вяжущее с наименьшими затратами. По фазовому составу он наиболее близок к ГЦ и ВГЦ – преобладают СА и $C_{12}A_7$, β-C_2S и шпинель $Mg(Al,Cr)_2O_4$ [1, 2]. Шпинель улучшает огнеупорные свойства вяжущего, но не активна и понижает прочность.

Таблица 1

Химический состав плавленых продуктов (шлаков)
ООО Ключевская обогатительная фабрика

Марка	Химический состав, %						
	Al_2O_3	CaO	Cr_2O_3	TiO_2	SiO_2	MgO	FeO
ППГ-75	70–82	5–15	5–12	–	1	3	1
ППГ-50	46–58	10–24	3–12	–	5	20	2
ППГ-65	56–70	10–24	0–0,2	20	2	5	3
ППГ-65К	60–70	20–25	–	11	1	5	1,5

Улучшить вяжущие свойства шлака безуглеродистого феррохрома можно, извлекая шпинель [2]. В настоящее время ООО «ЮжУралинструмент» (г. Челябинск) применяет сепарацию, обеспечивающую частичное извлечение шпинели, используемой для производства абразивных и огнеупорных материалов. Образующиеся отходы обогащения весьма дисперсны (основные фракции – менее 8 мкм, 8-20 мкм), содержание алюминатов кальция выше, чем в шлаке. Активность данных отходов после помола достаточно высокая, но такое вяжущее имеет короткие сроки схватывания (табл. 2). Целью данной работы являлось получение глиноземистых вяжущих из данных отходов с удовлетворительными сроками схватывания и прочностными свойствами.

Для оценки возможности активации шлака и продуктов его обогащения материал размалывали, оценивая тонкость помола (по удельной поверхности), а также нормальную густоту, сроки схватывания, прочность цементного камня (табл. 2, 3). Установлено, что сроки схватывания такого вяжущего очень короткие (начало схватывания в пределах 5 мин, конец – 20 мин). Вяжущее не соответствует требованиям ГОСТ 969 по прочности, и срокам схватывания (начало – не ранее 30 мин).

Известен положительный опыт регулирования сроков схватывания высокоглиноземистых вяжущих путем введения добавок пластификаторов [2-4]. В данной работе для этого были применялись добавки СП-1 (С-3), а также Melflux 1641, 2641, 2651 F.

Таблица 2

Влияние тонкости помола на свойства шлакового вяжущего

Вид материала	Удельная поверхность, $см^2/г$	Средний размер частиц, мкм	Начало схв., мин.	НГ, %
Шлак исходный	3300	5,5	5–0	26
Шлак исходный	3840	4,7	менее 3	неопр.
Шлак исходный	4900	3,7	менее 3	неопр.
После сепарации	2000	9	8–10	25
После сепарации	2700	7	5–7	26
После сепарации	3200	5,5	менее 3	27–28
После сепарации	4200	4,3	менее 3	неопр.

Таблица 3

Влияние тонкости помола на прочность цементного камня

Материал	Удельная поверхность, $см^2/г$	НГ, %	$R_{сж}^{3сут}$, МПа	$R_{сж}^{7\ сут}$, МПа
Шлак исходный	3300	26	24	32
После сепарации	2000	25	44	60
После сепарации	2700	26	50	73

Введение в вяжущее добавки СП-1 (С-3) в количестве 0,2 и 0,4 % от массы вяжущего привело к незначительному увеличению начала схватывания (10–15 мин) и позволило повысить прочность вяжущего в 3 сут возрасте в среднем на 30 %. На стандартных образцах-балочках по ГОСТ 969 прочность при сжатии не превышает 25 МПа в 3 сут и 28-30 МПа в 7 сут возрасте.

Помимо СП-1, изучалось влияние добавок суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов – Melflux 1641, Melflux 2641 и Melflux 2651F. Установлено, что добавка Melflux 1641 обладает хорошим эффектом замедления схватывания, а наилучшие результаты были достигнуты с применением Melflux 2641. В связи с этим подробнее было изучено влияние эффективной добавки Melflux 2641, которая хорошо адсорбируется на алюминатах кальция и способна наиболее эффективно замедлять схватывание, в то же время не замедляя твердение к 3 и 7 сут возрасту.

Использование добавки Melflux 2641 позволило получить из отсевов обогащения вяжущее с пределом прочности для цементного камня 63…80 МПа в 3 сут возрасте и до 87 МПа в 7 сут. К 28 сут заметного прироста прочности не наблюдается. Начало схватывания составляет 20…30 мин.

Для уточнения характера влияния тонкости помола и количества добавки Melflux 2641F на нормальную густоту и предел прочности при сжатии вяжущего необходимо было выявить двухфакторные зависимости, на основании которых были построены графические отображения исследуе-

мых показателей в виде изолиний (рис. 1, 2). Из рис. 1 следует, что по мере увеличения удельной поверхности вяжущего следует надлежащим образом повышать дозировку добавки суперпластификатора.

Предел прочности при сжатии цементного камня (рис. 2) повышается по мере увеличения дозировки добавки и времени помола, но снижается пропорционально квадрату данных показателей – т.е. прирост прочности будет нелинейно замедляться, а при превышении некоторых оптимальных значений количества добавки и времени измельчения – прочность начнет падать.

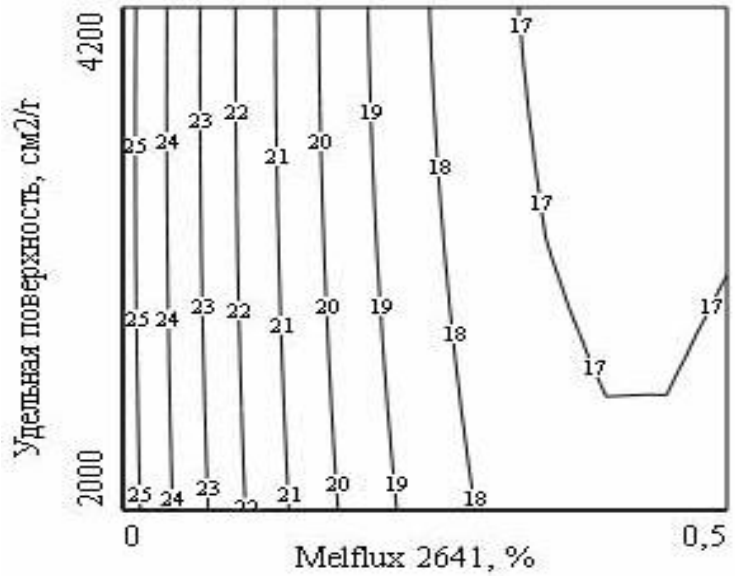


Рис. 1. Влияние добавки Melflux 2641F
и удельной поверхности на нормальную густоту вяжущего, %

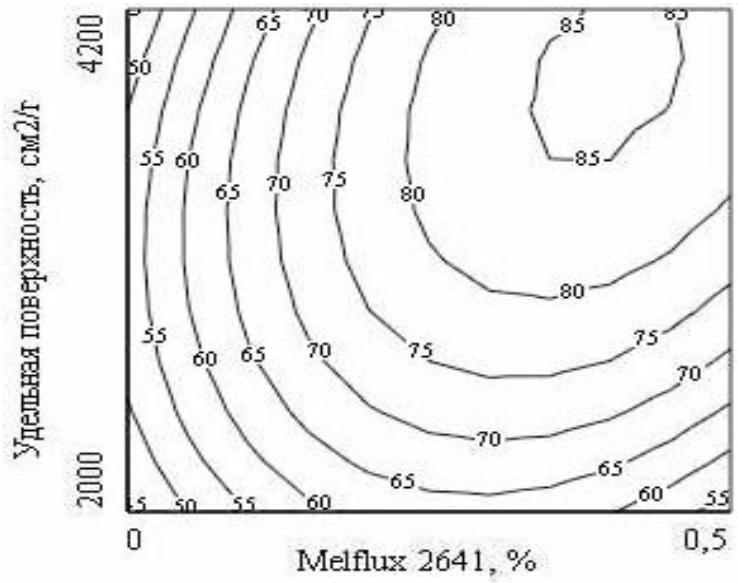


Рис. 2. Влияние добавки Melflux 2641F и времени помола
на прочность цементного камня, МПа

Методами физико-химического анализа было установлено, что высокие дозировки данных добавок приводят к длительному сохранению в цементном камне значительного количества аморфных, гелевидных продуктов гидратации, что приводит к значительным усадочным деформациям и в некоторых случаях – снижению прочности до 50…60 % от первоначальной, дозировки добавок свыше 0,5 % применять недопустимо. Особенности гидратации разработанного вяжущего в присутствии добавок согласуются с данными, ранее полученными для глиноземистого цемента [4].

В результате было получено вяжущее с удельной поверхностью 4200–4900 $см^2/г$, которое при введении добавки Melflux 2641F имеет нормальные сроки схватывания и прочность при сжатии по ГОСТ 310.4 в 3 сут возрасте 30–35 МПа. К 7 сут возрасту прочность повышается до 40–50 МПа и в дальнейшем меняется незначительно. Огнеупорность разработанных вяжущих превышает 1450°С (может меняться в зависимости от степени извлечения шпинели). Цементы по своему составу близки к глиноземистым с тонкомолотыми огнеупорным добавками, так как содержат значительное количество алюмомагнезиальной шпинели.

Библиографический список

1. Абызов, А.Н. Жаростойкие и огнеупорные бетоны на основе вяжущих и заполнителей из шлаков ферросплавного производства / А.Н. Абызов, В.М. Рытвин, В.А. Абызов, В.А. Перепелицын, В.Г. Григорьев // Труды международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов. – Екатеринбург: ООО УИПЦ, 2012. – С. 304–306.

2. Перепелицын, В.А. Техногенное минеральное сырье Урала / В.А. Перепелицын, В.М. Рытвин, В.А. Коротеев, А.Б. Макаров, В.Г. Григорьев и др. – Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 332 с.

3. Абызов, В.А. Влияние добавок суперпластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов на особенности гидратации глиноземистых цементов из шлаков алюминотермического производства / В.А. Абызов, С.Н. Черногорлов // Перспективы развития строительного материаловедения: сб. статей межд. науч.-техн. конф. – Челябинск: Изд-во Пирс, 2013. – С. 25–28.

4. Абызов, В.А. Особенности гидратации высокоглиноземистого цемента из шлаков алюминотермического производства с добавками суперпластификаторов / В.А. Абызов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2009. – № 4–5. – С. 80–84.

К содержанию

УДК 697.31

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ

Е.Ю. Анисимова

В статье рассмотрена задача оптимального управления тепловым режимом здания в нерабочее время. Найден алгоритм оптимального управления режимом прерывистого отопления. Показаны возможности созданного программного продукта по определению оптимального режима прерывистого отопления для различных случаев. Проведен анализ экономии энергии при использовании прерывистого отопления.

Ключевые слова: экономия тепловой энергии в системах отопления зданий, управление тепловым режимом здания, прерывистый режим отопления.

Актуальность темы исследования определяется острой необходимостью разработки и внедрения мероприятий, направленных на повышение эффективности использования энергоресурсов. Данная задача является одной из приоритетных в нашей стране на период до 2020 г. Основным документом, отражающим главные аспекты энергосберегающей политики, является Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации». К одной из задач, поставленных в законе, относится разработка и внедрение энергосберегающих технологий и оборудования.

Согласно СП 60.13330.2012 в жилых, общественных, административно-бытовых и промышленных зданиях, в промежуток времени, когда они не эксплуатируются, то есть в нерабочее время, температуру внутреннего воздуха можно поддерживать на более низком уровне, чем в остальные промежутки времени. Это дает возможность снизить расход тепловой энергии на отопление. Для большинства общественных, учебных, офисных, административно-бытовых, некоторых производственных зданий и т.д. этот промежуток времени может составлять в среднем до 40 % в будние дни и до 100 % в выходные и праздничные. Для жилых зданий нерабочее время может пониматься, как время, когда в здании не проживают, или ночное время, когда снижение температуры внутреннего воздуха позволяет не только снизить расход тепловой энергии, но и сделать отдых человека более качественными.

Задача об оптимальном управлении тепловым режимом здания в нерабочее время была нами решена [1, 2]. Для решения этой задачи использовалась математическая модель теплового режима здания (ТРЗ) с распределенными параметрами, для которой разрабатывалось оптимальное управ-

ление в нерабочее время, сформулированы условия оптимальности управления ТРЗ в форме принципа максимума, получен общий вид оптимального управления и вид субоптимального управления для модели с распределенными параметрами, разработаны алгоритмы оптимального управления микроклиматом здания. Кроме того, разработано программное обеспечение для отыскания алгоритма оптимального управления ТРЗ в нерабочее время, который обеспечит существенную экономию тепловой энергии. Также найденные с помощью программы результаты могут использоваться для прогнозирования, контроля и управления параметрами микроклимата зданий при нормальных условиях работы, а при авариях на источниках теплоты и (или) теплотрассах, когда прекращается подача тепла в здание.

Данная программа реализует алгоритмы получения различных режимов управления мощностью системы отопления в нерабочий период для конкретного здания с целью проведения качественного и количественного их сравнения. В общем, в программе рассчитываются пять различных тепловых режимов, которые наиболее распространены в настоящее время или применение которых даст существенную экономию теплоты. На данную программу получено свидетельство об отраслевой регистрации разработки, зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ [3].

Для проведения вычислений по определению оптимальных режимов отопления необходимо задать следующие исходные данные: толщину и теплотехнические параметры наружных ограждений здания, параметры внутреннего и наружного воздуха, минимально допустимую температуру внутреннего воздуха (рекомендуется принимать 12 °С), продолжительность нерабочего периода, располагаемую мощность системы отопления.

В результате расчетов для каждого режима определяются продолжительности времени охлаждения и натопа здания, минимальная температура внутреннего воздуха в режиме охлаждения, формируются графики для каждого режима: изменение внутренней температуры воздуха в здании $t_в$, температуры внутренней поверхности наружной стены $t_{нок}$ и тепловой мощности системы отопления во времени в нерабочий период, кроме того показывается значение расхода тепловой энергии, затраченной при данном режиме управления. Цель данных расчет – оценка эффективности алгоритмов управления ТРЗ.

Для проведения корректного сравнения все пять режимов управления применены к одному и тому же зданию. Для численного моделирования использовалось одноэтажное, бесчердачное, бесподвальное здание, отвечающее современным требованиям по тепловой защите наружных ограждений, с мощность системы отопления 3475 Вт. Продолжительность нерабочего периода времени составляло 15 часов. Расчеты проводились для температуры наружного воздуха минус 18 °С.

Были рассмотрены следующие режимы и получены результаты.

1-ый режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна максимальному (установленному) значению, а во второй период – минимальному, причем длительность периодов отыскивалась моделированием процесса.

2-ой режим: в течение первого периода времени мощность системы отопления равна минимальному значению, во второй период – максимальному, а длительность периодов отыскивалась также моделированием процесса, при этом условия задачи таковы, что ограничение по температуре внутреннего воздуха не нарушается, то есть внутренняя температура не опускается ниже 12 °С.

В результате численного моделирования управления тепловой мощностью для данного здания были получены графики изменения температуры внутреннего воздуха, температуры внутренней поверхности наружной стены и мощности системы отоплении с указанием расхода теплоты для 1-го режима – рис. 1 и рис. 2, для 2-го режима – рис. 3 и рис. 4 соответственно. Из рис. 1 и 2 видно, что в первый период здание отапливается максимальной мощностью 3475 Вт, происходит его натоп, при этом наблюдается рост внутренней температуры, во втором периоде тепловая мощность снижается до 0 Вт, то есть происходить охлаждение объекта, при этом температура внутреннего воздуха падает до требуемого значения. В начальный и конечный моменты времени температуры внутреннего воздуха равна одному и тому же значению 21 °С. Расход теплоты, составляет 51912,6 Вт*ч.

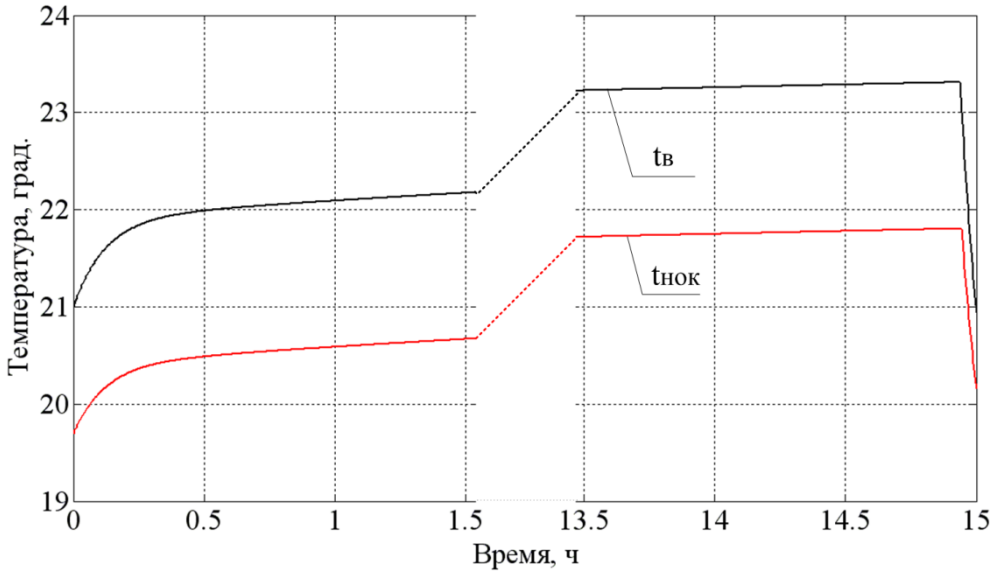


Рис. 1. Изменение температур внутреннего воздуха $t_в$ и внутренней поверхности наружного ограждения $t_{нок}$ при 1-ом режиме управления ТРЗ

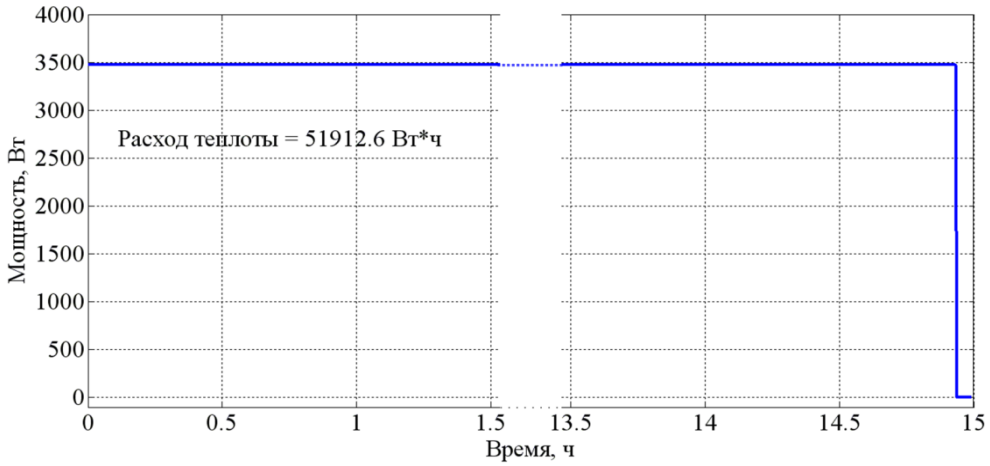


Рис. 2. Изменение тепловой мощности системы отопления в 1-ом режиме

Изменения внутренних температур и тепловой мощности при 2-ом режиме управления представлены на рис. 3 и 4. Очевидно, что в первый период нерабочего времени, когда мощность системы отопления равна нулю, происходит снижение температуры внутреннего воздуха (не ниже минимально допустимой 12 °С), а во второй, когда тепловая мощность равна максимальному значению 3475 Вт, происходит рост внутренней температуры до требуемого значения. В начальный и конечный моменты времени температуры внутреннего воздуха помещения равна одному и тому же значению 21 °С. Расход тепловой энергии составляет 31159,2 Вт*ч.

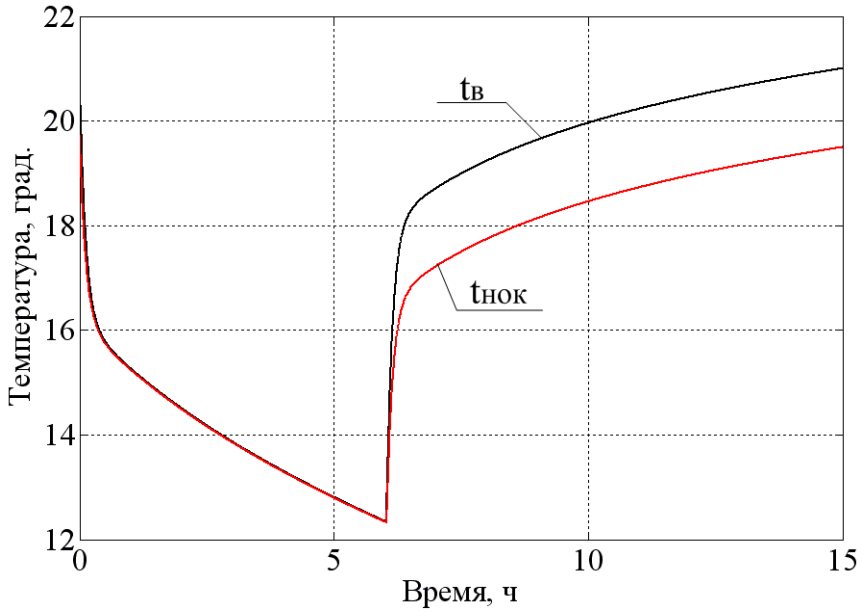


Рис. 3. Изменение температуры внутреннего воздуха $t_в$
и температуры внутренней поверхности наружного ограждения $t_{нок}$
при 2-ом режиме управления тепловой мощностью

Рис. 4. Характер изменение тепловой мощности при 2-ом режиме

В результате вычислений было получено, что расход теплоты во 2-ом режиме прерывистого отопления существенно ниже, чем в 1-ом, что подтверждает ранее полученный вывод об оптимальности режима прерывистого отопления на основе инженерной модели ТРЗ [1, 2].

С целью отыскания оптимального управления микроклиматом зданий, (по возможностям обеспечения требуемой температуры внутреннего воздуха, и количеству энергозатрат при этом) в разработанной программе были рассчитаны еще 3 различных тепловых режима.

3-ий режим аналогичен 2-ому режиму, только дополнительно температура внутреннего воздуха выходит на свою границу 12 °С. Вообще, вопрос о том выйдет ли система на ограничение по внутренней температуре зависит от длительности режима прерывистого отопления, теплотехнических свойств наружных ограждающих конструкций, а также от установленной мощности системы отопления здания. Рассмотрим следующий случай, когда здание имеет резерв тепловой мощности, то есть установленная мощность системы отопления составляет 4236 Вт. Рис. 5 и 6 иллюстрируют характер изменения внутренних температур и мощности системы отопления при 3 режиме управления. Из рис. 5 видно, что температура внутреннего воздуха после периода охлаждения опускается до минимально допустимого значения 12 °С и поддерживается на этом уровне некоторой мощностью системы отопления, а после осуществляется натоп здания. В конечный момент времени температуры внутреннего воздуха помещения равна начальному значению 21 °С. Рис. 6 показывает, что в первый период мощность системы отопления равна 0 Вт, в период поддержания температуры на минимально допустимом уровне мощность изменяется в диапазоне от 0 до 652 Вт, а в последнем периоде мощность максимальна 4236 Вт. Расход тепловой энергии за нерабочий период, составляет 20289,6 Вт*ч.

Появление промежуточного участка, где необходимо поддерживать минимально допустимую температуру, объясняется тем, что данная модель, описывающая тепловой режим здания достаточно точная. В математической модели ТРЗ, как системы с распределенными параметрами, было выполнено разделение инерционных характеристик наружных ограждающих конструкций и температуры внутреннего воздуха, а также реализовано ограничение по фазовой координате – по внутренней температуре.

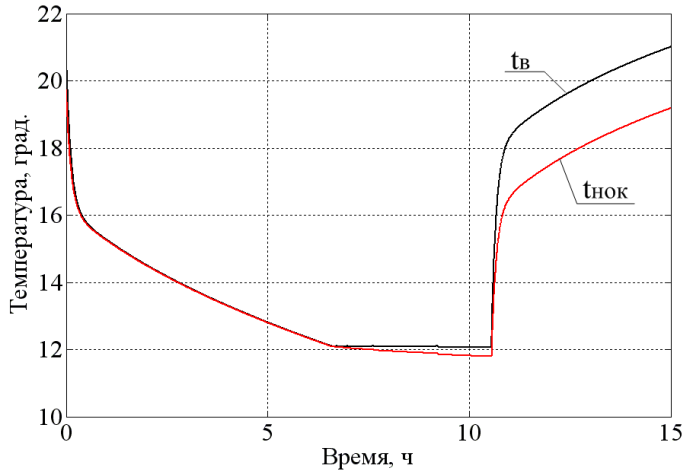


Рис. 5. Изменение температур внутреннего воздуха $t_в$ и внутренней поверхности наружного ограждения $t_{нок}$ в 3-ем режиме управления ТРЗ

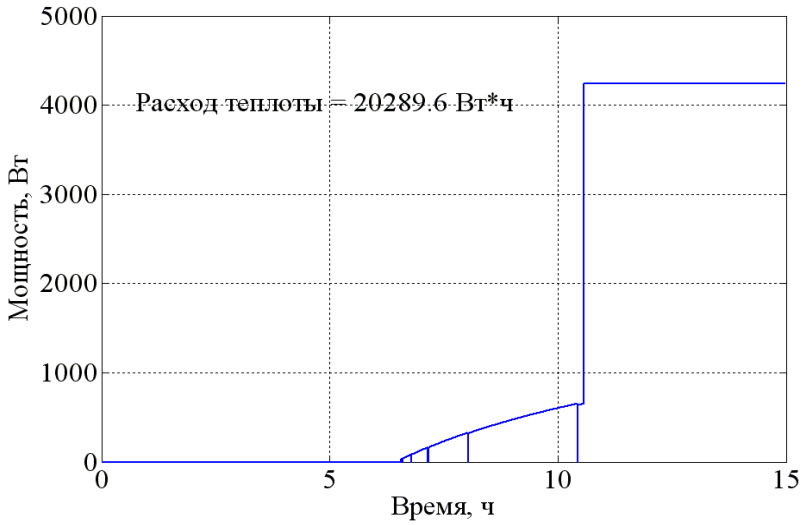


Рис. 6. Характер изменение тепловой мощности в 3-ем режиме

Далее был проанализирован 4-ый режим, когда температура внутри помещения поддерживается стабилизирующим регулятором на своем заданном значении, и им же определяется мощность системы отопления. При этом температура внутреннего воздуха поддерживается на уровне 21 °С, а мощность системы отопления изменяется в диапазоне от 2948 до 2900 Вт. В конечный момент времени температуры внутреннего воздуха помещения равна начальному значению 21 °С. Расход тепловой энергии за весь нерабочий период, составляет 43597,4 Вт*ч.

И, наконец, 5-ый режим, когда здание подключено к тепловым сетям и производится центральное регулирование отпуска теплоты на источнике, т.е. объект отапливается тепловой мощностью, рассчитанной на компенсацию тепловых потерь при текущей температуре наружного воздуха. Это наиболее распространенный вариант отопления зданий любого назначения в настоящее время. В нашем примере при наружной температуре минус 18 °С тепловая мощность составляет 3004 Вт. Расход тепловой энергии за весь нерабочий период, то есть 15 ч., составляет 45060 Вт*ч.

В результате расчетов и сравнения было установлено, что экономичным является режим, когда интенсивный разогрев здания осуществляется только на конечном участке нерабочего времени (режимы 2 и 3). Неэкономичным, оказался наиболее распространенный в настоящее время режим, когда здание подключено к центральным тепловым сетям и осуществляется регулирование отпуска теплоты только на источнике. Расход тепловой энергии и величина экономии для рассмотренных режимов приведены в таблице.

Кроме того, было установлено, что применение режима прерывистого отопления в зданиях, подключенных к центральным тепловым сетям, не дает существенной экономии тепловой энергии, так как нет резерва тепловой мощности для разогрева помещения, вся теплота, поступившая от тепловых сетей, расходуется на компенсацию текущих теплопотерь. Поэтому оптимальный режим прерывистого отопления рекомендуется осуществлять в зданиях имеющих автономный источник теплоты.

Таблица

Расход и экономия энергии при различных алгоритмах управления ТРЗ

Параметр	Название режима управления теплоснабжением здания			
	Оптимальный режим прерывистого отопления с выходом на ограничение по tв	Оптимальный режим прерывистого отопления	Режим со стабилизирующим регулятором tв	Режим при подключении здания к центральным тепловым сетям
Расход тепловой энергии, Вт·ч	20289,6	31159,2	43597,1	45060
Экономия, %	55	30,8	3,2	0

Выводы

1) разработано программное обеспечение в среде MatLab, позволяющее для любого объекта и различных условий смоделировать различные режимы управления мощностью системы отопления в нерабочий период с целью их качественного и количественного анализа;

2) подтверждена эффективность управления, найденного ранее на основе инженерной модели, установлено, что интенсивный натоп здания на конечном участке нерабочего времени экономит до 30–55 % теплоты;

3) доказана неэкономичность распространенного в настоящее время режима, когда здание подключено к центральным тепловым сетям,

4) установлено, что применение режима прерывистого отопления в зданиях, подключенных к центральным тепловым сетям, нецелесообразно.

Библиографический список

1. Программное обеспечение для расчета оптимального режима прерывистого отопления зданий. Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. трудов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. – № 1 (4). – С. 66–71.

2. Об оптимальном управлении отоплением зданий как процессом с распределенными параметрами. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2009. – Вып. 9. – № 3 (136). – С. 24–29.

3. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки зарегистрированное в Отраслевом фонде алгоритмов и программ (ОФАП). Программа для расчета оптимальных режимов прерывистого отопления зданий / Е.Ю. Анисимова. – № 50200800068 от 18.01.2008 г.

К содержанию

УДК 347.214.2 + 624.11

ПРОБЛЕМЫ ГОСУДАРСТВЕННОГО КАДАСТРОВОГО УЧЕТА ПОДЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ В РОССИИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Д.Ю. Аршакян

В результате анализа отечественной и зарубежной литературы, а также действующего земельного законодательства выявлены проблемы учета подземных объектов недвижимости. Предложены варианты кадастрового учета подземных объектов недвижимости в существующем двухмерном кадастре недвижимости и при переходе к ведению трехмерному кадастру недвижимости.

Ключевые слова: кадастр недвижимости; подземные объекты недвижимости; 3D-кадастр; структура кадастрового номера объекта недвижимости.

С необходимостью осваивать подземное пространство рано или поздно сталкивается каждый мегаполис. Строятся большие многофункциональные подземные комплексы различного назначения, транспортные и коммуникационные тоннели, подземные стоянки и гаражи, торговые, производственные и складские помещения и др. [1].

Согласно статье 130 Гражданского кодекса Российской Федерации к недвижимым вещам (недвижимое имущество, недвижимость) относятся земельные участки, участки недр и все, что прочно связано с землей, то есть объекты, перемещение которых без несоразмерного ущерба их назначению невозможно, в том числе здания, сооружения, объекты незавершенного строительства [2].

В России кадастровую деятельность в отношении недвижимого имущества регулирует Федеральный закон Российской Федерации от 24.07.2007 №221-ФЗ «О государственном кадастре недвижимости» (далее – Закон о кадастре). Положения Закона о кадастре применяются в отношении подземных сооружений, если иное не предусмотрено федеральным законом (часть 7 статьи 1 Закона о кадастре). Порядок государственного кадастрового учета объектов недвижимости установлен главой 3 Закона о кадастре. При этом Закон о кадастре не устанавливает особенностей осуществления государственного кадастрового учета земельных участков, занятых подземными сооружениями. Постановка на государственный кадастровый учет сооружения осуществляется на основании заявления о государственном кадастровом учете и технического плана сооружения (ч. 2 ст. 16, ч. 3 ст. 22 Закона о кадастре). Местоположение здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке устанавливается посредством определения координат характерных точек контура такого здания, сооружения или объекта незавершенного строительства на земельном участке (ч. 5 ст. 41 Закона о кадастре) [3].

Согласно пунктам 26, 27 Требований к подготовке технического плана сооружения, утвержденных приказом Минэкономразвития России от 23.11.2011 № 693 (далее – Требования), в технический план включаются координаты характерных точек контура сооружения, то есть точек изменения описания контура сооружения на земельном участке. В случае, если сооружение является подземным, контур такого сооружения на земельном участке определяется как совокупность контуров конструктивных элементов такого подземного сооружения, расположенных на поверхности земельного участка. Проекция подземных конструктивных элементов сооружения не является контуром сооружения. При этом проекция подземных конструктивных элементов на Чертеже (Схеме) отображается одним из способов, указанных в пункте 26 Требований, специальными условными знаками (приложение к Требованиям) [4].

В соответствии со статьей 7 Закона о кадастре площадь объекта недвижимости является уникальной характеристикой для таких объектов недвижимости, как земельный участок, здание или помещение. Таким образом, в государственный кадастр недвижимости не вносятся сведения о площади сооружений, в том числе подземных, а вносятся сведения о площади земельных участков, занятых такими помещениями.

Возникает вопрос, как осуществлять налогообложение с земельных участков, занятых подземными сооружениями, если их граница не отображается на кадастровой карте? Ведь фактическая проекция такой границы на земную поверхность может пересекать границу земельных участков на земной поверхности, а их площадь не вносится в реестр объектов недвижимости, как уникальная характеристика.

Государственный кадастр недвижимости является основным экономическим механизмом управления земельными ресурсами и имуществом муниципальных образований.

Принятый в нашей стране порядок кадастрового учёта основан на представлении сведений об объектах на плоской (двумерной) кадастровой карте, не допускающей взаимного перекрытия земельных участков и объектов недвижимости. В действительности же большое количество реальных объектов пересекаются в двумерной проекции на карту. К таким объектам относятся и подземные сооружения. Таким образом, возникает противоречие между нормами действующего законодательства и фактическим положением дел.

В ходе рассмотрения проблемы нами были проанализированы различные зарубежные кадастровые системы с точки зрения подхода к осуществлению кадастрового учета подземных объектов [8]. Как выяснилось, частично вопросы совместного использования земли и пространства над и под ней могут быть сняты с помощью сервитутов. Однако более современный подход заключается в переходе к учёту не плоских участков земли, а трёхмерных частей пространства, будь то на земле или под ней. Такой подход был назван 3D-кадастром [5].

В условиях интенсивного развития общества рациональное развитие территории, безусловно, связано с системой эффективного налогообложения. При сформировавшейся устойчивой системе нормативно-правовых актов, сегодня возникает достаточно большое количество вопросов, на которые сможет ответить только 3D-кадастр, в том числе и в отношении подземных сооружений. Все это обусловлено интенсивностью развития общества и предусматривает решение сложнейшей фискально-социальной задачи: необходимо сбалансировать интересы системы налогообложения и общие социальные задачи общества. Система 3D-кадастра раскрывает полноту пространственно-физических и юридических опций недвижимости. Ее главный ориентир – реализация новых процедур через преемственность предыдущих сформированных систем кадастра и регистрации. Для юридического закрепления в нашей стране концепции 3D-кадастра необходимо будет ввести понятия «права собственности в трёхмерном пространстве». Законодательство и гражданско-правовые отношения должны быть приведены в соответствие с возможностью обеспечения операций с 3-мерными правами. Концепция 3D-кадастра уже апробирована за рубежом и является реальной перспективой для России [5].

Создание трехмерного кадастра недвижимости в России должно привести к упорядочению регистрации прав и кадастрового учета подземных инженерно-технических сооружений и объектов инфраструктуры, с отображением в кадастровой базе данных их расположения, во взаимосвязи с земельными участками и связанными с ними другими объектами недвижимости.

Тем не менее, в настоящий момент времени ни в одной стране мира полноценно не функционирует 3D-кадастр, чаще всего они представлены гибридными формами – кадастр недвижимости ведется в привычном двухмерном измерении, а лишь отдельные объекты учитываются и отображаются как трехмерные.

На сегодняшний день переход от двухмерного кадастра к трехмерному в России, как и в других странах, является достаточно проблематичным в связи огромными финансовыми и временными затратами, ведь для этого необходимо будет пересмотреть всё действующее законодательство, создать трехмерные модели местности с расположенными на них объектами недвижимости.

В связи с вышеизложенным, необходимо найти альтернативные пути учета подземных объектов недвижимости, количество которых растет с каждым днем особенно в крупных городах. Таким путем может стать внесение в нормы действующего законодательства таких поправок, которые бы позволили учитывать подземные объекты в существующем двумерном кадастре в целях полноценной реализации прав на такие объекты, налогообложения и управления такими объектами недвижимости.

В Норвегии подземный участок идентифицируется так же как и участок на поверхности, только дополнительно прибавляется число 300 в конце кадастрового номера. Номер участка начинается с единицы. Это дает каждому подземному участку четкое определение местоположения и во взаимоотношении с собственностью на поверхности. Собственник имущества на поверхности должен быть согласным отказаться от своих прав на подземное пространство. Существующие подземные участки (подготовленные под застройку или с возведенными объектами) измеряются как в горизонтальной плоскости, так и в вертикальной, и идентифицируются как точные объемы. В подготавливаемых документах каждому углу присваиваются координаты, а также указываются высоты пола и потолка. Регистрационный номер и план идентифицируют участок, как объем, но в некоторых реестрах размеры участка даются в квадратных, а не в кубических метрах [7].

На кадастровой карте такой земельный участок изображается другим цветом, нежели объекты недвижимости, расположенные на земной поверхности. Поэтому пересечения границ на кадастровой карте легко объяснимы с первого взгляда [7].

Аналогичную систему учета подземных объектов недвижимости можно ввести и в России. Для этого, на наш взгляд, необходимо пересмотреть структуру кадастрового номера объектов недвижимости, в которую можно ввести дополнительную символику, указывающую расположение объекта недвижимости в подземном пространстве. Точно так же можно поступить и с объектами недвижимости, расположенными над поверхностью земли. Вариантом такого обозначения может стать добавление заглавной буквы «П» в конце кадастрового номера объекта недвижимости. Например, если действующая структура кадастрового номера объекта недвижимости имеет вид:

КО:КР:КК:КН [6], где

КО – номер кадастрового округа,

КР – номер кадастрового района,

КК – номер кадастрового квартала, где расположен объект недвижимости,

КН – кадастровый номер объекта недвижимости в данном кадастровом квартале,

то структура кадастрового номера будет выглядеть следующим образом: КО:КР:КК:КН:П.

При этом, подземным объектам недвижимости при осуществлении государственного кадастрового учета будут присваиваться последующие кадастровые номера в кадастровых кварталах, где они расположены.

Идентичное обозначение можно ввести и для объектов недвижимости, расположенных над уровнем земли, добавив в конце кадастрового номера заглавную букву «Н», и структура кадастрового номера надземного объекта недвижимости, будет выглядеть следующим образом: КО:КР:КК:КН:Н.

Также следует ввести определенные обозначения таких нестандартных объектов на кадастровой карте с помощью выделения их границ определенным цветом. Полные же сведения об этих объектах недвижимости будут отражены в реестре объектов недвижимости, где содержатся сведения государственного кадастра недвижимости в текстовом виде.

Таким образом, при анализе норм действующего законодательства относительно кадастрового учета подземных объектов недвижимости выявляются многочисленные противоречия и пробелы, которые не позволяют в полной мере осуществлять управление такими объектами недвижимости. Предложенная методика учета данных объектов недвижимости сделает их кадастровый учет простым, доступным для понимания, позволит полноценно реализовывать вещные права и осуществлять налогообложение до перехода к трехмерному кадастру недвижимости.

Библиографический список

1. Лагуткин, А.В. Объекты подземного строительства в России: проблемы признания права собственности / А.В Лагуткин, Л.Ю Грудцына // Образование и право. – 2013. – № 5 (45)–6 (46). – С. 8–16.

2. Гражданский кодекс Российской Федерации (часть первая). – URL: http://www.rg.ru/2008/03/24/gk1-dok.html.

3. Федеральный закон Российской Федерации от 24.07.2007 № 221-ФЗ «О государственном кадастре недвижимости». – URL: http://www.rg.ru/2007/08/01/kadastr-doc.html/.

4. Приказ Минэкономразвития России от 23.11.2011 № 693 «Об утверждении требований к подготовке технического плана сооружения». – URL: http://www.rg.ru/2012/02/17/sooruzhenie-dok.html.

5. Калачёва, Н.И. Применение 3-D кадастра современной составляющей в земельно-имущественных отношениях дорожного хозяйства / Н.И. Калачёва, В.Г. Филиппов // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2013. – № 1. – С. 67–69.

6. Приказ Минэкономразвития России от 04.04.2011 № 144 «Об утверждении Порядка кадастрового деления территории Российской Федерации и Порядка присвоения объектам недвижимости кадастровых номеров». – URL: http://www.rg.ru/2011/05/20/kadastr-dok.html.

7. Valstad, T. Developments of the 3D Cadastre in Norway. – URL: http://www.gdmc.nl/3DCadastre/literature/3Dcad_2006_03.pdf.

8. Stoter, J.E. 3D Cadastre. – Delft, the Netherlands – NCG, Netherlands Geodetic Commission. – 2004. – URL: http://www.itc.nl/library/papers_2004/phd/stoter.pdf.

К содержанию

УДК 69:001.8 + 378.662(510):001.8

НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ХАРБИНСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

А.Х. Байбурин

Изложен опыт организации научных исследований в области энергоэффективного строительства в Харбинском политехническом университете КНР, изученный в процессе стажировки автора на факультете гражданского строительства ХПУ с посещением исследовательских лабораторий и строительных объектов.

Ключевые слова: научные исследования, энергоэффективное лаборатория, строительство.

Стажировка по программе изучения опыта научных исследований в области энергоэффективного строительства проходила на факультете гражданского строительства Харбинского политехнического университета. На факультете шесть кафедр: стальных и деревянных конструкций, бетонных и каменных конструкций, геотехнического строительства, инженерной механики и строительства в океанах, предотвращения катастроф и строительства мостов, строительных материалов.

Научные исследования охватывают следующие направления: строительная механика; компьютерное моделирование в строительной механике; изучение сейсмических, ветровых, волновых и взрывных воздействий; исследования большепролетных конструкций; предупреждение и снижение последствий катастроф; системы мониторинга состояния инженерных систем и гражданских инфраструктур; предварительное напряжение конструкций; конструкционная огнестойкость; сейсмическое усиление конструкций; сталебетонные и трубобетонные конструкции; композитные материалы; строительство в холодных регионах.

Факультет имеет современное оборудование для научных исследований энергоэффективных и ресурсосберегающих материалов, конструкций и технологий. На факультете создан национальный инженерный исследовательский центр, имеются 4 ведущие лаборатории Министерства образования Китая, а также 6 специализированных лабораторий. Общая площадь лабораторий – 12 тыс. кв.м., стоимость оборудования – 120 млн CNY (примерно 600 млн руб.).

В состав ведущих лабораторий факультета входят: лаборатория строительства и эксплуатационного контроля; лаборатория материалов для гражданского строительства; центр испытаний деревянных конструкций; лаборатория испытания конструкций и сейсмических воздействий (рис.).

В лаборатории испытаний конструкций, построенной в 1986 году, располагается вертикальная силовая стенка и силовой пол, большие прессы, разрывные машины, позволяющие испытывать полноразмерные конструк-

ции на статические и динамические воздействия. Оборудование испытательной лаборатории ХПУ нельзя назвать уникальным, так как подобным оборудованием оснащены многие университеты в Китае.

Ведущая лаборатория испытания конструкций и сейсмических воздействий

В состав специализированных лабораторий факультета входят: лаборатория ветрового тоннеля (аэродинамической трубы); лаборатория интеллектуального мониторинга конструкций; лаборатория взрывных и ударных воздействий, оборудованная симуляторами взрывных воздействий и крупнейшим в Китае испытательным стендом ударных нагрузок; лаборатория геотехники и подземного строительства, имеющая в составе испытательный стенд объемного нагружения в условиях низкотемпературного замораживания и оттаивания; лаборатория испытаний конструкций на огнестойкость, оборудованная печью 3,3×4 м для огневых испытаний при температуре до 1200 °С.

Факультет обладает уникальным оборудованием, позволяющим моделировать комплексные воздействия ветра, дождя и волн, а также глубоководные морские условия. Установка предназначена для исследований зданий, спортивных сооружений, мостов, морских стационарных платформ и т.д. Характеристики испытательного ветрового тоннеля: габариты 88,6×23,3 м, скорость ветра 30–50 м/с, испытательные участки имеют габариты 4×3×25 м, 6×3,6×50 м, 10×5×22 м.

На факультете также имеется высокопроизводительный компьютерный центр с параллельной кластерной системой Dawning TC-4000L, 24 узла, 48 процессоров, с основной частотой 2,5 ГГц. Программное обеспечение: ANSYS, ABAQUS, FLUENT, ADINA, SAP2000 – позволяет создать математические и графические модели процессов.

В рамках международного сотрудничества совместные научные исследования проводятся с университетами США, Великобритании, Японии, Кореи, Австралии. Налажено сотрудничество с университетами Сиднея,

Оксфорда, Манчестера, Торонто, Онтарио, Милана, Киото, Токио, Сеула. Имеются совместные программы обучения с иностранными университетами: бакалавриат, аспирантура, двойная докторская степень. Такой обмен способствует проведению совместных научных исследований.

Во время стажировки в лабораториях факультета проводились испытания на изгиб комбинированной сталебетонной конструкции в виде тавровой балки, испытания железобетонной рамы на потерю одной из опор при чрезвычайном воздействии. Для испытаний на сейсмические воздействия подготавливался полноразмерный фрагмент железобетонной рамы, усиленной углепластиковым полотном. На оборудовании ветрового тоннеля испытывалась модель опоры моста на ветровые и волновые воздействия.

При разработке энергоэффективных зданий в Китае изучаются следующие аспекты проблемы [1–3]:

– требования к архитектурным, функционально-технологическим, конструктивным и инженерно-техническим решениям;

– требования к отдельным элементам и конструкциям зданий и к их эксплуатационным свойствам;

– требования к используемым в зданиях устройствам и технологиям, включая инженерные системы;

– требования к технологиям и материалам, позволяющим исключить нерациональный расход энергетических ресурсов как в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта, так и в процессе эксплуатации.

– требования по интеграции в энергетический баланс зданий нетрадиционных источников энергии и вторичных энергоресурсов;

– требования об ограничении удельного суммарного расхода первичной энергии по отношению к нормируемым показателям, характеризующим годовую удельную величину расхода энергетических ресурсов в здании.

Оптимальная архитектурная форма, правильная посадка здания и ориентация по ветру и солнцу, снижение показателя компактности здания позволяют снизить теплопотери. К конструктивным требованиям энергоэффективности относятся: замкнутый тепловой контур; исключение мостиков холода; теплосберегающие окна; термоинерционные стены и пол. Внешние регулируемые жалюзи для затенения не дают помещениям перегреваться в жаркие дни, а зимой позволяют солнечной энергии беспрепятственно проникать внутрь здания.

Энергоэффективные системы инженерного обеспечения и бытовая техника обеспечивают комфорт и дополнительно экономят энергию. Особое внимание уделяется вопросам рекуперации тепла из воздуха, поскольку при обычной естественной вентиляции происходят значительные потери тепла.

В результате стажировки был изучен опыт научных исследований одного из ведущих китайских университетов в областях проектирования и возведения энергоэффективных зданий, внедрения инновационных разработок в учебный процесс. Достигнутые в результате стажировки договоренности с факультетом гражданского строительства ХПУ об обмене студентами, аспирантами и докторантами, будут способствовать активной интеграции ЮУрГУ в международный образовательный и научно-исследовательский процесс по направлению проектирования и строительства энергоэффективных зданий.

Библиографический список

1. Файст, В. Основные положения по проектированию пассивных домов / В. Файст. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 144 с.
2. Габриель, И. Реконструкция зданий по стандартам энергоэффективного дома / И. Габриель, Х. Ладенер. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 470 с.
3. Бадьин, Г.М. Строительство и реконструкция малоэтажного энергоэффективного дома / Г.М. Бадьин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 432 с.

К содержанию

УДК 699.86

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ТЕПЛОЗАЩИТЫ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.Х. Байбурин, А.Е. Русанов

Статья посвящена анализу современных методов определения уровня теплозащиты наружных ограждающих конструкций. Показаны характерные особенности способов оценки уровня теплозащиты. Приведено сравнение двух подходов к определению приведенного сопротивления теплопередаче.

Согласно ГОСТ Р 51387-99 [1] повышение энергетической эффективности зданий может быть реализовано в результате: разработки проектов, предусматривающих возможно большее энергосбережение по сравнению с нормативными требованиями; повышение уровня качества строительно-монтажных работ; обязательный контроль реальных теплозащитных характеристик строящихся, эксплуатируемых и реконструируемых зданий.

Большинство современных ограждающих конструкций, в том числе и навесные фасадные системы с воздушным зазором, характеризуются теплотехнической неоднородностью, которая зависит как от конструктивных особенностей, так и от дефектов строительных работ.

Существующими в настоящее время методами исследования теплозащиты неоднородных ограждающих конструкций являются: теоретические исследования (замена физического процесса математической моделью) и экспериментальные исследования (измерение величин исследуемого физического процесса).

Для реализации теоретических исследований применяются аналитический метод и использование численных методов. Аналитический подход подразумевает решение уравнений, описывающих процесс теплопередачи. Используется в тех случаях, когда допускается пренебречь нестационарностью процессов теплообмена. Применим только к линейным уравнениям. Численные методы учитывают нестационарность и нелинейность изучаемых процессов в многомерных задачах, что приводит к усложнению математических моделей. При реализации численных методов определяются значения температур в узлах конечных элементов, на которые разбивается исследуемый объект. Для практической реализации численных методов в настоящее время существуют следующие программные продукты: Temper-3D, THERM, ELCUT и т.п. Анализ температурных полей численными методами имеет следующие преимущества: имитирование реальных условий процесса теплопередачи; высокая скорость расчета; малые трудозатраты.

Экспериментальные исследования уровня теплозащиты ограждающих конструкций предназначены для: количественной оценки фактических теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий; контроля соответствия требованиям строительных норм; фактического определения тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции. Экспериментальные исследования реализуются проведением лабораторных и натурных испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 26254-84 [2] ГОСТ Р 54853-2011 [3]. Использование тепловизионной техники необходимо для бесконтактного термографирования поверхности объекта с последующим качественным анализом температурного поля и определения границ изотермических поверхностей.

На применение указанных нормативных методик налагаются условия обеспечения достоверности результатов исследования:

1) обеспечение стационарных условий протекания процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях, то есть постоянство или слабое изменение температуры по обе стороны ограждающей конструкции в течении длительного промежутка времени;

2) обеспечение возможно большего значения температурного напора для минимизации погрешностей при последующем расчете приведенного сопротивления теплопередаче.

Условие стационарности может быть смоделировано только при проведении лабораторных испытаний фрагментов ограждающих конструкций в климатических камерах, поскольку в натурных условиях стационарный режим недостижим из-за суточных колебаний климатического фона.

Характерные особенности проведения лабораторных испытаний: требуют значительных затрат на приобретение оборудования; различие по качеству возведения и характеристик материалов и, следовательно, различие теплозащитных характеристик между исследуемым в лабораторных условиях фрагмента ограждающей конструкции и фрагментом, входящим в состав ограждающей конструкции реального объекта.

Для моделирования влияния различных теплопроводных включений и дефектов строительных работ рациональнее использовать численные методы решения с помощью компьютерного имитационного моделирования.

Не смотря на преимущества применения программных продуктов, в настоящее время отсутствует методика оценки достоверности получаемых с их помощью результатов.

Для проверки адекватности применения компьютерного имитационного моделирования для оценки влияния дефектов строительных работ на уровень теплозащиты наружных ограждающих конструкций были реализованы: лабораторные испытания влияния отдельных дефектов строительных работ при устройстве НФС на теплозащиту фрагмента конструкции; компьютерное моделирование влияния дефектов на теплозащиту имитационного фрагмента с использованием программы «ELCUT»; анализ результатов исследований.

Объектом лабораторного испытания являлся фрагмент многослойной ограждающей конструкции с устройством НФС. Размеры фрагмента: высота – 1275 мм., ширина – 1255 мм., толщина – 300 мм. Полезная площадь – 1 $м^2$. Значения коэффициентов теплопроводности используемых материалов определялись в условиях проведения испытаний. Моделирование влияния на теплозащитные свойства фрагмента рассмотрено на примере отдельных характерных дефектов строительных работ при устройстве НФС: отслоение плит утеплителя от основания, стык плит утеплителя, стык кронштейна для крепления направляющих с плитами утеплителя.

Методика проведения лабораторных испытаний включала в себя следующие этапы: установка фрагмента ограждающей конструкции с заданными характеристиками на границе «теплого» и «холодного» отсеков климатической камеры; установка предварительной температурной нагрузки на объект для регистрации температурного поля поверхности фрагмента; анализ термограммы с целью определения площадей изотермических участков; установка в изотермические зоны температурных датчиков и датчиков теплового потока; установка по обе стороны фрагмента необходимого температурного режима; регистрация значений исследуемых параметров; вычисление значения приведенного сопротивления теплопередаче.

Оценка влияния дефектов теплозащиты при моделировании процесса теплообмена в программе «ELCUT» осуществлялось в следующей последовательности: подготовка исходных данных; построение геометрической схемы; назначение теплофизических характеристик слоев конструкции; назначение граничных условий; формирование сетки конечных элементов; расчет температурного поля и мощности теплового потока; визуализация расчета; расчет приведенного сопротивления теплопередаче по полученным данным; сравнение вычисленного значения приведенного сопротивления теплопередаче фрагмента ограждающей конструкции с учетом влияния дефекта с приведенным сопротивлением теплопередаче аналогичного фрагмента, но без учета влияния дефекта.

Компьютерное моделирование фрагмента ограждающей конструкции осуществлялось при обязательном соблюдении следующих условий: геометрические размеры тождественны размерам фрагмента, исследуемого в лабораторном эксперименте; физико-технические характеристики принимаются аналогичными характеристикам исследуемого в лабораторном эксперименте фрагмента; граничные условия для моделируемого фрагмента принимаются аналогичными граничным условиям, при которых определялось приведенное сопротивление теплопередаче в проводимых лабораторных испытаниях.

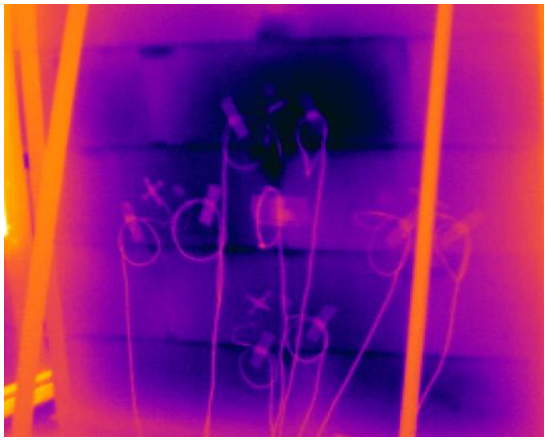
При реализации лабораторных испытаний и компьютерного моделирования в программе «ELCUT» влияния отдельных характерных дефектов строительных работ (рис.) были получены обобщенные результаты определения уровня теплозащиты 1 м^2 фрагмента наружной ограждающей конструкции (табл. 1).

Таблица 1

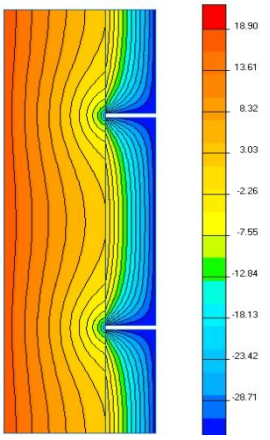
Обобщенные результаты при оценке влияния отдельных дефектов

Объект исследования	$R_o^{пр}{}_{эксп}$, (м^2·°С)/Вт	$R_o^{пр}{}_{ELCUT}$, (м^2·°С)/Вт	Расхождение, %
Фрагмент + отслоение плит утеплителя от основания (*t = 10 мм*)	1,56	1,58	1,3
Фрагмент + зазор в стыке плит утеплителя *(t = 10 мм)*	2,26	2,41	6,64
Фрагмент + зазор в стыке кронштейна с плитами утеплителя *(t = 15 мм)*	3,08	3,10	0,65

а)



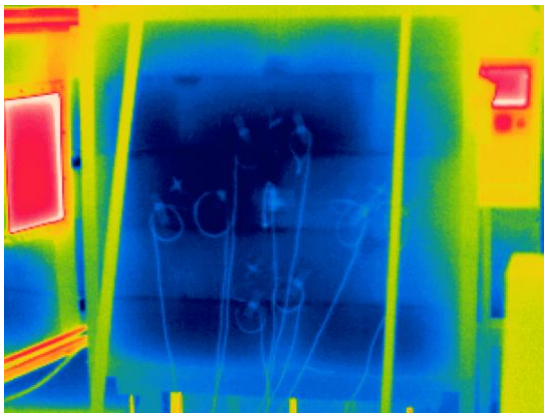
б)



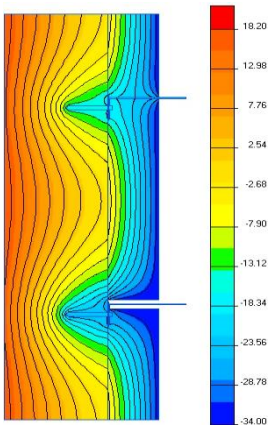
в)

1а)

а)



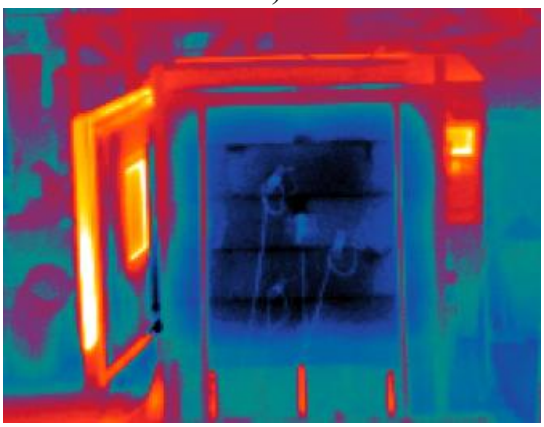
б)



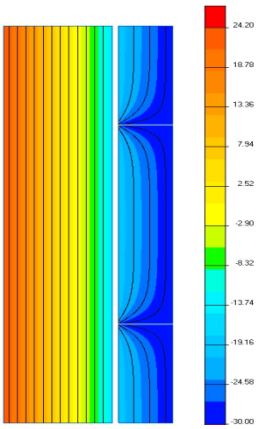
в)

1б)

а)



б)



в)

1в)

Дефекты устройства наружной теплоизоляции:
1а) зазор в стыке плит утеплителя; 1б) зазор в стыке плит утеплителя и кронштейна; 1в) отслоение плит утеплителя от основания;
а) фрагмент ограждающей конструкции; в) термограмма фрагмента;
г) температурное поле сечения фрагмента

Выводы

1) достоверное согласование результатов подтверждает адекватность оценки влияния дефектов на уровень теплозащиты с помощью компьютерного моделирования;

2) определено количественное влияние дефектов. Наиболее существенное влияние на величину приведенного сопротивления теплопередаче оказал отслоение плит утеплителя от основания (– 114,6 %); влияние зазора в стыке плит утеплителя составило (– 20,3 %); влияние зазора в стыке кронштейна с плитами утеплителя составило (– 3,0 %).

Библиографический список

1. ГОСТ Р 51387-99. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. – М.: Госстандарт РФ, 1999;

2. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введ. постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 02.08.1984 г. № 127. – М.: Изд-во стандартов, 1994;

3. ГОСТ Р 54853-2011. Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера. – М.: Стандартинформ, 2012.

К содержанию

УДК 744:621 + 004.92

ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАДАНИЙ КУРСА ИНЖЕНЕРНАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ГРАФИКА В ПРОГРАММЕ SOLIDWORKS

И.В. Буторина

Предлагается вариант практического курса «Инженерной и компьютерной графики», основанный на 3D-моделировании в программе SolidWorks.

Ключевые слова: инженерная графика, компьютерная графика, 3D-моделирование, оформление чертежа, чертёж детали, сборочный чертеж.

Целью курса «Инженерной и компьютерной графики» является освоение студентами основных знаний, связанных с процессом проектирования и документирования. Освоение современных программных средств для решения задач проектирования, конструкторско-технологической подготовки производства позволяет выпускникам быть конкурентно-способными на рынке труда.

Предлагаемый вариант курса рассчитан на 2 семестра обучения дисциплине с использованием программы SolidWorks.

В соответствии с требованиями ФГОС в результате обучения студент должен:

- знать структуру процесса проектирования;
- уметь разрабатывать и использовать техническую документацию;
- знать и использовать нормативные требования стандартов, связанные с конструкторской документацией;
- знать и использовать основные подходы к разработке компьютерных моделей проектируемого изделия и их реализацию в системе SolidWorks;

владеть:

- навыками выполнения проекционных чертежей и оформления конструкторской документации в соответствии с ЕСКД;
- навыками построения 3D-моделей и 2D-чертежа в программе SolidWorks;
- навыками выполнения эскизов.

При составлении предлагаемой программы курса использованы традиционные задания, ранее разработанные на кафедре. В ходе внедрения курса уточнены и скорректированы объёмы заданий и их порядок и количество, с учётом уровня подготовки студентов и специфики работы в SolidWorks.

Дисциплина преподаётся во II и III семестрах обучения студентам технических специальностей.

Графические задания, выполняемые во втором семестре:

1. «Проекционное черчение».
2. «Резьбовые соединения» (соединения болтом, винтом, шпилькой).
3. «Чертёж детали» (вал, зубчатое колесо, корпусная деталь).

В третьем семестре:

1. «Деталирование чертежа общего вида».
2. «Составление сборочного чертежа».

Исходные данные заданий и методические указания доступны на сайте кафедры http://www.grapham.susu.ac.ru и библиотеки ЮУрГУ.

При изучении предлагаемого курса инженерной графики студенты одновременно знакомятся с основами выполнения моделей и чертежей в программе SolidWorks и требованиями и правилами выполнения и оформления чертежей согласно ГОСТ ЕСКД. Предусмотрено так же выполнение эскизов от руки (карандаш, бумага).

Освоение курса начинается с задания «Проекционное черчение» [1]. В ходе выполнения задания на примере построения геометрически простых моделей наглядно и логично раскрываются основные принципы работы в SolidWorks: от эскиза – к трёхмерной модели, от 3D-модели – к 2D-чертежу. После краткого знакомства с интерфейсом программы SolidWorks и основными его командами студенты приступают к выполнению первой модели

задания. Анализируют форму создаваемой детали по чертежу, определяют контуры исходных эскизов для построения, начинают моделирование. Постепенно осваивают команды и основные приёмы построения эскиза и объёмных моделей на их основе по принципу от простого – к сложному.

Учатся:

- читать чертежи;
- использовать и создавать плоскости эскизов;
- вычерчивать простые контуры – команды рисования эскизов;
- создавать составные контуры – команды редактирования эскизов (обрежь, удлини, сопряжение, фаска);
- использовать при построении взаимосвязи, привязки и трассировки;
- создавать простые модели вытягиванием контуров;
- создавать «сложные» модели – команды редактирования элементов (зеркало, массив и т.п.);
- пользоваться деревом конструирования (выбирать и редактировать эскизы, элементы, плоскости эскизов, менять порядок действий);
- различать и рационально размещать исходные точки эскиза и модели.

От построения 3D моделей студенты переходят к созданию ассоциативных чертежей. Учатся:

- получать заданные изображения;
- проставлять размеры на чертеже, основываясь на геометрии деталей;
- оформлять чертежи в соответствии с требованиями ГОСТ ЕСКД;
- распечатывать чертежи;
- выполнить визуализацию проекта.

Простота получения необходимых изображений в SolidWorks и возможность переноса размеров в чертёж с эскизов модели позволяет уделить достаточное время, знакомству с требованиями и правилами выполнения и оформления чертежей согласно ГОСТ ЕСКД. Настройка параметров чертежа в программе является своеобразным тестом на их знание.

При выполнении задания «Резьбовые соединения» [2] продолжается знакомство с принципами работы в SolidWorks:

- студенты учатся собирать 3D-модели узла на основе создаваемых деталей, назначать взаимосвязи деталей в сборке;
- учатся пользоваться библиотекой стандартных изделий SolidWorks;
- учатся создавать чертежи на основе собранных узлов.

Одновременно с освоением приёмов работы в SolidWorks:

- изучают резьбы и резьбовые изделия [2] и способы их создания на 3D-моделях;
- знакомятся со справочной литературой на крепежные изделия;
- знакомятся с составлением и оформлением сборочных чертежей и спецификаций согласно ГОСТ ЕСКД.

В результате выполнения двух заданий студенты получают представление о принципах и подходах работы в SolidWorks (программах САПР среднего уровня) и получают начальные навыки работы в программе.

В завершении семестра выполняется задание «Чертёж детали» [2]. Исходными данными для задания служат реальные детали – вал, зубчатое колесо, корпусная деталь.

Студенты учатся:

- выполнять эскизы деталей с натуры вручную (карандаш);
- проставлять размеры с учётом технологии изготовления деталей;
- строить электронные модели, применяя команды вращения и построения по сечениям.

В завершение всех заданий студенты представляют распечатки полученных чертежей. С учётом разного уровня подготовки и разных способностей студентов количество электронных чертежей при выполнении заданий может варьироваться.

Т. о., в течение семестра студенты осваивают основные приёмы работы в SolidWorks и основные правила выполнения и оформления чертежей согласно ГОСТ ЕСКД.

При выполнении заданий третьего семестра студенты используют материал, наработанный во втором семестре, закрепляя, совершенствуя и демонстрируя полученные знания, умения и навыки работы в SolidWorks.

Основное внимание при выполнении задания «Деталирование» [3] уделяется получению навыков чтения чертежей и особенностям выполнения и оформления чертежей различных деталей.

Задание «Составление сборочного чертежа» [3] логически завершает изучение всего курса. На основе рабочих чертежей деталей узла [4] студенты выполняют 3-D модели. В каждом варианте задания 15–20 деталей различного уровня сложности. Затем, по описанию и наглядному изображению узла, создаётся объемная сборка, позволяющая представить его форму и проконтролировать правильность выполнения деталей. Параллельно создаётся и оформляется сборочный чертеж узла на основе 3D-модели. В завершении создаётся спецификация.

Опыт изучения курса инженерной и компьютерной графики на примере работы в программе SolidWorks в течение двух семестров показывает что:

- студенты разных уровней подготовки успешно осваивают приёмы работы в одной из наиболее распространённых программ САПР среднего уровня;
- освоение нормативных требований стандартов, связанные с конструкторской документацией и изучение структуры процесса проектирования эффективно сочетается с освоением работы в SolidWorks;
- составленная программа курса позволяет обеспечить сочетание ручного и компьютерного черчения.

Библиографический список

1. Логиновский, А.Н. Проекционное черчение: учеб. пособие / А.Н. Логиновский, Л.И. Хмарова, Т.В. Бойцова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 85 с. – URL: http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000430382&dtype=F&etype=.pdf.

2. Резьбы, крепежные резьбовые изделия, разъемные и неразъемные соединения деталей, зубчатые передачи: учеб. пособие / Н.П. Сенигов, В.А. Пилатова, А.Л. Решетов, В. А. Краснов; под ред. А. М. Швайгера.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 99 с. – URL: http://www.grapham.susu.ac.ru.

3. Решетов, А.Л. Техническое черчение: учеб. пособие / А.Л. Решетов, Т.П. Жуйкова, Т.Н. Скоцкая; под ред. В.А. Краснова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 138 с. – URL: http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_METHOD&key=000410464.

4. Дукмасова, В.С. Альбом заданий для выполнения сборочных чертежей: учеб. пособие / В.С. Дукмасова, В.Н. Кочетков, В.А. Краснов; под ред. В.С. Дукмасовой. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 108 с. – URL: http://www.grapham.susu.ac.ru.

К содержанию

УДК 628.1 + 628.2

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И КАНАЛИЗАЦИИ АЭРОДРОМА г. ШАРДЖА (ОАЭ)

В.И. Васильев, Т.В. Басманова

Изложено описание особенностей проекта систем водоснабжения и канализации аэродрома в г. Шарджа (ОАЭ) с использованием новых строительных материалов с применением современных технологий реконструкции коммуникаций бестраншейным методом. Для возможности сокращения энергозатрат и ресурсосбережения в проекте применены устройства по использованию энергии солнца и ветра, а также вторичное использование воды для орошения прилегающих зеленых насаждений и для обеспечения противопожарного запаса.

Ключевые слова: аэродром, системы водоснабжения и канализации, новейшие технологии, солнечная батарея, ветроэнергетическая установка, энергосбережение.

Объединенные Арабские Эмираты (ОАЭ) расположены в юго-восточной части Аравийского полуострова, между 22,5 и 26 градусами северной широты и между 51 и 56,25 градусами восточной долготы. Шарджа является третьим по величине эмиратом ОАЭ. Ее площадь составляет 2590 км^2. Шарджа имеет общие границы со всеми эмиратами, входящими в

состав государства. ОАЭ имеют субтропический, засушливый климат. Зимой температура воздуха около 26 градусов, летом поднимается до 45. Уровень годовой нормы осадков приблизительно 13 см. Относительная влажность воздуха в среднем 50–60 процентов, а в летний период может достигать 90 процентов. Количество солнечных дней в году 355. Средняя скорость ветра, записанная в Международном аэропорту Дубая, в период с 1984–2008 гг. была 30м в секунду, что эквивалентно 108 км в час. А также имеют места быть порывы ветра со скоростью 45 м в секунду в течение 3 секунд, что эквивалентно 160 км в час. 1–2 раза в год случаются сильные ураганы.

Основной задачей данного проекта является реконструкция водопроводно-канализационных систем аэродрома. Целесообразность замены старого стального водопровода d=89 мм и протяженностью 2 км на новый полимерный водопровод d=110мм обусловлена высокой степенью его износа. Срок его эксплуатации к 2013 г. составлял 28 лет. За эти годы около аэродрома были заложены две крупных автомагистрали, а территория вокруг зоны аэродрома была искусственно озеленена и облагорожена архитектурно-скульптурными композициями [1]. Традиционная практика монтажных работ, которая велась открытым способом, влекла за собой последующее восстановление поврежденных участков инфраструктуры, нарушение работы автомагистралей и большие материальные затраты. Наш проект предлагает альтернативу этому устаревшему способу – бестраншейную технологию монтажа водопроводных сетей. Современная мировая практика показала высокую эффективность этого метода. Он основан на разрушении существующей дефектной трубы и замене ее новой с большим диаметром. Этот метод реализуется с помощью специального оборудования – пневмопробойника, компрессора, гидравлической лебедки, сварочной машины, полиэтиленовых труб, патрубков и муфт. Пневмопробойник – это пневматическая машина ударного действия, предназначенная для проходки скважин в грунтах различных категорий, разрушения стальных водопроводов и протягивания новых труб. Впомогательным устройством является лебедка, соединённая тросом с пневмопробойником. Предназначение лебедки состоит в организации направленного движения пневмопробойника и в ослаблении усилий при взламывании стальной трубы и вдавливании ее в окружающий грунт.

Также при замене стального трубопровода на полимерный необходима установка устройства для доочистки транспортируемой воды, т.к. ее забор производится из стального, незащищенного изнутри, водопровода городского водоснабжения, в котором она повторно загрязняется. Предлагается установить после водозаборного узла станцию водоподготовки [2, 3]. С учетом анализа воды, а также технико-экономических показателей нами была выбрана автоматическая система мембранной фильтрации (метод об-

ратного осмоса), отечественным аналогом которой, является установка «АСТРА-ФЕРРУМ» (ОАО «КОНВЕРСИЯ»). Выбор установки обусловлен автоматической работой, исключающей необходимость обслуживающего персонала, и отсутствием реагентного хозяйства.

В связи с климатическими условиями ОАЭ городским водоснабжением не предусматривается централизованное приготовление горячей воды. В проекте запланировано местное приготовление горячей воды в таких пунктах, где это действительно необходимо (комната матери и ребенка, кабинет врача, гостиничный комплекс). Предусматриваются водонагревательные аппараты с накопительным баком, а также установка термоконтроллеров в системе, обеспечивающей подачу горячей воды в комнату матери и ребенка.

Система водоотведения, существовавшая в старом здании аэродрома, нуждается в модернизации и реконструкции. Слив сточных вод производился в канализационную сеть города посредством трубопровода протяженностью 2,7 км. В настоящем проекте предложено использовать автоматическую станцию очистки сточных вод ЯН ТОПОЛ (Чехия) [4]. Принцип работы этого сооружения основан на водоочищающей способности активного ила во взвешенном состоянии, фильтрующей способности песка и дезинфицирующим действием УФ-излучения. Очистное сооружение непрерывно автоматически регулирует процесс работы в зависимости от объема поступающих вод. Если компьютер в установленном часовом интервале не зарегистрирует приток стоков, то очистное сооружение переключится в экономный режим, что снижает потребление энергии. Информация об авариях или поломках передается компьютером в сервисный центр.

Воду, прошедшую очистку на установке ЯН ТОПОЛ, предлагается использовать:

а) для орошения прилегающей к аэродрому озелененной территории (как того требуют правила, установленные в ОАЭ);

б) для обеспечения противопожарного запаса, необходимого для тушения пожаров по специальному противопожарному водопроводу.

Вторичное использование воды в данном проекте обуславливает явное экологическое и экономическое преимущество перед прежде существовавшей системой водоотведения, т.к. прежде на эти нужды использовалась вода хозяйственно-бытового назначения.

Решение проблемы энергообеспечения данного объекта видится нам в использовании энергии солнца и ветра.

Солнечная батарея является источником электрического тока посредством фотоэлектрических преобразователей. В настоящее время широко используются полупроводниковые фотоэлектрические преобразователи на основе кремния. Модули солнечных батарей TSM-210C-12 [5] конструктивно реализуются в виде монолитного ламината спаянных монокристали-

ческих элементов. Каркасная солнечная батарея выполнена в виде панели, заключенной в каркас из алюминевого профиля. Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, состоящий из стеклянной плиты с заламинированными на ней элементами. Предполагается покрыть всю площадь кровли здания панелями солнечных батарей.

Солнечная энергосистема состоит из следующих элементов:

а) солнечный контроллер – это пульт управления энергетической системой, предотвращающий перегрузку системы или обратный ток в ночное время;

б) инвентор – преобразователь постоянного электрического тока в переменный напряжением не менее 220 В;

в) электро-аккумуляторы – устройства сохранения энергии.

Выбранная нами модель ФСМ-220 соответствует подходящим техническим характеристикам: мощность 220 Вт; напряжение 63 В; ток 6,05 А; размеры 1650х990х35 мм; вес 22 кг; срок службы 25 лет; КПД 14 %; термостойкость до +50 град.

На крыше здания аэродрома намечено установить около 300 батарей TSM-210C-12, которые смогут обеспечить 50 % электроэнергии здания аэродрома и вспомогательных служб.

Наряду с солнечными батареями предполагается установка ветрогенераторов – устройств преобразования кинетической энергии ветра в электрическую. Генератор на редкоземельных магнитах неодим-железо-бор на 50 % изготовлен из стеклопластика, что снижает его вес.

Основная комплектация ветрогенератора [5, 6]:

а) ветроэнергетическая установка;

б) блок обработки электроэнергии (контролер);

в) инвентор;

г) аккумуляторы.

Для покрытия потребности в электроэнергии комплекса аэродрома выбраны две ветроустановки De Wind GmdH (Германия) [6].

Высота стальной башни 68м, скорость вращения ротора 13,2–24,5 об/мин, выработка электроэнергии 3161 кВтч/год каждая, удельная стоимость установленной мощности 950 euro/кВт.

Разместить эти ветроустановки предполагается на равнинной площадке на юго-западном участке аэродрома.

Библиографический список

1. Ильин, Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

2. Орлов, В.А. Строительство, ремонт и реконструкция подземных инженерных сетей / В.А. Орлов // Водоснабжение, водоотведение, оборудование и технологии: справочник. – М: Стройнформ, 2007. – 456 с.

3. Соколов, Л.И. Ресурсосберегающие технологии в системах водного хозяйства промышленных предприятий / Л.И. Соколов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 1997. – 218 с.

4. Топол, Я. Перспективы применения установок биологической очистки сточных вод компании TOPOL WATER в Уральском регионе / Я. Топол, С.Е. Денисов, В.С. Сперанский, В.И. Васильев, С.Г. Ницкая // Изменение климата и экология промышленного города. Материалы IV Международного форума. 13–15 ноября 2013. – Челябинск, 2013. – С. 80–82.

5. Кошкаров, А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции / А.П. Кошкаров. – М.: ДМК, 2012.

6. Безруких, П.П. Ветроэнергетика (справочное и методическое пособие) / П.П. Безруких. – М.: ИД «Энергия», 2010. – 320 с.

К содержанию

УДК 628.112

УТИЛИЗАЦИЯ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ЗАСТРОЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В.И. Васильев, К.И. Чучелов, Н.Е. Кутузова

Устойчивый подъем уровня подземных вод и неглубокое залегание их от поверхности земли про строительстве позволяет использовать дренажную воду вместо хозяйственно-питьевой для различных нужд: для полива проездов и зеленых насаждений, промводоснабжения и пожаротушения зданий на застроенной территории.

Ключевые слова: подземные воды, использование подземных вод для полива зеленых насаждений, наружного пожаротушения, промводоснабжения, водопонижение.

При строительстве и эксплуатации жилых районов и промышленных предприятий происходит устойчивый подъем уровня подземных вод. При этом обычно наблюдается подтопление подземных сооружений и коммуникаций, а часто также и снижение несущей способности грунтов оснований, что приводит к деформациям фундаментов, а иногда и авариям зданий и сооружений. Установлено, что подтопление жилых и промышленных территорий происходит в результате совокупности временно и постоянно действующих факторов [1].

В процессе строительства происходит обводнение неспланированных территорий от дождевых и талых вод, которые скапливаются в пониженных местах рельефа, в котлованах, траншеях, а также от утечки воды из водонесущих сетей водоснабжения, канализации, теплоснабжения.

Из числа постоянно действующих факторов подтопления являются утечки из коммуникаций и конденсация влаги под зданиями и покрытиями дорог и площадей. Для оценки процесса подтопления, динамики его развития и выбора необходимых мероприятий по борьбе с ним во ВНИИ ВОДГЕО разработаны специальные рекомендации [1].

Задачей нашей работы является разработка методов утилизации дренажных вод с целью экономии и рационального использования воды в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения различных объектов.

Так, в 2011 году был разработан проект водопонижения площадки Челябинского электровозоремонтного завода (ЧЭРЗ) путем устройства дренажа, выполненного методом горизонтально направленного бурения. Здесь собранные в водосборном колодце грунтовые воды очищаются на компактной водоочистной установке и подаются для подпитки 18 оборотных систем водоснабжения этого завода. Стоимость строительно-монтажных работ составляет 6 млн руб. Срок окупаемости – 5,2 года [2, 3].

В другом проекте [4] дренажные воды и поверхностный сток с территории торгово-развлекательного комплекса после очистки предусмотрено использовать для наружного пожаротушения и поливки проездов и зеленых насаждений. Излишки воды после соответствующей очистки сбрасываются в р. Миасс. Это будут первые для города сооружения для очистки ливневых стоков, сбрасываемых в водоем рыбохозяйственного назначения.

В проекте системы водоснабжения одного микрорайона на северо-западе г. Челябинска, выполненного в 2013 году, разработана система автополивки зеленых насаждений и проездов с забором воды из подземного водоисточника. В качестве двух водоприемников использованы две переоборудованные перекачные насосные станции САРЛИН. Для этого в нижней части стеклопластиковых емкостей просверлены отверстия для приема грунтовых вод. С помощью погружных насосов вода подается в оросительную сеть трубопроводов, уложенных на глубине 0,5 м от поверхности земли и снабженную дождевальными среднеструйными насадками. Система функционирует в автоматическом режиме рано утром в течение 1–1,5 часов.

Технико-экономичекие расчеты показывают, что устройство такой системы автополива в сравнении с обычным поливочным водопроводом из хозяйственнно-питьевой сети позволяет сэкономить 590647 рублей в год. Срок окупаемости инвестиций на устройство такой системы составляет 41 месяц.

Таким образом, реализация такого подхода к использованию подземных вод позволяет сэкономить средства на благоустройство жилой среды, экономить питьевую воду, и улучшить качество жизни горожан.

Библиографический список

1. Рекомендации по проектированию и расчетам защитных сооружений и устройств от подтопления промышленных площадок фунтовыми водами. – М: ВНИИ ВОДГЕО, ПНИИИС, 1989. – 327 с.

2. Васильев, В.И. Водопонижение площадки завода современным методом / В.И. Васильев, Т.А. Вилкова // Вопросы планировки и застройки городов. Материалы XVIII международной научно-технической конференции 26–27 мая 2011 года г. Пенза. – 2001. – С. 192–196.

3. Васильев, В.И. Водопонижение территории завода / В.И. Васильев, Т.А. Вилкова // Материалы II международной научно-технической конференции в г. Уфе в ноябре 2011 года. – 2011. – С. 26–28.

4. Кутузова, Н.Е. Проект очистки и использования дренажных вод и поверхностного стока с территории ТРК «Родник» / Н.Е. Кутузова, В.И. Васильев // Вестник УГТУ-УПИ. Серия «Строительство и образование». – 2012. – Вып. 13. – С. 169–171.

К содержанию

УДК 666.973.6 + 691.327.333

СОВРЕМЕННЫЕ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПЕНОБЕТОНОВ

А.А. Гайфуллина, Л.Я. Крамар

В статье приведен сравнительный анализ пенообразователей для пенобетонов на основе магнезиального вяжущего. Показана эффективность белковых пенообразователей и их перспективность для применения в магнезиальных ячеистых бетонах.

Ключевые слова: магнезиальный пенобетон; пенообразователи.

Живя в России, где отопительный сезон длится семь месяцев и морозы порой за окном бывают до –40 ºС, каждый из нас хотя бы раз задумывался как же сделать дом (квартиру), офис, склад и т.д., по настоящему теплым. Тепла можно добиться двумя способами: во-первых, высоким расходом энергоресурсов, во-вторых, утеплением дома.

Заметим сразу: снизить теплопотери дома до нуля – из области фантастики, но добиться значительного сокращения обогрева улицы не только можно, но и нужно.

Все теплоизоляционные материалы, помимо низкой теплопроводности, должны удовлетворять следующим жестким условиям:

– соответствовать требованиям пожарной безопасности и не должны быть токсичными при высоких температурах;

– быть безопасными для здоровья;

– быть долговечными.

Одним из таких энергосберегающих и экологически выгодными строительных материалов являются ячеистые бетоны, структура которых характеризуется наличием значительного количества (до 85 % объема бетона) искусственно созданных замкнутых пор (ячеек) размером 0,5–2 мм. Различают два основных вида ячеистых бетонов: пенобетон и газобетон, которые различаются по способу получения пористости. В первом случае пористость создается путем прямого введения в растворную часть пены, а во втором – газообразующей добавки.

По данным исследований рынка, большинство строительных предприятий, использующих ячеистые бетоны на цементном вяжущем автоклавного твердения. Это обусловлено несколькими причинами: газобетон и пенобетон автоклавного твердения имеют два преимущества он более прочный и у него меньше усадочные деформации.

Широкое распространение получило производство автоклавного пенобетона, в основном развито производство пенобетона на портландцементе. Бетон, твердеющий в нормальных условиях на цементном вяжущем отличается большими усадками, что может привести к разрушениям, особенно бетонов с низкой плотностью. Во времена Советского Союза, после нескольких аварий пенобетоны нормального твердения на портландцементе были запрещены и в настоящее время наиболее надежными являются заводские изделия автоклавного твердения, получаемые на основе портландцемента.

Одним из путей, позволяющих перейти на производство пенобетонов при нормальных условиях твердения, является частичный переход на магнезиальное вяжущее (цемент Сореля).

Для создания магнезиального пенобетона необходимо установить основные требования, которым должны отвечать бетонная смесь и будущий ячеистый бетон (табл. 1).

Таблица 1

Требования ГОСТов к конструкционно-теплоизоляционным газобетонам

Физико-механические свойства	ГОСТ 31359-2007 Автоклавный бетон	ГОСТ 25485-89 Неавтоклавный бетон
Средняя плотность	D 400…D 700	D 600…D 900
Класс по прочности при сжатии	Не ниже В 1,5	В 1…В 5
Морозостойкость	F 15…F 100	F 15…F 75
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,096…0,17	на песке 0,12…0,24
Коэффициент паропроницаемости, мг/(м·ч·Па)	0,23…0,15	на песке 0,20…0,12
Усадки при высыхании, мм/м	на песке 0,5	3,0
Отпускная влажность, %	–	25…35

По оценке специалистов, себестоимость изделий автоклавного пенобетона в 1,5–2 раза выше, чем бетона нормального твердения.

В отличие от ячеистых бетонов на цементных и цементно-известковых вяжущих, производство изделий на магнезиальных вяжущих связано с меньшим энерго- и трудозатратами, что делает его конкурентоспособным и дает возможность расширить ассортимента специальных материалов на строительном рынке.

Целью является получения магнезиального пенобетона различной плотности и прочности, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к ячеистым бетонам конструкционно-теплоизоляционного назначения.

Первой составляющей магнезиального пенобетона является магнезиальное вяжущее, которое благодаря своим положительным свойствам, таким как быстрый набор прочности, биостойкость, экологичность, беспыльность, низкая истираемость, безыскристность, низкая пожароопасность и др., находит все большее применение для производства различных строительных материалов, к которым относятся тяжелые бетоны для полов, стекломагниевые листы, фибролитовые, ксилолитовые плиты и особый интерес представляют ячеистые бетоны, для производства которых технологии еще не разработаны [2].

В табл. 2 сведены основные технологические свойства магнезиального вяжущего строительного назначения.

Второй составляющей цемента Сореля является затворитель. В качестве затворителей для магнезиального вяжущего в основном используют хлорид или сульфат магния. На сегодняшний день наиболее эффективным является водный раствор хлорида магния [1].

При производстве пенобетона на ПЦ многие производители сталкиваются с чередой проблем, которые кажутся неразрешимыми. Приведем самые распространенные:

1) медленный набор прочности;

2) проседание пенобетонной массы;

3) несоответствие продукции ГОСТу (низкая прочность).

Для практического применения (из того, что присутствует на рынке) пенообразователи деляться на два вида – синтетические и белковые. Рассмотрим основные свойства этих пенообразователей при работе с ПЦ:

1. Синтетические

– увеличивает срок схватывания и твердение пенобетонной массы;

– снижают прочность пенобетона;

– понижают стойкость пенобетонной массы и устойчивость к различным ускорителям;

– практически невозможно получать пенобетоны низкой плотности.

2. Белковые

– не влияет на увеличение срока схватывания и твердения пенобетонной массы;

– не снижает прочность пенобетона;

– создают устойчивую пену;

– получают пенобетоны плотностью от 300.

Таблица 2

Свойства магнезиального вяжущего строительного назначения

Требования	Норма
Массовая доля (на абсолютно сухое вещество), %	
MgO, не менее	75
CaO, не более	4,5
SiO, не более	3,5
Потеря массы при прокаливании, % не более	18
Массовая доля влаги, % не более	1,5
Проход через сито №002, %	100
Насыпная плотность, г/см^3	1,15…1,3
Тонкость помола по остаткам на ситах, не более, % На сите 0,2 мм	 5
На сите 0,08 мм	15
Сроки схватывания Начало, не ранее, минут	 30
Конец, не позднее, часов	8
Равномерное изменение объема Образцы из теста нормальной густоты не должны разрушаться и иметь радиальные или сетчатые трещины после 1 суток твердения на воздухе и 1 суток нахождения в воде	
Прочность при сжатии, МПа, не менее 1 сутки 28 сутки	 20…35 50…70

Таким образом, большинство показателей белковых пенообразователей превосходят синтетические. Вследствие этого возникла необходимость проверить действие пенообразователей на свойства магнезиального вяжущего.

Для приготовления смесей для ячеистого бетона был использован магнезиальное вяжущее ПМК-75 («Комбинат «Магнезит», г. Сатка) соответствующий ГОСТ 1216-87 и разработанным на кафедре «Строительные материалы» ТУ 5745-004-70828456-2005 со следующими основными свойствами [3], синтетический пенообразователь ПБ-2010, Ареком-4 и белковый Addiment SB3, GreenFroth.

Дозировка пенообразователей составляла 0,5; 0,6; 0,7 % от массы вяжущего в пересчете на сухое вещество.

В качестве затворителя использовался водный раствор хлорид магния $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, соответствующий ГОСТ 7759-73 и ТУ – 2152-005-53561075-03 плотностью 1,2 г/см^3.

Для исследований физико-механических свойств сырьевых материалов, магнезиального камня и магнезиального пенобетона использовали стандартные методики табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические методы испытаний

Вид испытаний	Метод испытаний
Магнезиальный камень	
Сроки схватывания магнезиального вяжущего	ГОСТ 310.3-92
Магнезиальный пенобетон	
Прочность при сжатии	ГОСТ 18105-86 (92)

Целью работы является изучение влияние пенообразователей различной химической природы на сроки схватывания магнезиального теста. Результаты исследований приведены в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость сроков схватывания каустического магнезита от концентрации пенообразователей

Пенообразователь	Концентрация ПО, %	Нач. схватывания, мин	Кон. схватывания, мин	Прочность при сжатии, МПа, 1 сутки
Контрольный состав	–	35	68	17,2
ПБ-2010	0,5	35	70	0,24
	0,6	35	68	0,28
	0,7	38	72	0,31
Ареком-4	0,5	35	69	0,23
	0,6	37	72	0,26
	0,7	39	78	0,29
Addiment SB3	0,5	36	68	0,32
	0,6	37	69	0,37
	0,7	37	69	0,43
GreenFroth	0,5	36	69	0,37
	0,6	36	68	0,35
	0,7	36	68	0,45

Согласно приведенным результатам, синтетические пенообразователи ПБ-2010 и Ареком-4 в минимальных размерах увеличивают сроки схватывания, в то время как биологические Addiment SB3, GreenFroth практически не влияют на сроки схватывания магнезиального теста в первые сутки, а также на набор прочности.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предпочтительнее использовать белковые пенообразователи, так как они практически не влияют на сроки схватывания каустического магнезита. Но применение часто используемых биологических пенообразователей, как гидрализованная кровь нежелательно, так как присутствует неприятный запах у изделия и возникновение биологической коррозии.

Библиографический список

1. Крамар, Л.Я. Особенности твердения магнезиального вяжущего / Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, Б.Я. Трофимов // Цемент и его применение. – 2006. – № 9. – С. 58–61.

2. Крамар, Л.Я. Теоретические основы и технология магнезиальных вяжущих и материалов: автореф. дис. … д-ра техн. наук / Л.Я. Крамар. – Челябинск, 2007. – 42 с.

3. Крамар, Л.Я О требованиях стандарта к магнезиальному вяжущему строительного назначения / Л.Я. Крамар // Строительные материалы. – 2006. – № 1. – С. 54–56.

К содержанию

УДК 69.05:658.53 + 658.53

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННЫХ НОРМ ЗАТРАТ ТРУДА

С.Г. Головнев, Г.С. Дмитрин

На основе проведенных натурных экспериментов и анализа публикаций по нормированию затрат труда получены нормы времени при выполнении процессов бетонирования. Состав график выполнения работ, проведены сравнения данных хронометража и ЕНИР.

Ключевые слова: технологические процессы; нормирование затрат труда.

Научно обоснованное проектирование технологических процессов и работ в строительстве является одним из важнейших условий роста производительности труда, экономии материально-технических и финансовых ресурсов.

Действующие в настоящее время нормы затрат труда утратили свой прогрессивный характер. Они тормозят дальнейший рост производительности труда, поэтому их необходимо совершенствовать и пересматривать. К тому же появление новых строительных технологий, конструктивно-планировочных решений существенно усложнило процесс возведения зданий и сооружений, повысило трудоемкость выполняемых на них строительно-монтажный работ, что действующие нормы не учитывают. В общем, нормы есть и норм нет, так как установить реальную продолжительность объектов часто невозможно. Более того, появились новые типы зданий, которые вообще отсутствуют в действующих нормах.

На кафедре Технологии строительного производства Южно-Уральского государственного университета (Национального исследовательского университета) в последнее время выполняются научно-прикладные работы по уточнению соответствующих норм времени на основные виды работ: производство бетонных работ как в летнее, так и в зимнее время, каменные работы, отделка сухим способом и т.п.

В качестве объектов наблюдений были выбраны здания, на которых применяется современная организация труда, усовершенствованная техника и эффективные технологии (рис.). При этом должны быть получены следующие данные: величины затрат рабочего времени; количество продукции; детальная характеристика изучаемого строительного процесса.

Строящееся каркасно-монолитное здание

Как известно, наиболее эффективным является расчетно-исследовательский метод, основанный на использовании данных, получаемых в результате проведения специальных экспериментов (замеров, фотохронометрирования и т.д.), а также расчетно-аналитической метод, базирующийся на использовании имеющихся в нормативных и технических данных и предусматривающий проектирование норм на основе применения расчетных формул, нормативов затрат труда и метода аналогии [1].

Основой для любого метода исследований является нормаль производственного процесса, по которой определяют затраты рабочего времени и проектируют нормы выработки. В нормали должны быть отражены все факторы, характеризующие исследуемый процесс: характеристики применяемых машин, инструмента и приспособлений; данные о материалах и изделиях; состав работ; методы производства и организации труда; количество рабочих, выполняющих работу, и их квалификация; система оплаты труда; наличие вредных и опасных производственных факторов; условия труда и др. При этом средний разряд рабочих, выполняющих исследуемый процесс, должен быть близким среднему разряду работы.

Следующим этапом определения затрат труда было проведение непосредственно наблюдений и сбора данных. На этом этапе возможна корректировка технологий за счет выявления неправильного распределения отдельных операций между рабочими, организацией их рабочего места, а также использования инвентаря и оборудования не по назначению.

Состав рабочих процессов был взят из технологических карт, уточненных по сборникам ЕНиР [2].

В таблице представлены некоторые результаты выполненных наблюдений. Были рассмотрены следующие процессы при возведении перекрытия 16-ти этажного каркасно-монолитного здания. Это прием бетонной смеси из автобетоносмесителя в бадью, подъем бетонной смеси к месту укладки, разгрузка смеси, перекладка по площади перекрытия, разравнивание бетонной смеси вручную, вибрирование, затирка поверхности.

Как видим по таблице, затраты труда согласно ЕНиР превышают реальные данные при выполнении таких процессов как: выгрузка, перекидка и вибрирование бетонной смеси, а для остальных процессов мы наблюдаем обратную картину. В итоге, общая продолжительность работ по ЕНиРу превышает продолжительность по замерам на 15 процентов.

Таблица

График производства работ на бетонирование
по данным хронометража и ЕНиРа

№ п/п	Наименование работ	Ед. Изм	Объем	Нвр, чел-час Хроном. / ЕНиР	Состав звена	Продолжительность, сек Хронометраж,сек / ЕНиР	Минуты работы 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Прием бетонной смеси из АБС в бадью	$м^3$	1.5	0.062 / 0.06	1	56 / 54										
2	Подъем бетонной смеси к месту укладки	$м^3$	1.5	0.204 / 0.11	2	123 / 66										
3	Выгрузка бетонной смеси из бадьи в конструкцию	$м^3$	1.5	0.023 / 0.08	1	17 / 57										
4	Перекидка бетонной смеси вручную	$м^3$	1.5	0.061 / 0.11	2	55 / 99										
5	Вибрирование	$м^3$	1.5	0.09 / 0.144	1	100 / 161										
6	Разравнивание бетонной смеси	$м^2$	6	0.027 / 0.025	1	81 / 72										

Таким образом, можно сделать вывод, что затраты труда, полученные на основе выполненных исследований и ЕНиР отличаются как в сторону увеличения, так и уменьшения. Необходимо продолжить работы по нормированию затрат труда. Нам представляется, что они должны быть дифференцированы не только по видам работ и типам зданий, но и по конкретным строительным организациям.

Библиографический список

1. Анашко, А.И. Методические рекомендации по проектированию и проверке технически обоснованных норм времени расчетно-исследовательским методом / А.И. Анашко, Т.В. Страхова, Е.В. Купцова. – М.: Центрогтруд, 2001.

2. ЕНиР. Сборник Е4. Монтаж сборных и устройство монолитных железобетонных конструкций. Вып. 1. Здания и промышленные сооружения / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1987.

К содержанию

УДК 691.33 + 666.942

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЛОЦЕМЕНТНЫХ ВЯЖУЩИХ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

С.П. Горбунов, С.Н. Погорелов, Г.С. Семеняк

По результатам проведенных опытно-экспериментальных исследований влияния состава вяжущего на свойства композиционных материалов установлена возможность получения композиционных материалов, обеспечивающих достижения требуемых нормативно-технических параметров.

Ключевые слова: портландцемент, смешанные вяжущие, гранулированный шлак.

Планируемое в нашей стране увеличение объемов жилищного строительства технически развитых стран, задачи дальнейшего экономического и социального развития страны могут быть решены при соответствующем наращивании объемов производства строительных материалов. Решение этой задачи в значительной мере связано с развитием производства и экономным использованием минеральных вяжущих веществ, основным из которых является в настоящее время и на обозримое будущее портландцемент и его разновидности [1], дефицит которых не снижается ни по объему производства, ни по номенклатуре.

Увеличение производства портландцемента за счет восстановления и увеличения мощностей экстенсивен и не решает проблемы дефицита. Необходимо разрабатывать технические решения по снижению цементоемкости строительной продукции, приближая этот показатель к уровню технически развитых стран.

Понижение цементоемкости строительной продукции достигается как за счет обеспечения рациональной гранулометрии и чистоты заполнителей строительных смесей и применения химических и минеральных добавок, так и за счет более широкого использования безклинкерных и малоклинкерных вяжущих. Стремление к снижению цементоемкости строительной продукции в определенной мере связано и с тем, что производство портландцемента базируется на высоком потреблении природного минерального сырья и энергоресурсов и сопровождается значительными объемами выбросов вредных побочных продуктов в окружающую среду.

В «Стратегии развития строительного комплекса Российской Федерации на период до 2010 года» ставится задача рационального использования и вовлечения в производство техногенных отходов различных отраслей промышленности, замещения на 20…30 % природного сырья производственными и бытовыми отходами в производстве строительных материалов. Необходимо отметить, что указанные стратегические задачи актуальны и

сегодня, и в длительной перспективе, поскольку объемы утилизации побочных продуктов промышленности в нашей стране не превышают 10…15 %, то в развитых странах этот показатель достигает 60…80 % [2].

Существует определенная недооценка возможности более широкого применения гипсовых вяжущих веществ в строительном комплексе, особенно в составе смешанные вяжущие вещества – гипсоцементнопуццолановых (ГЦПВ) и гипсошлаковых (ГСШ); работы в этом направлении являются весьма перспективными, особенно для малого бизнеса [3].

В предлагаемой работе рассматривается эффективность изготовления и применения водостойких гипсоцементнопуццолановых вяжущих и их аналогов в экономически обоснованных строительных проектах.

Объектом исследований являлись:

1) смешанные вяжущие, включающие молотый доменный гранулированный шлак (далее ГШ), портландцемент (ПЦ) и гипсовый камень (ГК);

2) тяжелые и мелкозернистые бетоны на основе смешанных вяжущих.

Используемые материалы

Молотый доменный гранулированный шлак – побочный продукт выплавку чугуна в ОАО «Мечел» г. Челябинска, химический состав которого приведен в табл. 1.

Таблица 1

Усредненный химический состав доменного гранулированного шлака

Химический состав доменного гранулированного шлака, % по масс.						
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	$CaO_{св}$
38,6	11,66	2,22	36,75	10,28	0,56	0,31

Требуемая тонкость помола шлака с точностью $\pm$ 100 $см^2/г$ достигалась варьированием длительности полома пробы с последующим усреднением в лабораторной мельнице стаканного типа.

Гипсовый камень – горная порода Багарякского месторождения; по ГОСТ 4013 не ниже 2 сорта с содержанием сульфата кальция – 92,8 %.

Требуемая тонкость помола камня с точностью $\pm$ 80 $см^2/г$ достигалась варьированием длительности полома пробы с последующим усреднением в лабораторной мельнице шарового типа. Применение мельницы стаканного типа приводит к частичной дегидратации гипса, что резко сокращает сроки схватывания смешанного вяжущего.

Портландцемент по ГОСТ 10178 М400 Д20 (дозировка АМД (ГШ) Коркинского цементного завода (фирма Лафарж)) в составе портландцемента составляет в среднем 17 %). Нормативно – технические показатели вяжущего соответствуют требованиям ГОСТ 10178.

Для оценки технических характеристик вяжущего и влияния варьируемых факторов на свойства композита в работе использовался метод математического планирования, позволяющего получать адекватные математические модели процесса. В качестве варьируемых факторов принимались:

вид компонента смешанного вяжущего (X_1 – ГШ и X_2 – ГК), интервалы изменения тонкости помола которых находились в заданном факторном пространстве: 3200 – 4500 см^2/г и 2000 – 2700 см^2/г соответственно.

Состав вяжущего на данном этапе исследования фиксировался:

– ГК – 15 % от массы вяжущего;

– ПЦ – 25 % от массы вяжущего;

– ГШ – остальное

Методика проведения эксперимента предполагала реализацию следующего алгоритма при заданных граничных условиях:

– подготовка вяжущего вещества;

– проведение оценки реологических характеристик пластичной смеси;

– оценка прочности вяжущего (ТВО) по режиму 2+4+3 при температуре 65 ^{o}С на кубах с размером ребра 20 мм из теста вяжущего нормальной густоты.

Результаты испытаний приведены в табл. 2–3.

Таблица 2

Матрица планирования

№	X_1 – ГШ		X_2 – ГК		НГ, %	Сроки схватывания, мин	
	код	значение	код	значение		НС	КС
1	-1	3200	-1	2000	29,75	78	230
2	+1	4500	-1	2000	31,00	68	210
3	-1	3200	+1	2700	28,00	79	230
4	+1	4500	+1	2700	31,50	63	200

Таблица 3

Прочность камня вяжущего

№	Предел прочности при сжатии камня нормального твердения, МПа				Предел прочности при сжатии камня после ТВО, МПа		
	7 сут	28 сут	90 сут	360 сут	ТВО	ТВО+28	ТВО+360
1	15,0	18,5	23,6	24,0	33,7	37,1	38,1
2	14,4	21,0	24,5	25,6	39,8	38,2	37,6
3	16,0	19,7	27,3	26,3	34,7	36,3	37,1
4	15,8	18,0	25,9	29,1	40,6	40,1	39,1

Полученные экспериментальные данные были использованы при построении математических моделей неполной второй степени, устанавливающие адекватную взаимосвязь между принятыми факторами и параметрами оптимизации исследуемых процессов.

Выявлено, что увеличение тонкости помола гипсового камня технологически оправдано, поскольку значимость данного фактора имеет положительный знак для всех сроков и видов твердения и в 3–10 раз выше по числовому значению, чем у молотого граншлака.

Увеличение тонкости помола обоих компонентов в составе вяжущего приводит к ускорению процессов схватывания теста нормальной густоты: более значимым в этом случае является удельная поверхность граншлака.

Известково-сульфатное возбуждение гранулированного шлака даже в случаях твердения при комнатной температуре позволяет получать композиции с прочностями до 20 МПа, что дает возможность использовать смешанное вяжущее в качестве альтернативы цементу при производстве бетона классов В 7,5 – В15 , а также в качестве вяжущего при производстве сухих строительных смесей.

С целью проверки этого положения в работе проводилась оценка нормативных показателей качества тяжелых и мелкозернистых бетонов, составы которых приведены в табл. 4.

Таблица 4

Составы тяжелого и мелкозернистого бетона

Компоненты бетонной смеси	Расход компонента, кг/м^3 бетонной смеси	
	Тяжелый бетон (ТБ)	Мелкозернистый бетон (МЗБ)
Вяжущее	300	300
Кварцевый песок, $М_к$=2,4	600	1800
Гранодиоритовый щебень фракции 5 – 10 мм	1200	–
Добавка СП – 1, от вяжущего вещества	0,5	0,5
В/В отношение	0,5	–

Состав вяжущего на данном этапе исследования фиксировался:

– ГК – 13 % от массы вяжущего вещества;

– ПЦ – 17 % от массы вяжущего вещества;

– ГШ – остальное.

Бетонная смесь на крупном заполнителе имела подвижность 5–7 см осадки конуса и формовалась вибрированием контрольных образцов кубов с ребром 100 мм на лабораторной виброплощадке.

Мелкозернистая бетонная смесь имела при затворении влажность 8 % и применялась для изготовления контрольных образцов цилиндров высотой и диаметром 50 мм вибропрессованием при давлении прессования 40 МПа.

Контрольные образцы бетонов твердели до испытания в нормальных условиях и проходили тепловлажностную обработку (ТВО) по режиму 2+4+3) при температуре 85 ^oC.

В ходе работы контролировались предел прочности при сжатии; коэффициент размягчения; водопоглощение бетона; морозостойкость бетона.

Результаты определения нормативных параметров качества бетонов приведены в табл. 5–6.

Таблица 5

Нормативные показатели качества тяжелого бетона

Показатель	Нормальное твердение			ТВО +		
	7 сут	28 сут	90 сут	7 сут	28 сут	90 сут
Предел прочности при сжатии во влажном состоянии, МПа	10,9	17,3	22,1	18,0	22,0	31,5
Предел прочности при сжатии в сухом состоянии, МПа	8,1	20,7	24,2	18,3	23,5	30,6
Коэффициент размягчения	1,35	0,84	0,91	0,98	0,94	1,03
Водопоглощение по массе, %	7,1	5,9	5,0	6,2	5,1	5,2
Марка по морозостойкости, F	-	100	150		75	100

Предел прочности при сжатии во влажном состоянии определялся после дополнительного трехсуточного насыщения бетона образцов в воде до достижения требуемого возраста испытания. Проведенные исследования показали возможность применения смешанных вяжущих веществ в производстве строительной продукции широкой номенклатуры.

Таблица 6

Нормативные показатели качества мелкозернистого бетона

Показатель	Нормальное твердение			ТВО +		
	7 сут	28 сут	90 сут	7 сут	28 сут	90 сут
Предел прочности при сжатии во влажном состоянии, МПа	16,7	27,3	32,2	22,1	26,1	31,0
Предел прочности при сжатии в сухом состоянии, МПа	18,2	28,7	34,6	24,3	30,4	34,1
Коэффициент размягчения	0,92	0,95	0,93	0,91	0,86	0,91
Водопоглощение по массе, %	6,1	5,2	4,8	6,0	5,1	4,7
Марка по морозостойкости, F	–	150	150	–	75	150

Динамика изменения прочности бетонов положительна: в изученных интервалах времени показатели прочности бетонов нормального твердения возросли практически вдвое; тепловая обработка позволяет получать высокие прочности в начальные сроки, последующее твердение приводит к увеличению на 40…50 %.

Все бетоны, независимо от способа формования характеризуются коэффициентами размягчения не ниже 0,8, что предполагает возможность эксплуатации изделий и конструкций на их основе во влажных условиях без ограничений. Видимо этим и обусловлена достаточно высокая марка по морозостойкости.

Предлагаемые технические решения прошли опытно-промышленную апробацию. Фирмой ООО «Инвестстрой» была изготовлена опытная партия продукции объемом 15 м^3 по ТУ 6633 – 001 – 53458318 – 2005 «Камни бетонные стеновые. Технические условия» с использованием технологии прессования. Камни использованы для кладки ограждающей стены одноэтажного производственного помещения в пос. Первомайский Челябинской области.

Библиографический список

1. Гергичны, З. Европейский опыт успешного использования в строительстве цементов с добавкой доменного шлака / З. Гергичны // ALITinform. Международное аналитическое обозрение. Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2013. – № 4–5. – С. 36–42.

2. Райнер, Х. Шлаковые цементы: основные положения / Х. Райнер // Цемент и его применение. – 2003. – № 1. – С. 15–17.

3. Абрамов, А.К. Использование промышленных отходов при производстве дешевых высококачественных вяжущих и бетонов / А.К. Абрамов, В.К. Печериченко // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2004. – № 6. – С. 50–51.

К содержанию

УДК 628.4 +502.33

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ В ПРИРОДООХРАННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

С.Е. Денисов, Т.А. Витомскова, М.В. Широкова

По результатам исследований доказано, что при расчете экономической эффективности природоохранных объектов необходимо учитывать экологическую составляющую, то есть рассчитывать негативное воздействие хозяйственной деятельности на окружающую среду. Такой учет позволяет существенно повысить инвестиционную привлекательность природоохранных объектов.

Ключевые слова: экологический ущерб, экономическая эффективность, бытовые отходы.

Одной из главных проблем, стоящих в настоящее время перед обществом является охрана окружающей среды. Однако экологические проекты в настоящее время являются экономически не привлекательными из-за долгих сроков их окупаемости и малой прибыльности. Это касается, к сожалению и тех проектов, которые являются весьма прибыльными в развитых странах. Это касается, прежде всего, переработки и утилизации твердых бытовых отходов.

Поэтому экономическое обоснование инвестиций для строительства предприятий переработки и утилизации твердых бытовых отходов представляется актуальной задачей. Такая задача может быть решена путем точного расчета экологического ущерба, наносимого окружающей среде традиционными методами и технологиями переработки и утилизации твердых бытовых отходов и экономических параметров перерабатывающих заводов. Необходимо доказать, что предприятия по переработке твердых бытовых отходов являются высоко прибыльными и инвестиционно привлекательными.

Инвестиционные проекты и бизнес-планы предприятий по переработке ТБО должны учитывать множество факторов, особенно при определении экологического ущерба на фоне недооценки природы.

В настоящее время простейшие методы утилизации, от которых развитые страны отказались более 20 лет назад, применяются в подавляющем количестве населенных пунктов нашей страны. Это приводит к тому, что возникают как экологические, так и экономические проблемы. Первоначальная дешевизна применяемых технологий и малая прибыльность переработки отходов перекладывает на плечи жителей большие расходы в виде высоких тарифов за коммунальные услуги.

Серьезность влияния обработки и захоронения отходов на окружающую среду зависит от объема производимых отходов, их состава, количества незаконно захороненных отходов, количества размещенных на свалке

отходов и стандартов на заводах по обработке отходов. Будущее влияние процесса управления отходами будет зависеть от того, как изменятся указанные факторы. Окончательная обработка отходов, на сегодняшний день, означает либо их захоронение на свалке, либо сжигание, и два этих вида окончательной обработки оказывают разное, но в обоих случаях негативное, влияние на окружающую среду [1].

В данной работе предпринята попытка доказать прибыльность глубокой переработки ТБО.

Наиболее эффективным методом утилизации ТБО в настоящее время являются мусороперерабатывающие заводы, позволяющие проводить не только глубокую переработку отходов, но и получить прибыль от добычи электроэнергии. Практика применения таких заводов получила широкое распространение за рубежом и, к сожалению, редкое у нас. При расчете экономического эффекта необходимо учитывать не только прямые доходы от производства энергии, но и предотвращения экологического ущерба от размещения ТБО на полигонах ТБО. Поэтому в данной работе рассчитан экологический ущерб посредством расчета платежей за размещение ТБО

В Кыштымском городском округе от всех видов деятельности образуется примерно 150 видов отходов от первого до пятого класса опасности [2].

Наиболее токсичные – это три первых класса. Их запрещено вывозить на горполигон ТБО, а полагается сдавать на утилизацию в специализированные организации. Эти специализированные организации должны иметь лицензию на право деятельности по обращению с опасными отходами.

Твердый бытовой мусор предприятия, организации, учреждения Кыштымского городского округа вывозят на городской полигон.

Плата за размещение отходов подразделяется на:

– плату в пределах установленных лимитов размещения отходов;

– плату за сверхлимитные объемы размещения отходов.

Нормативы платы за размещение отходов производства и потребления установлены Постановлением Правительства РФ от 12 июня 2003 года N 344 и применяются с использованием коэффициента экологической ситуации региона [3].

Размер платы за размещение отходов в пределах установленных природопользователю лимитов определяется путем умножения соответствующих ставок платы, с учетом класса опасности размещаемого отхода на его массу и суммирования полученных произведений.

Таким образом, например, экологический ущерб от размещения ТБО на территории Кыштымского городского округа составляет 33 930 172,93 рублей в год.

Далее в таблице 1 дается характеристика годовой производственной программы, выраженная в денежном эквиваленте.

Основные технические характеристики мусороперерабатывающего завода ТБО представлены в таблице 2.

Таблица 1

Экономические показатели утилизации ТБО, руб.

Платежи по обезвреживанию отходов (275 х 10 000 т.)	2 750 000
Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) (16 500 х 360 т.)	5 940 000
Полимерпесчаные изделия (7 334,25 х 139,5 т.)	1 023 128
Прочие полимеры (11 000 х 1260 т.)	13 860 000
Макулатура пакетированная (1 375 х 1800 т.)	2 475 000
Текстиль пакетированный (1 100 х 495 т.)	544 500
Металлолом (черный) (1 375 х 360 т.)	495 000
Металлолом (цветной) (11 000 х 45 т.)	495 000
Стеклобой (смешанный) (275 х 900 т.)	247 500

Таблица 2

Технические характеристики мусороперерабатывающего завода ТБО

Мощность переработки в год (при односменной работе)	10 000 тонн
Установленная мощность токоприемников	155 кВт
Приемно-сортировочное отделение без сетей	450 м»
Отделение переработки вторичных ресурсов без сетей	600 $м^2$
Складская зона (сырье, готовая продукция) без сетей	600 $м^2$
Административно бытовые помещения без сетей (согласно местных строительных норм)	100 $м^2$
Площадь территории	от 0,5 до 1,0 Га
Теплопотребление	до 0,1 Гкал/час
Водопотребление	до 5 $м^3$/сутки
Численность работников	25–30 человек

Входные данные для расчета экономической эффективности функционирования мусороперерабатывающего завода ТБО: стоимость мусороперерабатывающего завода мощностью 10 000 тонн в год на город 50 тысяч жителей по данным анализа проектно-сметной документации составляет 27,83 миллионов рублей. При сроке строительства 3 года ежегодные капитальные вложения составляют 9,28 млн рублей. Экологический ущерб окружающей среде от эксплуатации мусороперерабатывающего завода составляет 2,8 млн рублей. Таким образом, ежегодный предотвращенный экологический ущерб составит 31,13 млн руб. Ежегодные текущие затраты переработки ТБО составляют 17,0 млн руб. Расчётный период 10 лет.

Перспективность вложение денежных средств в мусороперерабатывающий завод можно проанализировать на примере анализа инвестиционного проекта, посчитав ряд основных показателей [4].

$$ЧДД = \sum_{i=1}^{n} DD_t - \sum_{i=1}^{n} DK_v \quad (1)$$

ЧДД = 43,29–22,40 = 20,89 млн руб.

ЧДД инвестиционного проекта положителен, проект является эффективным (при данной норме дисконта).

Индекс доходности будет следующий:

$$ID = 43,29/22,40 = 1,93.$$

Из значения индекса доходности данный инвестиционный проект расценивается, как эффективный.

Срок окупаемости завода составляет:

$$So=27,83/14,13=1,75 \text{ года.}$$

Таким образом, доказано, что мусороперерабатывающий завод является экономически выгодным.

Библиографический список

1. Федеральный классификационный каталог отходов / утв. Приказом МПР России от 02.12.2002 № 786.

2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19.10.2007. № 703 «Об утверждении методических указаний по разработке проектов нормативов образования отходов и лимитов на их размещение».

3. Дрейер, А.А Твердые промышленные и бытовые отходы, их свойства и переработка / А.А. Дрейер, А.Н. Сачков, К.С. Никольский, Ю.И. Маринин, А.В. Миронов. – М., 1997. – 116 с.

4. Павлов, А.Н. Экология: рациональное природопользование и безопасность жизнедеятельности. Учеб. пособие / А.Н. Павлов. – М.: Высшая шк., 2010. – 343 с.

К содержанию

УДК 628.54 + 502.33

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФИНАНСИРОВАНИЯ ВОДООХРАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

С.Е. Денисов, Т.А. Витомскова, М.В. Широкова

Установлено, что, что при расчете экономической эффективности водоохранных объектов необходимо учитывать экологическую составляющую, то есть рассчитывать негативное воздействие хозяйственной деятельности на водные объекты, в которые производится сброс сточных вод промышленных предприятий.

Ключевые слова: водные объекты, водоохранные мероприятия, экологический ущерб, экономическая эффективность.

Вода – главный природный ресурс. Водная проблема одна из наиболее сложных проблем природопользования. В связи с ограниченностью водных ресурсов и неудовлетворительным санитарным состоянием водоемов, проблема водных ресурсов и охраны их от загрязнения приобретает в настоящее время первостепенное значение.

ЗАО «Кыштымский медеэлектролитный завод» сбрасывает в озеро Сазоново 219,136 тонн в год загрязняющих веществ тремя выпусками. Озеро Сазоново имеет рыбопромысловые участки и относится к рыбохозяйственным.

Валовый сброс, осуществляемый ЗАО «КМЭЗ» в оз. Сазоново составляет 3165,695 тонн в год.

Исчисление размера вреда, причиненного водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе сточных вод и (или) дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод, производится по формуле (1):

$$У = К_{ВГ} \times К_{В} \times К_{ИН} \times \sum_{i=1}^{n} Н_i \times М_i \times К_{ИЗ}, \quad (1)$$

где: У – размер вреда, тыс. руб.;

$К_{ВГ}$ – коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года. $К_{В}$ – коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов);

$К_{ИН}$ – коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития.

$Н_i$ – таксы для исчисления размера вреда от сброса i-го вредного (загрязняющего) вещества в водные объекты, тыс. руб./т.

$М_i$ – масса сброшенного i-го вредного (загрязняющего) вещества определяется по каждому загрязняющему веществу, т, определяется по формуле (2):

$$M_i = Q \times (C_{fi} - C_{di}) \times T \times 10^{-6}, \quad (2)$$

где: i – загрязняющее вещество, по которому исчисляется размер вреда;

Q – расход сточных вод с превышением содержания i-го вредного (загрязняющего) вещества, $м^3$/час;

$С_{fi}$ – средняя фактическая за период сброса концентрация i-го вредного (загрязняющего) вещества в сточных водах, мг/л;

$С_{di}$ – концентрация i-го вредного (загрязняющего) вещества, мг/л;

Т – продолжительность сброса сточных вод с повышенным содержанием вредных (загрязняющих) веществ, час;

$К_{ИЗ}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект.

В 2012 году ЗАО «КМЭЗ» осуществлена плата за сверхлимитные сбросы загрязняющих веществ в размере 544468 рублей 96 копеек (пятьсот сорок четыре тысячи четыреста шестьдесят восемь рублей девяносто шесть копеек).

Таким образом, размер вреда будет равен [1]:

12 560 020 руб. – 544468,96 руб. = 12 015 551,04 руб.

Одним из источников формирования финансовых средств на водоохранные объекты могут выступать платежи предприятия за сброс в водные объекты загрязненных сточных вод. Однако годовые платежи, вследствие их ничтожности, не воздействуют на владельцев предприятий водопользователей.

Для решения этой проблемы вводится понятие экономически выгодного вложения предприятием на очистку загрязнённых сточных вод. Экологически выгодное вложение предложено рассчитывать по следующей формуле (3):

$$B_{экол.} = (У + Ш) \times H_{с.о.}, \quad (3)$$

где: У – сумма предъявляемого ущерба за сброс сточных вод, превышающий установленные нормативы сброса, тыс.руб.;

Ш – сумма штрафа в соответствии с КоАП РФ, тыс.руб.;

$H_{с.о}$– нормативный срок окупаемости проекта очистных сооружений, составляет 8,35 лет.

Рассчитаем значение этого вложения для ЗАО «КМЭЗ»:

$B_{экол}$= 12 015 551,04х8,35=100 239 850руб.

Таким образом, за 8 лет предприятия полностью восстановят или построят комплекс очистных сооружений, позволяющие выпускать в водные объекты достаточно-очищенные сточные воды, не превышающие нормативы допустимого сброса загрязняющих веществ, тем самым улучшат качество водного объекта и освободят себя от штрафных санкции и предъявляемых ущербов [2].

Анализ финансовой деятельности предприятия показал, что прибыль завода за 2012 год составил 222 063 тыс. руб. Часть прибыли вполне может быть направлена на создание эффективной системы очистки сточных вод.

Капитальные вложения в такую систему в течение трёх лет будут составлять 30 млн рублей, что будет занимать 13 % от годовой прибыли. Текущие затраты программы: 3,8 млн рублей в течение 7 лет. Расчётный период 10 лет.

Перспективность вложение денежных средств в эту систему можно проанализировать на примере анализа инвестиционного проекта, посчитав ряд основных показателей.

ЧДД = 74,32 – 70,83 = 3,49 млн руб.

ЧДД инвестиционного проекта положителен, проект является эффективным (при данной норме дисконта).

Индекс доходности будет следующий:

ID= 74,32/70,83 = 1,046.

Из значения индекса доходности данный инвестиционный проект расценивается, как эффективный [3].

Таким образом, доказано, что вложения в водоохранные объекты являются экономически выгодными.

Библиографический список

1. Водный Кодекс Российской Федерации. Юридический дом юстицинформ. – М, 1997. – 120 с.

2. Вода России. Водно-ресурсный потенциал. – Екатеринбург: «АКВА-ПРЕСС», 2000.

3. Денисов, С.Е. Экспресс-метод определения приоритетности реализации мероприятий по РЦП «Обеспечение населения Челябинской области питьевой водой / С.Е. Денисов, Л.А. Котляр, Э.Г. Полякова // Экологические проблемы и современные технологии водоснабжения и водоотведения: Сб. научн. ст. – Челябинск, 2000.

К содержанию

УДК 666.962.2

ШТУКАТУРНЫЕ СОСТАВЫ НА МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ДЛЯ НАРУЖНЫХ РАБОТ*

В.В. Зимич

В работе представлены исследования и разработка сухих строительных смесей для наружной отделки на основе магнезиального вяжущего пониженной гигроскопичности.

Ключевые слова: магнезиальные сухие строительные смеси, смеси для наружной отделки, гигроскопичность, прочность, водостойкость.

Сухие строительные смеси (далее ССС) занимают около 35 % всей промышленности строительных материалов России. Растущий спрос на них обуславливается, прежде всего, экономией дорогостоящих вяжущих веществ за счет использования пластифицирующих добавок, а также снижением расходов на транспортировку готовых смесей к месту их использования [1]. На рынке строительных материалов в настоящее время присутствуют только цементные, гипсовые и полимерные сухие строительные смеси. А на основе магнезиального вяжущего смесей, к сожалению, нет.

Это связано в первую очередь с тем, что магнезиальные вяжущие мало известны среди конечных потребителей и даже многих ученых. Причиной такой «скромности» данного вяжущего является отсутствие качественного магнезиального вяжущего строительного назначения в нашей стране, а также недостаточно информации о качественных материалах и изделиях на его основе (отсутствие нормативной базы – ГОСТов, ТУ на такие изделия).

Однако, проведенные литературные исследования показали [2, 3, 4], что на основе магнезиального вяжущего можно изготавливать широкую номенклатуру ССС (штукатурные составы, растворы, окрасочные составы, грунтовки и шпаклевки, смеси для полов и т.д.) с повышенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

*Исследования проведены за счет средств Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере в рамках реализации проекта «Разработка ресурсосберегающих экологичных магнезиальных сухих строительных смесей».

Изучение ассортимента сухих строительных смесей на российском рынке показало, что в нашей стране отделочные смеси на магнезиальном вяжущем практически не производятся [5]. Единственным предприятием, которое занимается выпуском магнезиальных смесей для устройства полов, является «Альфапол» (г. Санкт-Петербург), не удовлетворяющий спрос всего строительного рынка ССС России.

Штукатурные магнезиальные составы должны быть легкими и создавать «дышащее» покрытие. Поэтому для производства сухих строительных смесей наиболее перспективными наполнителями являются вермикулит, тальк, микрокальцит, сырые магнезитовые и бруситовые породы и т.д. В работе [5] предлагаются примерные составы магнезиальных шпаклевок. При приготовлении смесей на основе магнезиального вяжущего необходимо придерживаться точных дозировок исходных компонентов. Например, незначительные отклонения в плотности затворителя могут существенно изменить качество получаемых материалов. При производстве ССС обезвоженную соль вводят непосредственно в смесь и на месте производства штукатурных работ нужно лишь точно отдозировать необходимое количество воды, это избавляет от необходимости приготовления раствора затворителя нужной плотности на строительной площадке и облегчает условия работы.

Штукатурные растворы для наружного раствора должны быть легкими, с высокой паропроницаемостью и адгезионной прочностью к бетонам и кирпичу. Кроме того, штукатурные растворы на магнезиальном вяжущем отличаются быстрым набором прочности, позволяющим ускорить сроки строительства. Экологичность и антибактерицидные свойства магнезиальных ССС позволяют применять их в детских и медицинских учреждениях, в жилых домах, поэтому разработка штукатурных смесей на основе магнезиального вяжущего является перспективным направлением исследования в области строительного материаловедения.

Для решения поставленных задач был проведен литературный и патентный обзор, в результате которого было установлено, что возможность производить ССС на основе магнезиального вяжущего есть, однако нет нормативно-технической документации, содержащей рекомендации по количественному содержанию тех или иных компонентов в составе смеси, как это описано для цементных и других пуццоланосодержащих смесях. Поэтому при проведении исследований будем использовать нормативную базу именно для цементных смесей.

Таким образом, целью работы является разработка составов магнезиальных сухих строительных смесей для наружной отделки зданий и исследование их свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих задач:

1) исследовать свойства исходных сырьевых материалов;

2) спланировать эксперимент исследований и разработать составы магнезиальных сухих строительных смесей для наружного применения;

3) изучить основные свойства разрабатываемых магнезиальных сухих строительных смесей;

4) определить оптимальный состав магнезиальной сухой строительной смеси для наружной отделки.

В качестве сырьевых материалов использовали:

1. Магнезиальное вяжущее ПМК-75 («Комбинат «Магнезит», г. Сатка) соответствующий ГОСТ 1216-87 [1] и разработанным на кафедре «Строительные материалы» ТУ 5745-004-70828456-2005 [8];

2. Затворитель – водный раствор хлорид магния $MgCl_2 \cdot 6H_2O$, соответствующий ГОСТ 7759-73 [9] и ТУ – 2152-005-53561075-03 [10].

3. Тонкомолотая добавка – железорудный агломерат, вводимый в количестве 0…20 % от массы вяжущего в виде тонкомолотого порошка (остаток на сите № 008 не более 15 %) производства ООО «Бакальские рудники».

Рентгенофазовый анализ показал, что основными минералами железорудного агломерата являются [6]:

$MgFe_2O_4$ – магнезиоферрит с d/n = 2,9699; 2,522; 2,0973; 1,707; 1,6110; 1,4754Å;

$FeCr_2O_4$ – хромит с d/n = 2,9699; 2,522; 2,0973; 1,707; 1,6110; 1,4754 Å;

$CuFeMnO_4$ – купрумжелезооксид марганца с d/n = 2,9699; 2,522; 2,0973; 1,707; 1,6110; 1,4754Å;

Fe_2O_3 – гематит с d/n = 2,7887; 2,522; 2,1949; 2,0973; 1,835; 1,707; 1,6110; 1,4754; 1,4506Å;

$FeFe_2O_4$ – магнетит с d/n = 2,9699; 2,522; 2,0973; 1,707; 1,6110; 1,4754Å;

Mn_2O_3 – оксид марганца с d/n = 2,7887; 2,522; 2,1949; 1,835; 1,707; 1,4754; 1,4506Å.

На кривой ДТА (рис. 1) нагревания железорудного агломерата фиксируется 4 тепловых эффекта: два необратимых экзотермических и два обратимых эндотермических [6, 7]:

Первый экзотермический эффект с максимумом при температуре 432°С связан с окислением магнетита с поверхности до γ-Fe_2O_3. Второй с максимумом при температуре в интервале 600…1000 °С – 803 °С и 875 °С – характеризует окисление остаточного магнетита и переход γ-Fe_2O_3 в α-Fe_2O_3.

Эндотермический эффект при температуре 577 °С указывает на магнитное превращение остаточного магнетита, а максимум при температуре 770 °С обусловлен магнитным превращением гематита, образовавшегося на первых стадиях окисления магнетита. Эндотермический эффект при температуре 577 °С фиксирует точку Кюри, обусловленную превращением магнетита, которое сопровождается потерей магнитных свойств и переходом из ферримагнитного состояния в парамагнитное.

4. Заполнитель – вермикулит ЗАО «Уралграфит» (фракции ≤ 1,25), соответствующий требованиям ГОСТ 9757-90 [11] и ГОСТ 9758-86 [12], pH = 6,5…7,5.

5. Затворитель – вода, для создания будущей плотности затворителя 1,22 г/см^3.

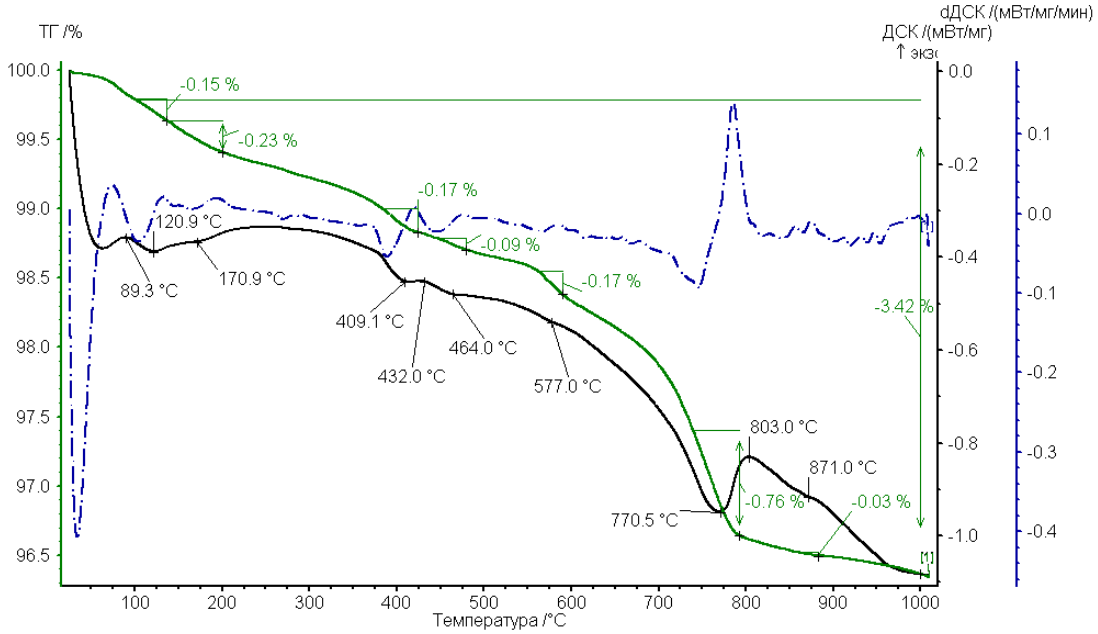


Рис. 1. ДТА состав железорудного агломерата

Для осуществления экспериментов необходимо провести расчет состава строительной смеси. Для чего спланируем и реализуем двухфакторный эксперимент, значимыми факторами (в кодовых значениях) в котором служат:

X – отношение MgO/вермикулит, равное 75/25, 50/50, 25/75;

У – количество добавки железорудного агломерата/шлака никелевого производства, которая варьировалась в пределах 0 %, 2,5 % и 5 %.

Откликами являются основные свойства строительного раствора.

Также необходимо определить минимальное количество образцов в серии N для получения достоверных результатов исследований путем расчета отклонений от точности измерений (ΔX) [13]:

средняя плотность	N = 6	ΔX = 2,2…2,3 %;
прочность в разном возрасте	N = 6	ΔX = 3,5…4,8 %;
прочность при адгезии	N = 6	ΔX = 3,0…3,8 %;
морозостойкость	N = 36	ΔX = 2,5…3,7 %;
усадки при высыхании	N = 12	ΔX = 0,01…0,015 %;
теплопроводность	N = 6	ΔX = 0,1…0,15 %;
паропроницаемость	N = 6	ΔX = 0,1…0,25 %;
сорбционная влажность	N = 6	ΔX =0,01…0,02 %;
водостойкость	N = 6	ΔX = 0,1…0,15 %;
водопоглощение по массе	N = 6	ΔX = 0,1…0,2 %;

водопоглощение по капил. подсосу	N = 6	$\Delta X = 0,1…0,2$ %;
открытая пористость	N = 6	$\Delta X = 4,4…4,6$ %;
общая пористость	N = 6	$\Delta X = 4,6…4,9$ %;
закрытая пористость	N = 6	$\Delta X = 4,6…4,7$ %.

Для исследований свойств магнезиальных сухих строительных смесей готовили гарцовку из смеси вяжущего, заполнителя и добавок. Тщательно перемешав эти компоненты, гарцовку затворяли заранее подготовленным водным раствором хлорида магния. Готовую смесь укладывали в формы с размерами, установленными нормативно-технической документацией на конкретные испытания. Условия твердения строительного раствора: температура 20 ± 5^0С и относительная влажность воздуха 65±5 %.

Результаты определения свойств строительного раствора сведены в табл. 1, 2.

На основе полученных данных с помощью компьютерной обработки результатов построили математические формулы, а также рассчитали критерий Фишера. Результаты обобщены в табл. 3.

Изучая физико-механические свойства магнезиального штукатурного раствора, установили, что его прочность при сжатии и изгибе прямо пропорционально зависит от количества введенного в состав смеси заполнителя. Так при содержании вермикулита в количестве 25 % прочность при сжатии достигает М 20, марка по прочности при изгибе Bt 5,2, адгезионная прочность в 28 сутки составляет 1,1…1,5 МПа, средняя плотность магнезиальной штукатурки находится в пределах 1300…1400 г/см^3. Также на прочностные характеристики раствора существенное влияние оказывает добавка железорудного агломерата, вводимая в количестве 2,5 и 5 %. При этом 5 % добавки в составе вяжущего позволяют достичь наивысших прочностей. Дальнейшее повышение содержания заполнителя в составе штукатурного раствора приводит к снижению показателей физико-механических характеристик.

Таблица 1

Физико-механические свойства штукатурного раствора

Кол-во MgO/вермикулит, %		Кол-во добавки, %		Прочность при сжатии, МПа, сутки						M_R	Плотность раствора, кг/м^3, сутки		A_7	A_{28}	F	Усадки, мм/м
				1		14		28								
X	%	У	%	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$		7	28				
-1	75/25	-1	0	10,1	1,3	16,0	1,46	19,8	8,7	10	1390	1425	0,86	1,1	50	-0,40
-1	75/25	0	2,5	9,7	1,1	18,4	1,41	21,0	8,3	10	1450	1416	0,93	1,3	50	-0,35
-1	75/25	1	5	10,2	1,0	19,3	1,40	24,0	8,1	10	1415	1347	1,00	1,5	50	-0,38
0	50/50	1	5	4,5	0,8	7,9	0,93	9,5	10,8	4	1189	1166	1,49	1,6	35	-0,35
1	25/75	1	5	1,0	0,3	1,9	0,4	2,4	2,6	-	1054	1023	0,38	0,51	25	-0,20
1	25/75	0	2,5	1,7	0,3	2,4	0,49	3,0	3,1	-	1060	1000	0,45	0,56	25	-0,22
1	25/75	-1	0	1,9	0,3	2,4	0,40	3,2	3,2	-	1070	980	0,68	0,7	25	-0,25
0	50/50	-1	0	4,2	0,4	5,3	0,93	6,6	5,4	4	1210	1199	1,30	1,5	30	-0,30
0	50/50	0	2,5	3,5	0,6	5,6	0,78	6,9	4,8	4	1195	1185	1,23	1,56	30	-0,33

Таблица 2

Физические и теплофизические свойства раствора

Физические свойства									Теплофизические свойства	
Кол-во MgO/вермикулит, %		Кол-во агломерата, %		Гигроскопичность, %	Водостойкость	Водопоглощение, % по массе	Открытая пористость, %	Водопоглощение по кап. подсосу, кг/(м^2*ч^{0,5})	λ, Вт/(м·С)	μ, г/(м·ч·П)
X	%	У	%							
-1	75/25	-1	0	11,3	0,67	8,3	11,8	0,47	0,3109	0,233
-1	75/25	0	2,5	9,6	0,69	10,1	14,3	0,37	0,2215	0,124
-1	75/25	1	5	9,3	0,67	13,6	18,3	0,37	0,2868	0,227
0	50/50	1	5	15,4	0,53	27,9	32,5	1,17	0,3173	0,255
1	25/75	1	5	31,2	0,50	40,2	41,1	1,33	0,2844	0,418
1	25/75	0	2,5	35,1	0,50	42,5	45,5	1,33	0,2945	0,485
1	25/75	-1	0	38,5	0,49	44,1	47,2	1,56	0,3122	0,284
0	50/50	-1	0	19,6	0,50	34,1	40,9	1,55	0,4324	0,334
0	50/50	0	2,5	16,5	0,52	30,2	35,8	1,34	0,3521	0,383

Таблица 3

Математическая интерпретация результатов исследований свойств ССС

Свойства	Математическая формула	Критерий Фишера
прочность при сжатии в 28 сутки, МПа	$M(x,y)=7,7-9,37x+1,05y+4,3x^2+0,35y^2-1,25xy$	0,67
плотность раствора в 28 суток, г/см^3	$M(x,y)=1196,75-197,5x-11,33y+11,25x^2-14,25056y^2+30,25xy$	0,18
прочность при изгибе в 28 сутки, МПа	$M(x,y)=8,1175-2,7x+0,71y-2,42x^2-0,0375y^2-0,0125xy$	0,38
адгезионная прочность в 28 сутки, МПа	$M(x,y)=1,5275-0,355x+0,052y-0,6x^2+0,0225y^2-0,1475xy$	0,17
морозостойкость, циклов	$M(x,y) = 31,11–12,5\ x+0,083y+5,83x^2+0,83\ y^2+0xy$	1,27
усадки, мм/м	$M(x,y) =-0,23+0,0117x+0,04\ y–0,04\ x^2–0,078\ y^2–0,025xy$	1,55
гигроскопичность, %	$M(x,y)=16,775+12,77x-0,25y+5,58x^2+0,735y^2+1,675xy$	1,07
водостойкость	$M(x,y)=0,5275-0,09x+0,0067y+0,0675x^2-0,0125y^2+0,0025xy$	0,045
открытая пористость, %	$M(x,y)=36,5+13,73x-0,67y-8,1x^2+0,2y^2-2,15xy$	0,22
водопоглощение при капиллярном подсосе, кг/(м^2·ч^{0,5})	$M(x,y)=1,279+0,504x-0,1183y-0,432x^2+0,0845y^2-0,0325xy$	0,14
паропроницаемость, г/(м·ч·Па)	$M(xy) = 0,31 + 0,1x + 0,00975y – 0,00675x^2 – 0,0165y^2 + 0,033xy$	0,9
теплопроводность, Вт/(м·С)	$M(x,y)=0,334275+0,012x-0,027833y-0,0763x^2+0,040575y^2-0,000925xy$	1,65

Изучая морозостойкость магнезиальной штукатурки для наружного применения, установили, что раствор, выдерживающий наименьшее количество циклов попеременного замораживания и оттаивания, содержит в своем составе 75 % заполнителя, и его морозостойкость составила 25 циклов. Раствор, содержащий 50 % вермикулита в качестве заполнителя, имеет марку по морозостойкости F 35, а количество циклов у раствора с 25 % вермикулита достигает 70, что соответствует марке F 50.

Увеличение количества вермикулита от 25 до 75 % приводит к снижению деформаций усадок до -0,25 мм/м, при этом добавка железорудного агломерата составляет 5 %.

Учитывая то, что вермикулит является пористым материалом с преобладанием открытых пор, то увеличение доли его содержания в составе магнезиального раствора приводит к повышению его открытой пористости с 11 до 47 %. Добавка оказывает влияние только при повышенном содержании заполнителя. И наивысший коэффициент размягчения имеет раствор, содержащий в своем составе 25 % вермикулита и 5 % добавки.

Изучая гигроскопичность штукатурного раствора, содержащего 25 %, вермикулита, установили, что способность его адсорбировать на своей поверхности пор и внутри них влагу колеблется в пределах 11 %. При этом добавка позволила снизить данный показатель более чем на 20 %.

Водопоглощение при капиллярном подсосе при введении в состав раствора 25 % вермикулита и 5 % добавки позволяет достигнуть значения, ниже 0,4 кг/(м^2·ч^{0,5}).

Разработанный материал удовлетворяет требованиям по теплоизоляционный эффективности, имеющий теплопроводность не более 0,3 Вт/(м·°С) при содержании вермикулита 25 % и добавки 5–10 %.

Результаты паропроницаемости магнезиальной штукатурки показывают, что такой раствор за счет мономолекулярных сил способен адсорбировать влагу на поверхности пор и устанавливать тем самым равновесную влажность с обеих сторон материала. Такой раствор препятствует образованию конденсата внутри стены, и не пропускает холод и другие неблагоприятные факторы вовнутрь помещения.

Проведя исследования свойств магнезиальной штукатурки, установили, что оптимальное соотношение заполнителя к вяжущему составляет 75/25 или 3/1 при введении в состав магнезиального вяжущего тонкомолотой железосодержащей добавки в виде железорудного агломерата в количестве 5-10% при плотности затворителя 1,22 г/см^3.

Такой раствор обладает следующими свойствами: класс по прочности в 7 суток В 10, Bt 0,8, $R_{сц}$ составляет 0,9…1 МПа, F 35, деформации усадок не более – 0,30 мм/м; водопоглощение по капиллярному подсосу равно 0,37 кг/м^2*ч^{0,5}, гигроскопичность не более 10%, водостойкость не менее 0,67, коэффициент теплопроводности не более 0,29 Вт/(м*^{0}С), коэффициент паропроницаемости не более 0,23 г/м·ч·Па.

Библиографический список

1. Ваганов, А. П. Ксилолит. Производство и применение / А.П. Ваганов. – М.: Госиздат, 1959. – 144 с.

2. Практическое руководство. Штукатурка. Материалы, техника производства работ, предотвращение дефектов / Хельмут Росс и Фридман Шталь. Пер. с нем. – СПб.: РИА «Квинтет», 2006. – 274 с.

3. Цементы, бетоны, строительные растворы и смеси. Часть 2: Справочник / Ю.А. Беленцов, В.Н. Вернигорова, В.С. Демьянова и др.; под ред. П.Г. Комахова. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 612 с.

4. Сухие строительные смеси. Бетоны. Материалы и технологии (Серия «Строитель»): Справочник. – М.: Стройинформ, 2007. – 828 с.

5. Цементы, бетоны, строительные растворы и смеси. Часть 2: Справочник / Ю.А. Беленцов, В.Н. Вернигорова, В.С. Демьянова и др.; под ред. П.Г. Комахова. – СПб.: НПО «Профессионал», 2009. – 612 с.

6. Горшков, В.С. Термография строительных материалов. / В.С. Горшков. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1968. – 238 с.

7. Егоров-Тисменко, Ю.К. Кристаллография и кристаллохимия / Ю.К. Егоров-Тисменко, В.С. Урусов. – М.: КДУ, 2005. – 592 с.

8. ТУ 5745-004-70828456-2005. Магнезиальное вяжущее. – Челябинск, 2006. – 6 с.

9. ГОСТ 7759-73. Магний хлористый технический (бишофит). Технические условия. – М.: Изд-во стандартов, 1973. – 7 с.

10. ТУ 2152-005-53561075-03. Магний хлористый. Раствор природного бишофита. – Волгоград, 2004. – 4 с.

11. ГОСТ 9757-90. Гравий, щебень и песок искусственные пористые. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. – 8 с.

12. ГОСТ 9758-86. Заполнители пористый неорганические для строительных работ. Методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2006. – 43 с.

13. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.

К содержанию

УДК 624.01.001.42 + 69.056.52/.53

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАМОНОЛИЧЕННЫХ УЗЛОВ ПАНЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Ю.А. Ивашенко, В.Д. Мельников

Приведены результаты исследований, получены коэффициенты надежности и определена деформативность четырех узлов сборно-монолитной системы.

Ключевые слова: испытание, панельная система, сборно-монолитные узлы.

Испытание проводилось в связи с изменением опирания плит в сборно-монолитном узле панельной системы.

Предполагается несущую систему создавать из панелей стен размером 1200 Х 2800 мм и многопустотных плит перекрытий размером – 1200 Х (3000–5000) 220 (160) мм. Панели стен и плиты перекрытий между собой объединяются в неразрезную систему замоноличиванием стыков, имеющих рабочую арматуру.

Такая система обладает рядом достоинств:

- возможность получения разнообразных планировочных решений;
- повышение прочности и жесткости стыков (горизонтальных и вертикальных) за счет их армирования и повышения качества заполнения их монолитным бетоном с последующим контролем прочности и качества;
- повышение прочности и жесткости стыков обеспечивает возможность увеличения высот зданий.

Цель испытаний состояла в следующем:

1) определить вид и характер разрушения стыка;
2) определить несущую особенность (прочность) стыка;
3) определить дефордативность стыка;
4) определить прочность стыка при передаче нагрузки с плит перекрытий на панели стен.

Особенность конструкции образцов № 1 и 2 состоит в том, что в их конструкциях используются плиты перекрытия толщиной 220 мм. В образцах № 3 и 4 используются плиты перекрытия толщиной 160 мм.

При испытании предполагалось, что вследствие неточности изготовления элементов, дефектов монтажа и передачи нагрузок возникает внецентренное сжатие. Для этого передача нагрузки на панель стены осуществлялась с эксцентриситетом 15 мм (для образца № 1 точка приложения силы смещалась в сторону плиты перекрытия, для образцов № 2, 3 и 4 – в сторону наружной стены).

Результаты испытаний по определению прочности бетона, а также средние деформации перед разрушением приведены в таблице 1. У всех образцов был хрупкий характер разрушения.

Коэффициент безопасности по нагрузке на перекрытие рассчитывался как отношение фактической силы к расчётной (800 кгс/м^2). Фактическая нагрузка рассчитывалась с учетом действия поперечной силы от собственного веса плиты и укладки блоков ФБС первого и второго слоя. В образце №4 была обнаружена вертикальная трещина на расстоянии 300 мм от опоры (стены), поэтому плита перекрытия не нагружалась.

Для стеновой панели коэффициент безопасности по нагрузке принимался равным 1,60, и рассчитывалось количество этажей, которое стык сможет выдержать.

Таблица 1

	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
Проч. СП, МПа	33,5 (ИПС)	33,8 (ИПС)	35 (ИПС) 45,8 (куб)	42,1 (ИПС) 41,9 (куб)
Проч. ПП, МПа	35 (ИПС)	31,6 (ИПС)	62,3 (ИПС)	57 (ИПС)
Проч. монолит. бет. МПа	31 (ИПС) 33 (куб)	32,6 (ИПС) 32,6 (куб)	33,5 (куб)	34,2 (куб)
Разруш. нагрузка, тс	150	140	110	95
Выдержка, мин.	10	15	10	20
Средние деформации перед разрушением				
И 1(7), мм	0,27 (раст)	0,24 (раст)	0,56 (раст)	0,30 (раст)
И 2(8), мм	0,18 (сж)	0,20 (сж)	0,07 (сж)	0,13 (раст)
И 3(6), мм	0,88 (сж)	0,50 (сж)	0,37 (сж)	0,23 (сж)
И 4(5), мм	0,57 (сж)	1,01 (сж)	1,53 (сж)	1,10 (сж)

Деформативность стыка определялась сравнением замеренных деформаций перед разрушением с нормируемыми предельными значениями по СП 52-101-2003: при сжатии, при растяжении . Среднее опытное значение вертикальных деформаций – среднее арифметическое между показаниями приборов И 3(6) и +И 4(5). среднее теоретическое значение вертикальных деформаций рассчитывалось по формуле:

Результаты расчётов коэффициентов безопасности по нагрузке на перекрытие, стеновую панель, а также расчёта деформативности стыка представлены в таблице 2.

Для вычисления теоретической прочности стыка от действия нагрузки на стеновую панель необходимо знать величину эксцентриситета вертикального усилия, передающегося на стык, которая вычисляется из системы уравнений.

Таблица 2

	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
на ПП	2,72	2,29	1,83	–
Кол-во этажей, при = 1,60 на СП	42	39	28	24
Отнош. фактич. деформаций к теоретич.	0,73	0,76	1	0,94

Прочность стыка с учетом эксцентриситета определяется по формуле СП 52-101-2003 (П. 6.1 и 6.2).

Для всех четырех стыков было получено теоретическое значение эксцентриситета, сравнимое с опытным, поэтому при вычислении прочности стыка необходимо было учитывать эксцентриситет, возникающий от действия нагрузок на стеновую панель. При учете длительной нагрузки и продольной арматуры несущая способность стыков увеличивалась. Коэффициенты безопасности прочности стыков представлены в таблице № 3.

Теоритическое вычисление прочности стыка от действия нагрузки на перекрытие проводилось с использованием формул СП 52-101-2003 (П.6.71). Теоретическое усилие рассчитывалось по формулам:

$$Q_{b1} = 0{,}5\, R_{lt} \cdot \frac{bh_0}{2} \text{ и } Q_b = \frac{\varphi_{b2} \cdot R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2}{2 \cdot C_{max}}.$$

Коэффициенты безопасности прочности стыков от действия нагрузки на перекрытие также представлены в таблице 3. Прочность на действие поперечной силы образца № 4 не определялась, поскольку плита перекрытия не была нагружена блоками ФБС из-за наличия вертикальной трещины на расстоянии 300 мм от опоры (стены).

Таблица 3

	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4
на СП	1,97	1,97	1,50	1,20
на ПП	1,66	1,39	1,20	–

Выводы

1. Испытанные образцы стыка обладают необходимой безопасностью, при нагружении панелей стен и перекрытий, за исключением образца №4, в котором перед испытаниями была обнаружена трещина.

2. Испытанная конструкция стыка обладает деформативностью (податливостью), которую необходимо учитывать при расчете несущей системы здания.

3. При расчете прочности стыка на действие длительной нагрузки на стеновую панель необходимо учитывать увеличение эксцентриситета.

Библиографический список

1. СП 52–101–2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. – М.: ГУП «НИИЖБ» Госстроя России, 2004. – 54 с.

2. Лишак, В.И. Прочность и жесткость стыковых соединений панельных конструкций. Опыт СССР и ЧССР / В.И. Лишак, Е. Горачек, Д. Пуме и др. – М.: Стройиздат, 1980. – С. 121–144.

К содержанию

УДК 666.94.052.6

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ДОБАВОК С МЕТАКАОЛИНОМ НА СУЛЬФАТОСТОЙКОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

А.А. Кирсанова

Исследовано влияние добавок-ускорителей включающих метакаолин на структуру и свойства бетонов. В качестве ускорителей использовали высокоактивные минеральные добавки – микрокремнезем и метакаолин. Выявлено, что наиболее эффективное влияние на свойства цементного камня и его стойкость к сульфатной коррозии оказывают комплексные добавки включающие микрокремнезем, метакаолин и суперпластификатор СП-1.

Ключевые слова: добавки-ускорители, метакаолин, микрокремнезем, долговечность, сульфатостойкость, сульфатная коррозия.

В современном строительстве наиболее технологичным, экономически целесообразным и универсальным способом регулирования свойств строительных смесей, растворов и бетонов является применение различных модифицирующих добавок. Промышленность строительных материалов в связи с ухудшением экологической обстановки, освоением районов с агрессивными грунтовыми водами и повсеместном применении бетонных изделий на промпредприятиях, активно расширяет использование добавок-ускорителей твердения, с целью получения высокой прочности и долговечности бетонов. Одним из основных показателей долговечности бетонов является стойкости материала к сульфатной коррозии.

Стойкость к сульфатной коррозии бетона напрямую зависит от его плотности, наличия пористости и ее характера, состава гидратных фаз.

Таким образом, целью настоящего исследования стало изучение влияния ранее разработанных комплексных добавок на основе метакаолина (МТК) [1] на получение цементного камня с высокой ранней прочностью и стойкостью к сульфатной коррозии.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

– изучить влияние комплексных добавок на основе МТК на кинетику набора прочности цементного камня;

– оценить влияние комплексных добавок на особенность формирования структуры цементного камня;

– исследовать влияние комплексных добавок на основе МТК на сульфатостойкость цементного камня.

В работе использовали:

– МТК, производства ЗАО «Пласт-Рифей» с активностью 1460 мг Са(ОН)2/г, месторождение Журавлиный Лог, ТУ 5729-095-51460677-2009;

– гранулированный микрокремнезем (МК) г. Новокузнецк в соответствии с ТУ 5743-048-02495332-96, с пуццолановой активностью 1575 мг/г;

– суперпластификатор СП-1 производства ОАО «Полипласт» г. Новомосковск, ТУ 5870-005-58042865-2005;

– цемент производства ЗАО «Невьянский цементник» марки 500Д0, с НГ 24 %;

– кварцевый песок производства ЗАО «Завод автоклавного газобетона» Белоносовского участка, Мк=1,8.

Для проведения исследований кинетики набора прочности цементного камня с применением добавок на основе метакаолина, из теста нормальной густоты готовили образцы-кубы с ребром 2 см, которые твердели и набирали прочность при температуре 20±20 С с влажностью 95–100 ^{0}С.

Ранее проведенными исследованиями [1] было установлено, что введение комплексной добавки на основе метакаолина У-ЖЛ (2,5–3 %МТК+0,6–0,9 %СП-1) в первые сутки твердения увеличивает прочность в 3 раза, по сравнению с бездобавочным составом (рис. 1). Применение МК в комплексе и повышение его дозировок от 5 % (УМ-ЖЛ) до 10 % (УМД-ЖЛ), снижает скорость набора прочности цементного камня (рис. 1), что вероятно, связано с замедлением процесса гидратации, а также с образованием дефицита ионов кальция, так как все рассматриваемые АМД активно его поглощают [2, 3].

В возрасте 28 суток добавки позволяют получить цементный камень с прочностью на 70 % выше, по сравнению с бездобавочным составом. Применение добавки УМ-ЖЛ с повышенным содержанием МК приводит к некоторому снижению набора прочности (рис. 1).

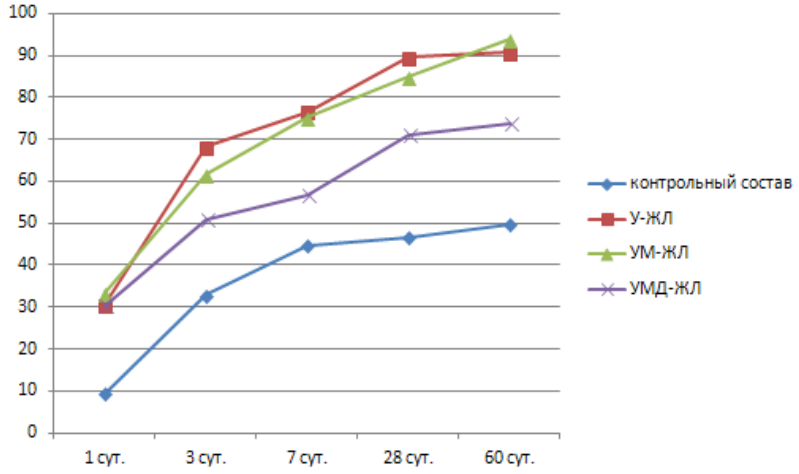


Рис. 1. Кинетика набора прочности цементного камня

Исследование структуры цементного камня позволили установить, что введение всех комплексов снижает открытую пористость цементного камня (рис. 2) и создает более плотную упаковку за счет заполнения межзернового пространства, в следствии мелкой дисперсности минеральных добавок и снижении В/Ц отношения, а также за счет снижения скорости гидратации и образования гидратных фаз в виде плотно спаянных пластинок,

гексагональных и кубических гидроаллюминатов и гидроаллюмосиликатов, спаянных субмикрокристаллическим гелем, что подтверждается результатами электронно-микроскопического анализа (рис. 3).

Для испытаний на сульфатостойкость изготовлялись цементно-песчаные образцы размером 20х20х120 мм, которые твердели 3 суток во влажной среде и 25 суток в воде согласно ГОСТ 27677-88. Концентрация раствора принята 10000 мг/л = 10г/л.

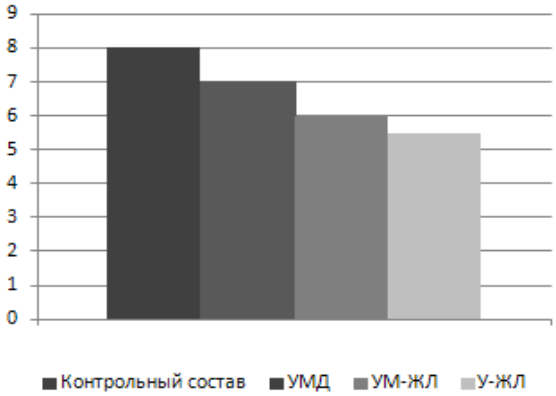
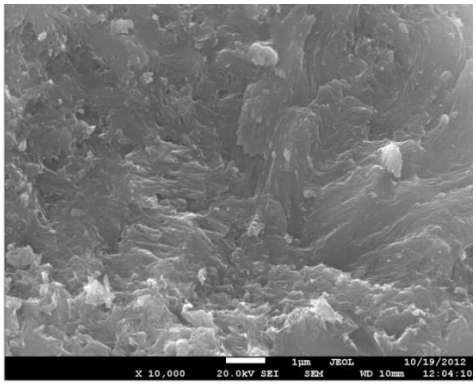
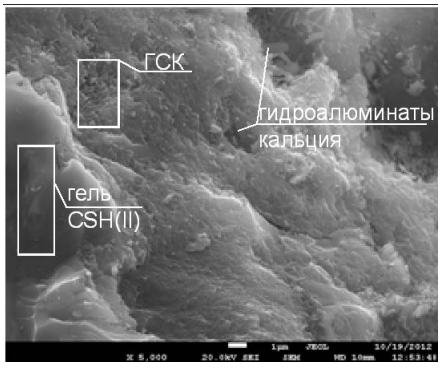


Рис.2. Открытая пористость цементного камня



а)



б)

в)

Рис. 3. Структура цементного камня с модификатором:
а) У-ЖЛ; б)УМ-ЖЛ; в) УМД-ЖЛ

Применение добавки метакаолина в незначительных дозировках до 3 % не при водит к уменьшению сульфатостойкости и находиться на уровне эталонных образцов без применения добавок. Введение добавки метакаолина более 3 % от массы цемента (рис. 4, 5) приводит к увеличению алюминатов в цементной системе и снижению сульфатостойкости цементного камня Кх.с.< 0,9 уже после первого месяца, так как сульфатная коррозия связана с взаимодействием сульфат-ионов с алюминий содержащими фазами цемента и цементного камня в присутствии гидроксида кальция с образованием эттрингита и гипса. Постоянная перекристаллизация в структуре камня алюминатных фаз под действием сульфатов приводит к нарушению контактов в цементном камне и к сбросам прочности, в результате в цементном камне образуются микро- и макротрещины приводящие к разрушению бетона [4, 5].

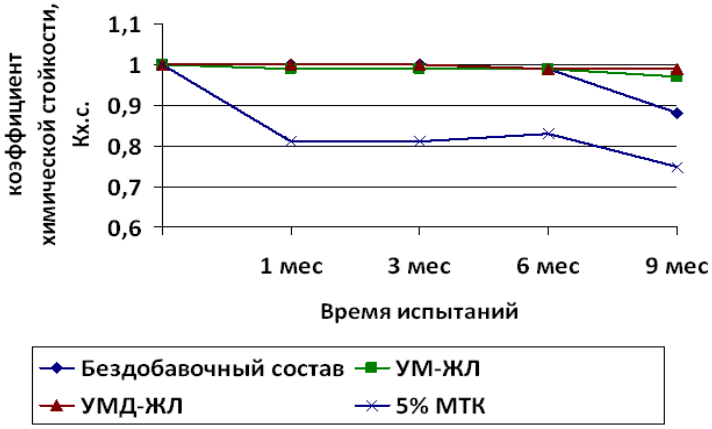


Рис. 4. Влияние комплексных добавок на изменение прочности при изгибе (Кх.с.) в условиях сульфатной среды

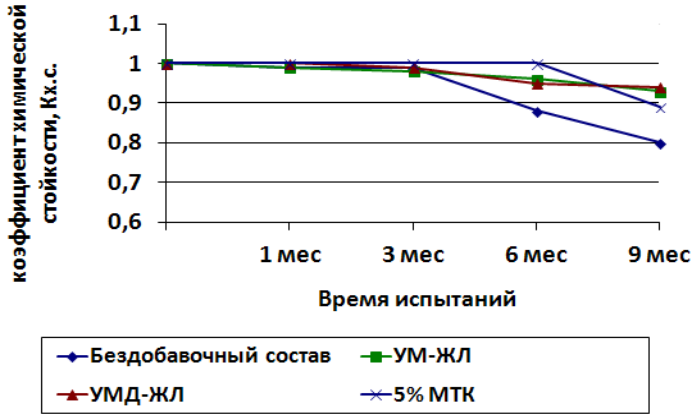


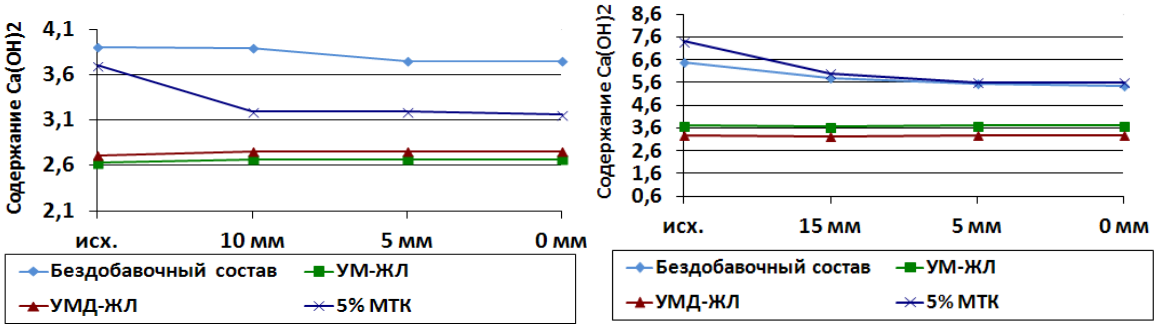
Рис. 5. Влияние комплексных добавок на изменение прочности при сжатии (Кх.с.) в условиях сульфатной среды

Применение добавки МК совместно с пластификатором СП-1 и МТК способствует образованию стабильных гидроалюминатов и гидрогранатов в цементом камне, создавая более плотную структуру цементного камня,

что подтверждается методами РФА и электронной микроскопии (рис. 3б, в), все это приводит к снижению проницаемости цементного камня и увеличению его стойкости к сульфатной коррозии (рис. 4, 5).

Кроме коэффициента химической стойкости к сульфатной коррозии, важным является показатель изменения массы образцов, который должен быть не более 1 %. Применение добавки метакаолина около 5 % приводит к снижению массы более 1 % уже на 3 месяц нахождения образцов в условиях сульфатной среды, что совпадает с бездобавочным составом. Введение в цементно-песчаный состав добавок УМ-ЖЛ и УМД-ЖЛ до 9 месяцев проведения исследований изменения по массе не показали.

Изменение содержания гидроксида кальция оценивали с помощью ДТА по мере проницаемости сульфатного раствора в цементный камень. Пробу брали начиная с поверхности балочки к середине на глубину 15 мм (рис. 6 а, б). Согласно данным приведенным на графиках, введение МТК около 5 % приводит к активизации коррозии цементного камня за счет увеличения количества алюминатов. Коррозия цементного камня без добавок и с применением МТК в дозировке 5 % от массы цемента, составляет примерно 10 мм. Введение в комплекс «МТК+СП-1» добавки МК приводит к повышению стойкости цементного камня против сульфатной коррозии, что подтверждается стабильным содержанием гидроксида кальция на всем периоде испытаний (рис. 6 а, б).



а) б)

Рис. 6. Изменение содержания в цементном камне $Ca(OH)_2$ в сульфатной среде через: а) 3 месяца; б) 6 месяцев

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

– применение всех добавок приводит к ускорению набора прочности в ранний период (на первые сутки прочность выше в 3 раза по сравнению с контрольным составом) и в возрасте 28 суток (на 70 % выше по сравнению с контрольным составом);

– комплексные добавки У-ЖЛ, УМ-ЖЛ и УМД-ЖЛ можно отнести к добавкам-ускорителям твердения и повышающим прочность, согласно ГОСТ 24640-91;

– комплексные добавки У-ЖЛ, УМ-ЖЛ и УМД-ЖЛ приводят к формированию более плотной структуры цементного камня с низкой открытой пористостью;

– введение МТК должно производиться в строго определенных дозировках не превышающих 3 %, для повышения коррозионной стойкости цементного камня по отношению к сульфатам совместно с МТК и СП-1 необходимо вводить МК или другую активную не содержащую алюминатов пуццолану.

Библиографический список

1. Кирсанова, А.А. Комплексный модификатор с метакаолином для получения цементных композитов с высокой ранней прочностью и стабильностью / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных и др. // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Строительство и архитектура». – 2013. – Вып. 13, № 1. – С. 49–57.

2. Дворкин, Л.И. Метакаолин в строительных растворах и бетонах / Л.И. Дворкин, Н.В. Лушникова, Р.Ф. Рунова и др. – Киев: Издательство КНУБіА, 2007. – 215 с.

3. Крамар, Л.Я. Влияние добавки микрокремнезема на гидратацию алита и сульфатостойкость цементного камня / Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, Л.С. Талисман и др. // Цемент. – 1989. – № 6. – С. 14–17.

4. Сульфатостойкость бетонов с добавками электролитов / В.Б. Грапп, Т.И. Розенберг, С.В. Шестоперов // Конструкции и материалы в строительстве. – Рига: авТотс, 1982. – С. 57–70.

5. Москвин, В.М. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты / В.М. Москвин, С.Н. Алексеев, Ф.М. Иванов, Е.А. Гузеев. – М.: Стройиздат, 1980. – 536 с.

К содержанию

УДК 69.001.5

ЗЕЛЕНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

А.В. Киянец

Подтверждается актуальность разработки и внедрения отечественных стандартов по «зеленым» зданиям. Приводиться обзор ведущих современных мировых «зеленых» стандартов в строительстве и архитектуре, а также анализ их требований.

Ключевые слова: «зеленое» строительство, «зеленое» здание, «пассивное» здание, энергоэффективность в строительстве.

Термин «зеленое строительство» в общепринятой мировой практике означает такой подход к проектированию и возведению зданий, сооружений, а также архитектурной среды, при котором максимально учитываются требования энергоэффективности, ресурсосбережения и экологической безопасности. Часто люди, не являющиеся специалистами в данной области, трактуют данный термин буквально, и понимают по ним проблемы благоустройства и озеленения территорий, ландшафтного дизайна и т.д.

Безусловно, это очень близкие и связанные между собой вопросы, однако «зеленое строительство» это более широкое понятие, это новое, динамично развивающееся направление архитектуры и строительства, связанное с пересмотром современным обществом приоритетов своего роста.

Начиная с 1974 года после мирового энергетического кризиса в мировой строительной практике появилось направление, получившее название «строительство энергоэффективных зданий», и довольно интенсивно начали создаваться научные основы проектирования таких зданий, которые не только не утратили актуальности до настоящего времени, но востребованность в которых постоянно возрастает. Начиная с 1980-х годов, особое внимание уделяется экологической безопасности жилища и качеству внутреннего воздуха. Формулируется следующая закономерность: среди энергоэффективных технологий приоритет имеют те, которые улучшают экологическую безопасность жилища. С конца 1990-х годов к требованиям по энергоэффективности и экологичности добавляются требования, которые обеспечивают защиту окружающей среды от разрушения [2].

Разработка «зеленых» стандартов началась в 90-е годы прошлого столетия. В настоящее время число «зеленых» стандартов, применяемых в международной практике к зданиям (проектирование, строительство и эксплуатация) составляет несколько десятков. Выбор критериев оценки, как и собственно рейтинговая оценка зданий, различен. Стоит отметить, что разрабатывались они с учетом национальных особенностей и изначально применялись в стране-разработчике, а затем стали применяться по всему миру.

В технически развитых странах получили распространение рейтинговые системы оценки качества проектных и строительных решений зданий по критериям энергоэффективности, экологии, комфортности, ресурсосбережения.

Среди наиболее совершенных национальных рейтинговых систем следует отметить американскую – LEED (The Leadership in Energy and Environmental Design), английскую – BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), немецкую – DGNB [2].

Актуальность социально-экономических и технологических факторов развития «зеленого строительства» в России не вызывает сомнений. Так же, как и необходимость создания своих национальных «зеленых стандартов» и рейтинговой системы оценки, отвечающих нашей нормативно-методической базе, национальным приоритетам экономики, энергетики, экологии, учитывающей значительную климатическую и ресурсную дифференциацию регионов страны.

Поэтому в нашей стране в 2011 году был также разработан и утвержден аналогичный стандарт – это стандарт организации Национального объединения строителей СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011 «Зеленое строительство». Здания жилые и общественные. Рейтинговая оценка среды обитания [1].

Данный стандарт является обязательным для применения в тех строительных организациях, которые входят в состав СРО, объединенных НОСТРОЙ. Но, к сожалению, НОСТРОЙ объединяет лишь организации непосредственно осуществляющие строительство. Хотя данный стандарт был бы более интересен именно проектировщикам и архитекторам.

Деятельность национальных рейтинговых систем в области энергоэффективного и экологичного строительства координируется Международным комитетом по так называемым «зеленым зданиям» (Green Building Council). В 2009 г. было зарегистрировано Российское представительство этого комитета – Совет по экологическому строительству.

В последнее время федеральные и региональные органы власти, общественные организации проявляют высокую заинтересованность в продвижении программ строительства зданий высокой энергетической и экологической эффективности.

Рассмотрим требования рейтинговой системы оценки «зеленых зданий» в части повышения их энергоэффективности. Справочники содержат следующие разделы, относящиеся к повышению энергоэффективности зданий:

1. Уменьшение потребности в использовании энергии – имеется в виду применение архитектурных, инженерных и конструктивных энергосберегающих решений. По каждому из этих направлений сформулированы рекомендации и приводятся ссылки на соответствующие стандарты, публикации и исследования.
2. Использование возобновляемых источников энергии – имеются в виду, прежде всего, технические решения интегрирования солнечных коллекторов, тепловых насосов, биотехнологий и т. п. в систему энергоснабжения здания.
3. Оптимальное использование затребованной энергии. Это наиболее творческий раздел, предполагающий энергетическое сравнение различных технологий отопления, вентиляции, кондиционирования, холодоснабжения и основанный, главным образом, на результатах математического моделирования здания как единой энергетической системы.

Собственно говоря, перечисленные выше направления повышения энергетической эффективности зданий были известны достаточно узкому кругу специалистов, также как научные, методические технические принципы их реализации, авторами которых были эти специалисты. Новые знания в данном случае состоят в том, что должна быть создана система новых нормативных документов, система методических и научных разработок, а также программы обучения, позволяющие специалисту наилучшим образом достичь поставленной цели повышения энергетической эффективности зданий в соответствии с изложенными выше требованиями. Но самое главное состоит в том, что все специалисты, которые хотят соответ-

ствовать требованиям проектирования XXI века в части создания комфортной экологичной среды обитания человека, должны пройти обучение и сдать соответствующие экзамены на сертификат, например, LEED AP, BREEAM или другой системе сертификации [2].

Иногда среди инвесторов, глубоко не знакомых с системой «зеленых зданий», возникает отрицательное отношение к системе сертификации, так как, по их мнению, это приводит к удорожанию объекта. Это не так. Согласно мировой практике, коммерческая стоимость объекта при его сдаче в аренду или продаже существенно выше, чем несертифицированного здания, так как действительно сертифицированный объект является высокоэффективным зданием в отношении комфорта среды обитания, экологической безопасности и минимизации энергопотребления. Например, в настоящее время в США в условиях кризиса застройщики, рекламируя жилье, построенное с учетом строгих экологических стандартов, утверждают, что «зеленые» строительные технологии идут на пользу не только окружающей среде, но и кошельку домовладельца.

Таким образом, «зеленые стандарты» строительства – одно из самых перспективных направлений развития не только строительного комплекса, но и социальной среды общества. «Зеленое» строительство получило широкое распространение в последнее десятилетие в США (LEED), в Великобритании (BREEAM), в Германии (NDBG) и еще более, чем в 40 странах (Австралия, Канала, Индия и др.). Уже более 100 тыс. зданий в мире сертифицировано по «зеленым стандартам». Первые пилотные объекты в нашей стране уже заявлены на сертификацию по этой системе стандартов, включая объекты Сочинской Олимпиады.

Библиографический список

1. Зеленое строительство. Здания жилые и общественные. Рейтинговая оценка среды обитания. Стандарт организации СТО НОСТРОЙ 2.35.4-2011. – М.: ОАО «ЦПП», 2011. – 58 с.

2. Табунщиков, Ю.А. «Зеленые здания» - новые знания для архитекторов и инженеров / Ю.А. Табунщиков // Устойчивая архитектура: настоящее и будущее. Труды международного симпозиума, 17–18 ноября 2011 г. Научные труды Московского архитектурного института (государственной академии) и группы КНАУФ СНГ. – М.: ООО «Аделант», 2012. – С. 520 – 526.

К содержанию

УДК 72.03(09)(086.6) + 726:27-523.4(470.56)

ЦЕРКВИ ЮГА ОРЕНБУРГСКОЙ ГУБЕРНИИ ПЕРВОЙ ЧЕТВЕРТИ XIX ВЕКА

Т.В. Колобаева

Работа посвящена строительству церквей южной части Оренбургской губернии первой четверти XIX века. Выявлены черты объёмно-планировочных решений зданий этого периода. Выполнены описания храмов.

Ключевые слова: архитектура каменных православных храмов Оренбургской губернии первой четверти XIX века, классицизм.

16 октября 1799 г. высочайшим собранием Святейшего Синода была учреждена Оренбургская Епархия. На её территории площадью около 320 000 кв. вёрст, к тому времени было возведено 205 церквей. Южные земли Оренбургской губернии, как наиболее удобные для земледелия, были отданы во владение помещиков-дворян. Их заселили помещичьи крестьяне.

Конец XVIII века – первая четверть XIX века в центральной России время развития строгого классицизма. Характерные архитектуре классицизма каноны – соподчинённость, иерархичность образной системы олицетворяли совершенство, гармонию, спокойствие. Направленность классицизма на «вечные», вневременные эстетические ценности, на идеал и порядок, «стремление к строгости и величавости противостояли дисгармонии окружения, суете, тревоге за будущее». [1, с. 55]

Основателем московского направления, был Василий Иванович Баженов (1738–1799), выпускник Петербургской Академии художеств. Его творчество относят к периоду раннего классицизма, но именно его деятельность осуществила переход к строгому классицизму 80-х и 90-х годов. В. Баженов создал архитектурную школу, которую прошли многие зодчие, работавшие уже в XIX веке. Последователем его идей стал представитель зрелого классицизма Матвей Фёдорович Казаков (1738–1812). Свои произведения М. Казаков создавал на композиционных приёмах, утверждённых В. Баженовым, но в целом его творчество отличает большая строгость. В 80–90-е годы он выполнил немало построек по заказу частных лиц. Влияние творчества М. Казакова на Южном Урале прослеживается в церквях Введения во храм Пресвятой Богородицы (осв. 1819 г.) г. Миньяр, и Сретения Господня (1820 г.) в бывшем заводском селе Илек. Есть предположение, что их возвели по проектам Е.Г. Малютина, ученика М.Ф. Казакова.

Указами Российского правительства предписывалось строительство церковных зданий, на льготных для помещиков условиях, часть строительных работ оплачивалось из государственной казны. Одним из первых с прошением о разрешении на постройку храма обратился Александр Павлович Мансуров.

Село Спасское Оренбургской губернии основали крепостные крестьяне подполковника А.П. Мансурова в 1761 году, переведённые им из Медынского и Масальского уездов Калужской губернии. Уже в чине отставного, генерал-лейтенант А.П. Мансуров в 1804 году получил разрешение и приступил к постройке церкви во имя Спаса Нерукотворного образа (рис. 1). В 1814 г. её здание было закончено. В мае 1815 года Анна Николаевна Мансурова, после смерти мужа, обратилась с просьбой к Епископу Оренбургскому и Уфимскому об освящении храма. 16 июня 1815 года храм был освящён. Каменное здание не отапливалось, имело размеры: в длину 7 саженей (14,93 м), в высоту до карниза 3 сажени (6,40 м), высоту колокольни с притвором 7 сажен (14,93 м). К 1859 г. в ней сложили три кирпичные печи с дымоходами [2].

Рис. 1. Церковь Спаса в селе Спасское (фото 2007 г.)

Здание церкви в стиле классицизма, четырёхчастное: алтарь, храм, трапезная, колокольня над притвором, сильно вытянуто по главной оси восток-запад 36,7 м. Основной объём храма в виде четверика, с симметрично расположенными по главной оси равными прямоугольными объёмами трапезной и алтаря. Северный и южный фасады храма украшены дорическими портиками в четыре колонны. Такой же портик исполнен на восточном фасаде алтаря. На четверик храмового столпа поставлен в его ширину цилиндрический барабан, завершённый полусферой купола. Купол закончен шлемовидной главой на невысокой цилиндрической шее. Фасады алтаря, храма и трапезной двухсветные. Нижний свет состоит из прямоугольных проёмов, у которых соотношение высоты к ширине составляет 2:1. Окна верхнего света, также прямоугольные по своим пропорциям при-

ближены к квадрату. На барабане имеется двенадцать полуциркульных окон, над которыми выполнен профилированный антаблемент из горизонтальных тяг. Все оконные проемы обрамлены простыми профилированными наличниками. Круглые гладкие стволы колонн с энтазисом имеют капители с пояском. База колонн состоит из белокаменной плиты и вала.

Плоскости стен перехода, соединявшего притвор с трапезной, имели по три высоких полуциркульных окна. Их украшали с севера и юга по четыре небольшие трёхчетвертные пилястры, расположенные в простенках между окнами. Западный фасад притвора украшал, отстоящий на небольшом расстоянии от стены, портал с двумя дорическими колоннами. Прямоугольный в плане притвор имел лестницу, ведущую на цилиндрический звон колокольни. Переходной частью между ними служил невысокий восьмигранник, имевший по сторонам света четыре круглых окна. Цилиндрический звон колокольни украшали пилястры, расположенные по две в простенках между проёмами. Венчающий стены антаблемент состоит из двух частей: фриза и профилированного карниза.

Хотелось бы упомянуть о храме (рис. 2) села Жилинка, расположенном неподалёку от с. Спасское. Сохранившаяся церковь периода классицизма находится в плачевном состоянии. Этот памятник, также имеет четырёхчастное строение по типу «корабль», но с более сложным решением объёма. По наличию сохранившихся архитектурных деталей можно судить о более богатом, чем у церкви Спаса, решении декоративного оформления фасадов.

Рис.2. Храм в селе Жилинка (фото 2007г.)

Ещё одним примером усадебной церкви является небольшая каменная церковь Преподобного Алексея с. Репьёвка (рис. 3) Тюльганского района Оренбургской области. Она построена в 1839. Её объём украшен с запада, севера и юга четырехколонными тосканскими портиками. Здание состоит из четырёх равноширокх помещений: притвора, прямоугольного пред-

храмья, квадратного храма, прямоугольного алтаря. Северный и южный фасады главного помещения имеют на вертикальной оси симметрии, по одному входному проёмом. Входы акцентированы невысокими тосканскими портиками, по длине равными основному помещению церкви. Антаблемент портиков завершён фронтоном, карниз которого расположен на одном уровне с венчающими карнизами предхрамья и алтаря.

Рис. 3. Алексеевская церковь с. Репьёвка

Основным местом строительства церквей в стиле классицизма первой трети XIX века были дворянские усадьбы Оренбургской губернии. Рассмотренные церкви выстроены по планировочному типу «корабль». Объёмная композиция церквей имеет четкое ясное построение, рассчитанное на чистоту восприятия силуэта, характерное для русского классицизма.

Библиографический список

1. Хайт, В.Л. Классика – навсегда!? / В.Л. Хайт // Российская академия архитектуры и строительных наук «Проблемы Российской архитектурной науки» Сборник научных трудов членов отделения архитектуры РААСН. – 1986. – С. 54–57.

2. ГАОО, ф. 173, оп. 9, д. 45/а, Клировые ведомости 1817–1904 г.

К содержанию

УДК 514.142.24

КВАДРАТИЧНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА, УСТАНОВЛЕННОЕ ДВУМЯ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

В.А. Короткий

Рассмотрено функциональное соответствие, установленное между элементами совмещенных точечного и линейчатого пространств, в котором точке соответствует линия пересечения полярных плоскостей в поляритетах, заданных двумя произвольными квадриками. Показано, что прямолинейному ряду точек ставится в соответствие семейство образующих линейчатой поверхности второго порядка. Дан пример применения рассмотренного соответствия в курсе начертательной геометрии.

Ключевые слова: линейчатое пространство, пучок поверхностей второго порядка, поляритет, полярная плоскость, квадратичная кремонова инволюция.

Даны две поверхности второго порядка (ПВП, квадрики) Φ_1, Φ_2 с уравнениями $F_1(x,y,z)=0$, $F_2(x,y,z)=0$, пересекающиеся по биквадратной кривой f. Поверхность Φ_λ с уравнением $\lambda F_1+(1-\lambda)F_2=0$ при любом значении параметра λ также проходит через f. Изменяя λ, получаем пучок (однопараметрическое множество) поверхностей второго порядка Ψ, включающий в себя исходные поверхности Φ_1 (при $\lambda=1$) и Φ_2 (при $\lambda=0$). Через любую точку пространства E^3 проходит единственная квадрика пучка Ψ.

В поляритетах, установленных квадриками Φ_1, Φ_2, произвольной точке M соответствуют полярные плоскости μ_1 и μ_2, пересекающиеся по прямой m (рис. 1). Рассмотрим отображение $m=\varphi(M)$, которое всякой точке M пространства E^3 ставит в соответствие прямую $m=\mu_1\cap\mu_2$. Функциональная взаимосвязь $m=\varphi(M)$ является в целом однозначной: произвольной точке M пространства E^3 соответствует единственная прямая m, за исключением особых точек F, каждая из которых индуцирует совпадающие полярные плоскости в поляритетах Φ_1, Φ_2; при этом положение прямой m становится неопределенным.

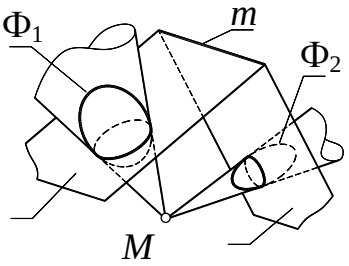


Рис. 1

Область определения (область отправления) функции $\varphi(M)$ – все трехмерное множество ∞^3 точек M пространства E^3. Область значений (область прибытия) – алгебраический комплекс K^3, выделенный из четырехмерного множества прямых L^4 указанием квадрик Φ_1, Φ_2 и алгоритмом $m=\varphi(M)$.

Существует и обратная функция $M=\varphi^{-1}(m)$, которая всякой прямой m из комплекса K^3 ставит в соответствие точку $M=n_1\cap n_2$ пространства E^3, где n_1, n_2 – взаимные поляры прямой m относительно квадрик Φ_1, Φ_2. Область оп-

ределения обратной функции совпадает с областью значений прямой функции, то есть с комплексом K^3, выделенным из L^4. Область значений обратной функции совпадает с областью определения прямой функции, то есть с множеством точек пространства E^3.

Обратная функция $M=\varphi^{-1}(m)$ является в целом однозначной: произвольной прямой m комплекса K^3 соответствует единственная точка M, за исключением особых прямых j, каждая из которых порождает совпадающие взаимные поляры $n_1 = n_2$ в поляритетах Φ_1, Φ_2; при этом положение точки M становится неопределенным.

Таким образом, рассматривается в целом взаимно однозначное соответствие множества ∞^3 точек пространства E^3 и множества ∞^3 прямых, входящих в комплекс K^3. Прямая функция $m=\varphi(M)$ выполняет *инъективное отображение* (*инъекцию*) элементов трехмерного точечного пространства E^3 в элементы четырехмерного линейчатого пространства L^4 (инъекция ограничена множеством K^3). Обратная функция $M=\varphi^{-1}(m)$ описывает *сюръективное отображение* (*сюръекцию*) множества прямых комплекса K^3 на множество точек пространства E^3. Прямой линии, не входящей в K^3, не соответствует ни одна точка в E^3 (рис. 2).

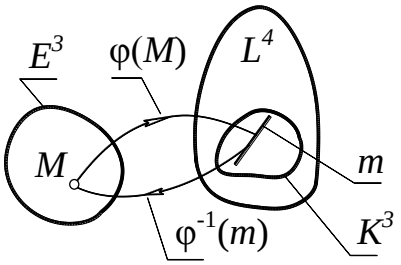


Рис. 2

Теорема 1. *Полярные плоскости произвольной точки M относительно всех квадрик пучка Ψ пересекаются по одной и той же прямой m.* Иначе говоря, любая пара квадрик пучка Ψ определяет одно и то же инъективное отображение $m=\varphi(M)$. Выделяемый из L^4 комплекс прямых K^3 полностью определен пучком Ψ, который в свою очередь вполне определен данными ПВП Φ_1, Φ_2.

Доказательство. Выделяем из пучка Ψ произвольную квадрику Φ_3. Отметив в E^3 произвольную точку M, найдем прямую m как образ точки M в отображении $m=\varphi(M)$ относительно данных квадрик Φ_1, Φ_2. Покажем, что прямая m как образ точки M в отображении $m=\varphi(M)$ не изменяется при замене Φ_1 или Φ_2 на квадрику Φ_3, произвольно выбранную из пучка Ψ.

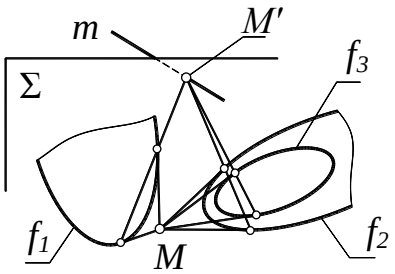


Рис. 3

Проведем через M произвольную плоскость Σ. В сечении пучка Ψ плоскостью Σ получаем пучок конических сечений ψ, в котором содержатся сечения $f_1=\Phi_1\cap\Sigma$, $f_2=\Phi_2\cap\Sigma$, $f_3=\Phi_3\cap\Sigma$ (рис. 3). Поляры точки M относительно f_1 и f_2 должны пересечься в точке $M'=m\cap\Sigma$ на прямой m. Действительно, поляры точки M представляют собой сечения плоскостью Σ полярных плоскостей μ_1, μ_2 точки M относительно Φ_1, Φ_2. Поскольку плоскости μ_1, μ_2 точки M пересекаются по m, то полученные в сечении Σ поляры также пересекаются на m.

Как известно [1], поляры точки M относительно всех конических сечений пучка ψ (в том числе – относительно f_3) должны пересечься в одной точке, а именно – в точке M' на прямой m, поскольку в этой точке пересекаются поляры точки M относительно сечений f_1, f_2.

Но поляра точки M относительно f_3 – это сечение полярной плоскости μ_3 произвольной секущей плоскостью Σ, проходящей через M. Следовательно, полярные плоскости μ_1, μ_2, μ_3 точки M относительно Φ_1, Φ_2, Φ_3 располагаются в пространстве таким образом, что в сечении этих плоскостей произвольной плоскостью Σ получаются прямые, пересекающиеся в одной точке. Такое возможно только в том случае, когда плоскости μ_1, μ_2, μ_3 пересекаются по одной прямой. Плоскости μ_1 и μ_2 пересекаются по m, следовательно, полярные плоскости μ_1, μ_2, μ_3 точки M относительно квадрик Φ_1, Φ_2, Φ_3 пересекаются по m. Но квадрика Φ_3 была произвольно выбрана из пучка Ψ. Следовательно, полярные плоскости точки M относительно *всех* квадрик пучка Ψ пересекаются по одной прямой, ч.т.д.

Рассмотрим образ линейчатого пространства, соответствующий прямолинейному ряду точек пространства E^3.

Теорема 2. *В функциональной зависимости $m=\varphi(M)$ прямолинейному ряду точек M пространства E^3 соответствует однопараметрическое множество прямых m, образующих линейчатую поверхность второго порядка* Θ. Очевидно, поверхность Θ «вложена» в комплекс K^3, выделенный из L^4 указанием пучка квадрик Ψ.

Доказательство. Проведем через прямую a, несущую ряд точек M, произвольную плоскость α, пересекающую квадрики пучка Ψ по пучку коник e_1, e_2, e_3,… (рис. 4). Пробегая прямую a, точка M индуцирует, в соответствии с зависимостью $m=\varphi(M)$, однопараметрическое множество прямых m (линейчатую поверхность Θ), пересекающихся с α в точках M'.

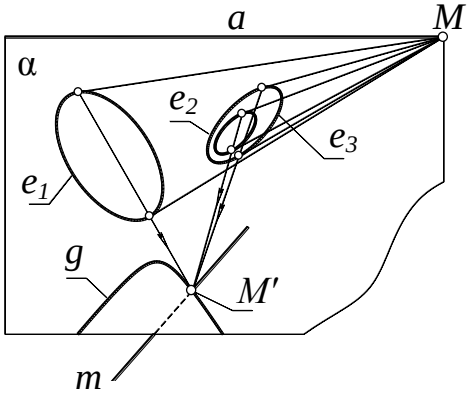


Рис. 4

Точка M' в плоскости α может быть получена как точка пересечения поляр точки M относительно коник пучка e_1, e_2, e_3,… Точечное соответствие $M \leftrightarrow M'$ – это квадратичная кремонова инволюция первого рода [1], в которой ряду точек на прямой a соответствует ряд точек на кривой второго порядка g. Кривая g (в рассматриваемом примере – гипербола) – гомалоид прямой a. На рис. 4 условно показана только одна ветвь гиперболы g.

Таким образом, точка M, пробегающая прямую a, порождает (в сечении поверхности Θ плоскостью α) кривую второго порядка g. Поскольку плоскость α – произвольная плоскость пучка с осью a, то любая другая плос-

кость этого пучка пересечет линейчатую поверхность Θ по кривой второго порядка. Но это означает, что Θ – поверхность второго порядка, ч.т.д.

Следствие из теоремы 2. *Отображение* $m=\varphi(M)$*, установленное пучком квадрик, расслаивается (в пучке секущих плоскостей с произвольно выбранной в пространстве* E^3 *осью) на квадратичные кремоновы инволюции первого рода.*

Отметим, что теорема, обратная теореме 2, не имеет места: семейству образующих m линейчатой поверхности второго порядка, *произвольно* выделенной из комплекса K^3 линейчатого пространства L^4, в точечном пространстве E^3 не соответствует прямолинейный ряд точек M. В этом случае обратная функция $M=\varphi^{-1}(m)$ описывает однопараметрическое точечное множество, заполняющее пространственную кривую четвертого порядка.

Рассмотрим образ линейчатого пространства, соответствующий плоскому точечному полю β пространства E^3. Поскольку всякой точке B, принадлежащей β, соответствует прямая линия b комплекса K^3, выделенного из L^4 указанием пучка квадрик Ψ, то двупараметрическое множество точек B выделяет из K^3, согласно функции $b=\varphi(B)$, алгебраическую конгруэнцию Kr^2 (двупараметрическое множество прямых линий).

Пример (теорема о перспективном расположении ПВП). *Если две невырожденные ПВП* Φ_1 и Φ_2 *соприкасаются в двух точках (действительных или мнимых), то в пространстве существуют четыре различные гомологии, устанавливающие взаимно однозначное соответствие между точками поверхностей* Φ_1 *и* Φ_2*.*

Доказательство сводится к исследованию квадратичного соответствия $m=\varphi(M)$: всякой точке M отвечает линия пересечения m ее полярных плоскостей в поляритетах, установленных квадриками Φ_1 и Φ_2. В этом преобразовании связке плоскостей с центром A на прямой m соответствует связка прямых с центром A' на той же самой прямой m. Полученное соответствие A-A', ... проективно и инволюционно. Двойные точки инволюции определяют на m центры S_1, S_2 искомых гомологий.

Библиографический список

1. Короткий, В.А. Квадратичное преобразование плоскости, установленное пучком конических сечений / В.А. Короткий // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 9–14.

К содержанию

УДК 514.185.2 + 004.92

ПРИЛОЖЕНИЯ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЧЕТЫРЕХМЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА К КОНСТРУИРОВАНИЮ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.А. Короткий

Рассмотрен графический алгоритм построения поверхности на замкнутом контуре, образованном плоскими кривыми линиями в четырехмерном пространстве. Показана возможность конструктивной реализации алгоритма на трехмерном эпюре с помощью средств современной компьютерной графики. Даны примеры построения поверхности на трехзвенном и четырехзвенном контурах.

Ключевые слова: определитель поверхности, образующая линия, замкнутый контур, пучок плоскостей, трехмерная графика, гиперэпюр.

Одним из способов формирования поверхности является разработанный в XIX веке ключевой способ. В этом способе определитель поверхности содержит условие («ключ»), задающий закон изменения формы образующей линии. Ключ проекционно связан с главными видами, что позволяет рассматривать чертеж с изображением ключа как чертеж поверхности в четырехмерном пространстве. Современная трактовка ключевых способов формирования поверхности как задачи начертательной геометрии четырехмерного пространства E^4 дана в работе [1].

Алгоритм построения поверхности в четырехмерном пространстве

Пусть в E^4 имеется образованный плоскими кривыми линиями четырехзвенный контур *ABCD*, на который надо «натянуть» поверхность.

1. Отмечаем точки пересечения $U=\sigma(AB)\cap\eta(CD)$, $V=\rho(AD)\cap\tau(BC)$ плоскостей противолежащих звеньев (рис. 1).

2. Между точками противолежащих звеньев устанавливаем взаимнооднозначное соответствие, описываемое некоторой *функцией соответствия* φ, которая каждой точке одного из звеньев ставит в соответствие единственную точку противолежащего звена (в соответствии с [1], выбираем *способ параметризации*). Пусть взаимнооднозначное соответствие точечных рядов звеньев *AB* и *CD* описывается некоторой функцией φ_1, а звеньев *AD* и *BC* – функцией φ_2.

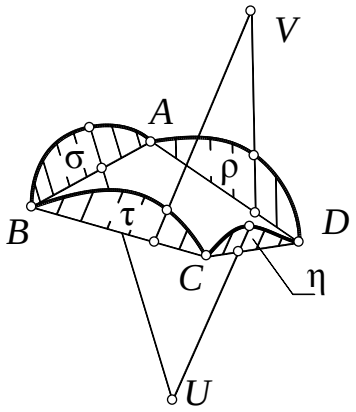


Рис. 1

3. Формируем два пучка вспомогательных плоскостей. Плоскости одного пучка, включая в себя σ и η, проходят через базисную точку $U=\sigma\cap\eta$ и через пары соответственных в φ_2 точек на звеньях *AD* и *BC*. Плоскости другого пучка проходят через базисную точку $V=\rho\cap\tau$ и через пары соответственных в φ_1 точек на звеньях *AB* и *CD*, включая в себя ρ и τ.

4. Точки пересечения плоскостей пучков *U* и *V* образуют поверхность в четырехмерном пространстве, проходящую через контур *ABCD*.

Покажем, что на этой поверхности располагаются два семейства образующих. Подвижная плоскость пучка *V*, пересекая фиксированную плоскость пучка *U*, определяет однопараметрическое множество точек – плоскую криволинейную образующую, лежащую в плоскости пучка *U*. В каждой плоскости пучка *U* формируется образующая, то есть множеству ∞^1 плоскостей пучка *U* соответствует множество ∞^1 не пересекающихся между собой образующих одного семейства. Аналогично, в каждой плоскости пучка *V* находится образующая другого семейства. Получаем два однопараметрических семейства плоских образующих искомой поверхности. Через любую точку поверхности проходит одна образующая первого семейства и одна образующая второго семейства.

Очевидно, многообразие функций соответствия φ_1 и φ_2 (вариантов параметризации) порождает многообразие двумерных поверхностей в четырехмерном пространстве, проходящих через данный контур.

Если требуется построить поверхность, проходящую через данный контур *ABCD* в трехмерном пространстве $E^3(xyz)$, то контур «погружают» в четырехмерное пространство $E^4(xyzt)$, придавая узлам *A, B, C, D* произвольные координаты по оси *t*. В объемлющем четырехмерном пространстве выполняют построение поверхности по вышеописанному алгоритму. Проекция полученной поверхности на гиперплоскость *xyz* доставляет решение исходной задачи трехмерного пространства.

Пример 1. Построить поверхность, проходящую через четырехзвенный контур *ABCD* (рис. 2).

Присвоив узлам контура произвольные координаты по оси *t*, получаем гиперэпюр, состоящий из трехмерных проекций узлов контура на «фронтальную» $\Gamma'(xyz)$ и «горизонтальную» $\Gamma''(xyt)$ гиперплоскости проекций.

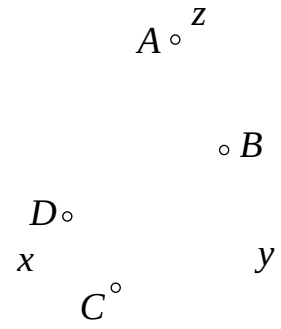


Рис. 2

При погружении узлов контура в четырехмерное пространство положение плоскостей σ, η, ρ, τ и базисных точек *U, V* становится неопределенным. Чтобы полностью определить положение звеньев контура в пространстве E^4, необходимо указать (выбрать) положение базисных точек. Пусть плоскости σ и η звеньев *AB* и *CD* пересекаются в точке $U=Z_\infty$, а плоскости ρ и τ звеньев *AD* и *BC* – в точке $V=X_\infty$. В этом случае плоскости звеньев *AB* и *CD*, как и сами звенья,

проецируются на Γ″ прямыми линиями. Проекции на Γ″ криволинейных звеньев *AD* и *BC* определяются по общему правилу начертательной геометрии: если линия принадлежит плоскости, то проекция линии принадлежит проекции плоскости.

Задаем два пучка вспомогательных плоскостей δ и ω. Для формирования пучка δ проведем гиперплоскость Δ^3, параллельную *xzt*. Положение Δ^3 в E^4 вполне определяется одним параметром – координатой *y*. Для формирования пучка ω проведем гиперплоскость Ω^3, параллельную *yzt*. Ее положение вполне определяется координатой *x*. Таким образом, в пространстве E^4 определены два однопараметрических пучка плоскостей.

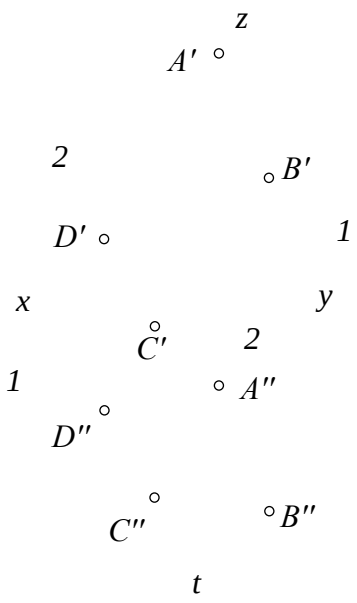


Рис. 3

Произвольная плоскость δ пересекается с произвольной плоскостью ω в некоторой точке *R*. Положение плоскости δ определяется координатой *y*, положение плоскости ω – координатой *x*, поэтому координаты *x*, *y* точки *R* зафиксированы выбором пары пересекающихся плоскостей δ и ω. Получаем двупараметрическое множество точек искомой поверхности. Проекция этой поверхности на гиперплоскость Γ′ доставляет решение поставленной задачи (рис. 3).

Во всех вариантах «ключевого» проектирования решается задача натягивания поверхности на четырехзвенный замкнутый контур. Покажем, что рассмотренный алгоритм позволяет решить эту задачу для трехзвенного контура. Действительно, если одну из вершин трехзвенного контура считать четвертым звеном контура, выродившимся в точку, то алгоритм полностью сохраняет свою конструктивную определенность.

Пример 2. В трехмерном пространстве построить поверхность, проходящую через трехзвенный замкнутый контур *ABC* (рис. 4, а).

Положим, что в E^4 плоскости σ и η звеньев *AB* и *AC* пересекаются в точке Z_∞. Тогда плоскости этих звеньев σ(ABZ_∞) и η(ACZ_∞) пересекаются в четырехмерном пространстве по прямой AZ_∞, образуя гиперплоскость Σ(σ∩η). Также будем полагать, что плоскость τ звена *BC* пересекается с плоскостью ρ противолежащего ей звена в точке Y_∞. При таком выборе базисных инциденций звенья *AB* и *AC* (и сами звенья) проецируются на Γ″ прямыми линиями *A″B″* и *A″C″* (рис. 4, б).

Пучок вспомогательных плоскостей с осью AZ_∞ перспективен ряду точек звена *BC*. Другой пучок вспомогательных плоскостей проходит через точку Y_∞. Потребуем, чтобы любая плоскость этого пучка была параллельна гиперплоскости *zyt*. Тогда каждому значению координаты *x* ставится в

соответствие единственная плоскость пучка Y_∞, а между точками противолежащих звеньев *AB* и *AC* устанавливается взаимнооднозначное соответствие. Две произвольные плоскости пучков вспомогательных плоскостей пересекаются в точке. Двупараметрическое множество таких точек определяет поверхность в E^4, натянутую на данный треугольный контур. Проекция этой поверхности на гиперплоскость Г′(xyz) доставляет решение задачи (см. рис. 4, б).

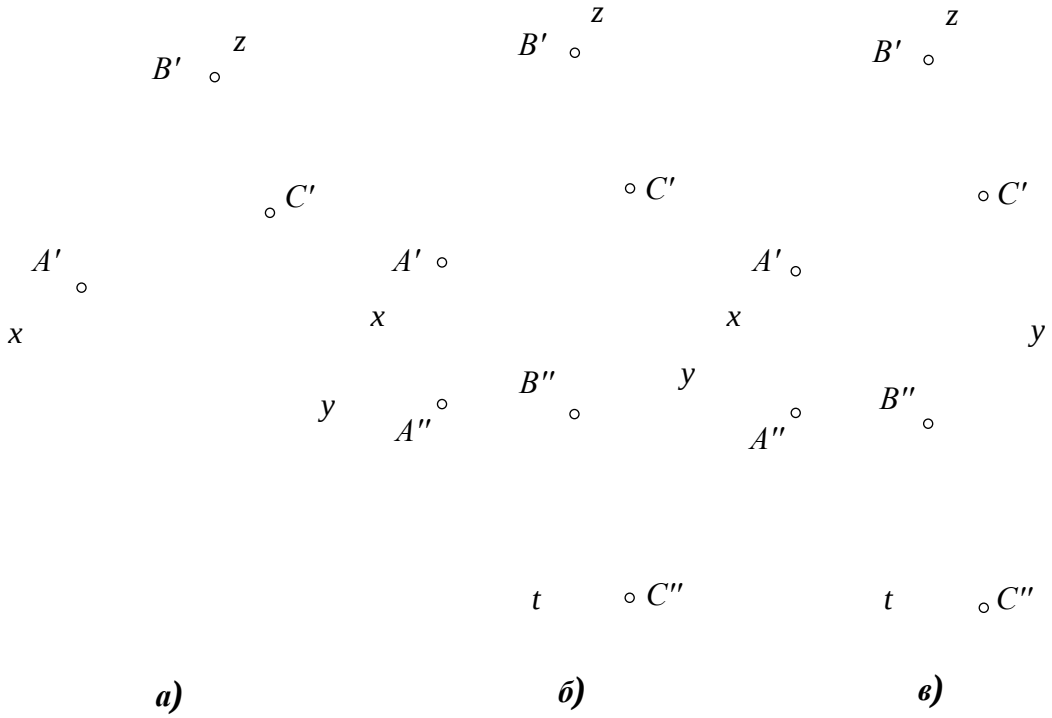


Рис. 4. Поверхность на трехзвенном контуре

На рис. 4, в показана поверхность, натянутая на тот же самый трехзвенный контур, но с иным выбором базисных точек: звенья *AC* и *BC* получили общую базисную точку z_∞, а плоскость звена *AB* стала пересекаться с плоскостью противолежащего звена (выродившегося в точку *C*) в точке X_∞. Полученные поверхности не совпадают, но отличаются незначительно.

Заключение. Рассмотренный способ геометрического формирования поверхности, не конкурируя с алгебраическими методами, расширяет и дополняет возможности конструктора.

Библиографический список

1. Волошинов, Д.В. Конструктивное геометрическое моделирование. Теория, практика, автоматизация: монография / Д.В. Волошинов. – Saarbrucken: Lambert Academic Publishing, 2010. – 355 с.

К содержанию

УДК 378.14.018.55

ОПЫТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА ЮУрГУ

Т.А. Кравченко

Обобщен опыт международного сотрудничества преподавателей, аспирантов и студентов архитектурно-строительного факультета. Представлены основные направления деятельности, определены перспективы развития международного сотрудничества.

Ключевые слова: международное сотрудничество, иностранные студенты, академическая мобильность, зарубежные стажировки.

Южно-Уральский государственный университет активно сотрудничает с зарубежными коллегами в научной деятельности. Особенно активизировалась эта деятельность с получением статуса «Национальный исследовательский университет». В последние годы существенно увеличились контакты с зарубежными университетами и в учебном процессе. Основные направления деятельности следующие: разработка совместных учебных программ, обмен преподавателями, студентами и аспирантами. Эти же тенденции характерны и для развития международных связей архитектурно-строительного факультета.

В 2007–2008 гг. в рамках выполнения инновационного проекта «Образование» факультет принимал участие в Подпрограмме 3 «Профессионально ориентированная подготовка специалистов по приоритетным направлениям развития строительной науки и технологии». Результатом выполнения этой Подпрограммы были изданные монографии, опубликованные статьи в ведущих научных журналах, полученные патенты. Преподаватели факультета прошли стажировки и приняли участие в научных конференциях и строительных выставках в Дании, Швеции, ОАЭ, Германии, Китае.

Результаты научных исследований, опытно-конструкторских разработок публикуются преподавателями, сотрудниками и аспирантами в научном журнале «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Строительство и архитектура», который издается с 2001 года. В составе редакционной коллегии совместно с профессорами АС факультета работают зарубежные ученые: Т.А. Толкынбаев, профессор кафедры «Технология промышленного и гражданского строительства» Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан) и А.К. Мурашев, член национальных комитетов Новой Зеландии по геомеханике, строительным конструкциям и сейсмическому проектированию (г. Веллингтон).

Летом 2012 года в Челябинске состоялся IV Международный симпозиум «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». Наряду с Российской академией архитектуры и строительных наук, Международной ассоциацией строительных высших учебных заведений в числе организаторов, а, главное, принимающей стороной, выступил Южно-Уральский государственный университет (кафедры строительной механики и строительных конструкций и инженерных сооружений). В Организационном и Программном комитетах, а также в секретариате работали преподаватели, сотрудники и аспиранты архитектурно-строительного факультета. Кроме этого, ученые и молодые исследователи факультета выступили с устными и стендовыми докладами, опубликовали тезисы. По рекомендации Программного комитета развернутые доклады были изданы в «Вестнике ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».

Более 10 лет в ЮУрГУ работает Научно-исследовательский и проектный центр «Наследие», в котором ведется разработка научно-проектной документации для реставрации памятников архитектуры, историко-культурных опорных планов городов, проектов зон охраны объектов культурного наследия и т.п. В последние 3–4 года сотрудники центра активно заняты инновационными технологиями реставрации памятников архитектуры, основанными на лазерном сканировании объектов. Результаты работ докладывались, в том числе, на международных конференциях в Болгарии и Польше.

В 2014 году исполнилось 10 лет плодотворному сотрудничеству ЮУрГУ, архитектурно-строительного факультета и немецкой фирмы КНАУФ. За это время проведено несколько научно-практических конференций, посвященных материалам и комплектным системам КНАУФ, на которых с докладами выступают преподаватели, студенты и аспиранты. В сентябре 2013 года под эгидой фирмы КНАУФ была проведена Международная научно-практическая конференция «Перспективы развития строительного материаловедения». Консультационный центр, работающий в ЮУрГУ, руководит которым уполномоченный представитель КНАУФ по Южно-Уральскому региону М.А. Жовтановский, много делает для популяризации материалов и технологий немецкой фирмы. Им совместно с кафедрами технологии строительного производства и строительных материалов организовано обучение по специальным программам студентов АС факультета, лучшим из которых фирма выплачивает стипендии; создана учебная лаборатория, оборудованная стендами, материалами, приборами и инструментами; постоянно пополняется и обновляется фонд учебно-методической литературы. В течение последних трех лет Консультационный центр КНАУФ выступает в числе организаторов конкурса профессионального мастерства студентов АС факультета «Строй-КА». Один из его этапов посвящается материалам и комплектным системам

КНАУФ. Студенты, предварительно изучив самостоятельно учебно-методические материалы, отвечают на вопросы, выполняют практические задания. Лучшие награждаются призами фирмы.

В течение нескольких лет команда студентов 3–4 курсов АС факультета принимает участие в Международной программе развития творческого мышления «Одиссея Разума». В 2014 году она стала победителем региональных соревнований и приглашена на Мировой финал, который состоится в США, в университете штата Айова.

Архитектурно-строительный факультет, имея 60-летний опыт подготовки специалистов для строительного комплекса, известен своим высокопрофессиональным профессорско-преподавательским составом. Благодаря этому конкурс абитуриентов на наш факультет всегда высок. На АС факультет поступают не только жители Челябинской области, но и ближнего зарубежья – Украины, Узбекистана, но, в первую очередь, выпускники школ и колледжей Казахстана. Так, в 2013–14 учебном году на факультете обучается более 60 студентов – жителей Кустаная, Рудного и других городов сопредельного государства. В 2012–13 учебном году на обучение по направлению «Строительство» впервые были приняты 6 граждан Ирака, в 2013–14 учебном году на первый курс поступили еще 10 человек из этой страны. Опыт работы с данными студентами по организации учебного процесса и освоения ими образовательной программы показал пути преодоления трудностей адаптации иностранных студентов в новой для них языковой среде. Первые 6 человек обучаются все вместе в одной группе с российскими студентами. Второй прием осуществлялся во второй половине августа, когда все учебные группы были укомплектованы. Деканат был вынужден зачислять студентов-курдов по 2–3 человека в группу дополнительно. Промежуточные аттестации в первом семестре и зимняя сессия показали, что и им, и преподавателям так работать сложнее. Камнем преткновения для иностранных студентов является недостаточный уровень владения русским языком для восприятия таких дисциплин как физика, химия, теоретическая и техническая механика. Поэтому, если иностранных студентов в группе 4–5, и преподаватель готовит для них в распечатанном виде или на электронном носителе текст лекции или практического занятия, им проще вне аудитории, в кругу друзей-соотечественников дополнительно прорабатывать учебный материал. Поэтому, во-первых, деканат был вынужден переводить среди учебного года иностранных студентов в новые группы с целью их совместного обучения, во-вторых, организовывать для них дополнительные занятия. Со стороны ректората и учебно-методического управления деканату оказывается поддержка в организации таких занятий.

Активно развивается международное сотрудничество АС факультета с Китайской Народной Республикой. Можно выделить следующие направления:

– *Обучение граждан Китая – выпускников бакалавриата в магистратуре АС факультета ЮУрГУ.* Так, в 2013 году успешно прошли двухлетнее обучение и защитили диссертации магистра техники и технологии на кафедре строительных конструкций и инженерных сооружений по программе 270800.6802 «Теория и проектирование зданий и сооружений» 3 человека.

– *Участие студентов АС факультета в программе включенного обучения в рамках международной академической мобильности.* В 2012–13 учебном году два студента четвертого курса, обучающихся по специальности «Водоснабжение и водоотведение», прошли обучение в Чжецзянском океаническом университете, параллельно продолжая обучаться в ЮУрГУ.

– *Краткосрочные стажировки студентов АС факультета в университетах КНР.* Впервые группа из 6 студентов 2–4 курсов АС факультета в рамках производственной практики прошла краткосрочную стажировку в Харбинском политехническом университете в июле 2013 года. В течение четырех недель им были прочитаны лекции, организованы экскурсии на строительные объекты. По окончании стажировки студенты получили сертификаты. Обучение велось на английском языке, поэтому главным критерием отбора при формировании группы было знание слушателями английского языка. В настоящее время на АС факультете сформирована новая группа студентов, которая летом 2014 года. пройдет стажировку в Китае. Для подготовки к восприятию ими учебного материала на английском языке деканат организовал для этих студентов краткосрочное обучение на курсах, на которых будет сделан акцент на изучение специальных строительных терминов.

– *Обучение в магистратуре и докторантуре ВУЗов Китая выпускников АС факультета ЮУрГУ.* Впервые в 2011 году прошел конкурсный отбор и в настоящее время обучается в магистратуре Шанхайского строительного университета один выпускник, закончивший АС факультет с отличием по специальности «Промышленное и гражданское строительство». В докторантуру университета Цинхуа (г. Пекин) поступил к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций и инженерных сооружений Б.А. Ракитин. В марте 2015 года ему предстоит защита докторской диссертации. В ноябре 2013 года делегация преподавателей АС факультета, будучи с визитом в Харбинском политехническом университете, достигла договоренности об участии выпускников АС факультета в конкурсе грантов Правительства КНР на обучение в магистратуре ХПУ. В настоящее время получено положительное решение для обучения 5 выпускников АС факультета 2014 года.

– *Краткосрочные стажировки аспирантов АС факультета.* К настоящему времени получено согласие профессора Института гражданских инженеров ХПУ на проведение под его руководством научных исследований в лабораториях института аспирантом кафедры строительных конструкций и инженерных сооружений В. Анкудиновым.

Таким образом, международное сотрудничество архитектурно-строительного факультета разнообразно и плодотворно. Но есть и другие формы, в которых факультет представлен менее заметно. Например, участие профессорско-преподавательского состава факультета в программах академической мобильности, подача заявок на участие в конкурсах грантов Президента РФ, международных и национальных грантов на проведение научно-исследовательских работ, зарубежных стажировок и др., а также расширение международного сотрудничества посредством участия преподавателей и научных сотрудников факультета, докторантов и аспирантов в совместных проектах с ВУЗами, с неправительственными и другими организациями стран Европы и Азии.

К содержанию

УДК 666.942-16

ЭФФЕКТИВНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ТВЕРДЕНИЯ ДЛЯ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТОВ

Л.Я. Крамар

Исследовано влияние добавок-ускорителей на твердение и набор прочности бетонов на шлакопортландцементах в нормальных условиях твердения. В качестве ускорителей использовали высокоактивные минеральные добавки – микрокремнезем и метакаолин, а также формиаты натрия и кальция. В качестве пластифицирующей добавки использовали поликарбоксилатные суперпластификаторы. Выявлено, что наиболее эффективным ускорителем твердения ШПЦ является формиат натрия и метакаолин. Долговечность бетона в большей степени определяет микрокремнезем и формиат натрия. Все добавки являются эффективными только при совместном использовании с суперпластификатором.

Ключевые слова: добавки-ускорители, метакаолин, микрокремнезем, шлакопортландцементы (ШПЦ), прочность, морозостойкость.

Ускорение темпов строительства, стремление к ресурсо- и энергосбережению, при одновременном решении экологических проблем приводит к необходимости использования в производстве бетонов добавок. Особое внимание в последнее время уделяется добавкам ускорителям, позволяющим: сократить время между последующими этапами бетонирования при монолитном строительстве, ускорить набор марочной прочности изделий, твердеющих в нормальных условиях. При производстве строительных изделий в заводских условиях применение добавок ускорителей способствует

снижению температуры тепловой обработки, снижению ее длительности, а значит позволяет увеличить оборачиваемость форм и съем продукции с 1 $м^2$ общей площади. При использовании добавок ускорителей совместно с пластификатарами и добавками модификаторами структуры можно получать бетоны быстротвердеющие не только в «нормальных условиях», или с низкими затратами на тепловую обработку, но с высокими эксплуатационными свойствами.

Известно [1], что увеличить прочность, плотность и, соответственно долговечность изделий, как на портландцементах, так и шлакопортландцементах возможно при использовании высокоэффективных водоредуцирующих добавок. Наиболее востребованы в современном строительстве нафталин- и меламинформальдегидные суперпластификаторы, а в последнее время высокоэффективные добавки на поликарбоксилатной основе (PCE). Эти суперпластификаторы позволяют при равной подвижности снизить водоцементное отношение до 40 %. Для получения бетонов со строго определенными свойствами применение только суперпластификаторов не достаточно, требуется применение комплексных добавок, включающих дополнительно модифицирующие добавки, а ускорение процесса получения готовых изделий дополнительно требует эффективных ускорителей гидратации цементов и твердения бетона.

В качестве наиболее эффективных добавок – ускорителей можно использовать хлориды кальция, железа, алюминия, сульфаты натрия, калия и алюминия, нитраты натрия, кальция, и другие соли-электролиты [2, 3, 4]. Однако, известно, что хлориды и сульфаты могут вызвать коррозию арматуры и снизить долговечность бетона, вследствие чего, их применение в производстве изделий из бетона ограничено. В последнее время в качестве добавок ускорителей твердения бетонов на различных вяжущих предпочтительно используют формиаты кальция и натрия, нитраты натрия и кальция, тиосульфаты щелочных, щелочно-земельных металлов и роданидов [5, 6, 7].

Кроме минеральных и органических солей, для ускорения гидратации и твердения цементного камня и бетона также применяют активные минеральные добавки (АМД) [8]. В качестве АМД используют, как побочные продукты промышленности, так и специально полученные добавки – микрокремнезем (МК), метакаолин (МН), зола рисовой шелухи и др., что является целесообразным с экономической точки зрения и одновременно способствует улучшению экологической обстановки, повышению эксплуатационных свойств и долговечности получаемых бетонов и изделий из них [9, 10, 11].

Если использование названных ранее ускорителей для портландцементов довольно эффективно, то исследования по активации шлакопортландцементов современными ускорителями изучено не достаточно.

Как правило, для активации шлака применяют тепловлажностную обработку (ТВО), или совместное применение ТВО и добавок ускорителей гидратации шлаковых составляющих и стекла. Особый интерес, в связи с внедрением в технологии бетона энергосбережения, представляет использование добавок-ускорителей гидратации и твердения шлакопортландцементов (ШПЦ). Оценку эффективности добавок-ускорителей для ШПЦ необходимо производить с учетом того, что доменные гранулированные шлаки включающие до 30…40 % минералов, по активности близким к β-C_2S, таких как геленит, мелилит, окерманит, мервинит и аморфную фазу – стекло. Доменные гранулированные шлаки обладают одновременно вяжущими и пуццолановыми свойствами. Поэтому для ускорения гидратации и твердения ШПЦ в нормальных условиях необходимы эффективные добавки-ускорители как для C_3S цементной составляющей, так для β-C_2S, минералов шлака и стеклофазы [10].

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка эффективных комплексных добавок, способствующих повышению ранней и марочной прочности бетонов на шлакопортландцементах при твердении в нормальных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо:

– выбрать наиболее эффективные пластифицирующие добавки;

– разработать комплексные добавки «пластификатор-ускоритель», исследовать их влияние на структуру и свойства цементного камня и бетона;

В работе использовали: магнитогорский ШПЦ 400, ШПЦ 300 по ГОСТ 10178-85; метакаолин производства ЗАО «Пласт-Рифей», ТУ 5729–095–51460677–2009; гранулированный микрокремнезем (г. Новокузнецк Кемеровской обл.), ТУ 5743–048–02495332–96; формиат натрия и формиат кальция, поликарбоксилат Glenuim Ace 430 производства ООО «BASF Строительные системы».

Исследования гидратации и твердения шлакопортландцемента с добавками производили на цементном камне. Для этого из теста нормальной густоты изготавливали образцы-кубы с ребром 2 см, которые твердели, при (20 +-5) ^{0}C и влажности среды 95–100 %, до 28 суток. Для изучения набора прочности из тяжелого бетона изготавливали образцы–кубы с ребром 10 см, твердевшие при температуре 20 ± 2 ^{0}C и влажности 95–100 %.

Фазовый состав цементного камня и особенности гидратационных процессов оценивали с помощью ДТА на дериватографе системы LuxxSTA 409, РФА на дифрактометре ДРОН–3М, модернизированном приставкой PDWin.

Для сравнения и выбора наиболее эффективных ускорителей твердения бетона были приняты активные минеральные добавки (микрокремнезем и метакаолин), формиаты натрия и кальция, а также нитрат кальция. При оценке влияния нитрата кальция на набор прочности цементного камня ус-

тановлено, что он менее эффективен по сравнению с остальными добавками – ускорителями, поэтому в основных исследованиях не применялся. В результате для проведения экспериментов были приняты комплексные добавки состоящие из суперпластификатора Glenium Ace 430 в сочетании с метакаолином (МН), микрокремнеземом (МК), формиатом натрия (ФН) и формиатом кальция (ФК).

Проведение исследований

Изучение влияния комплексных добавок-ускорителей на набор прочности бетонных образцов при нормальном твердении подтвердило эффективность применяемых добавок. Кинетика набора прочности бетона с комплексными добавками до 28 суток твердения в «нормальных условиях» на ШПЦ 300 представлена на рис. 1.

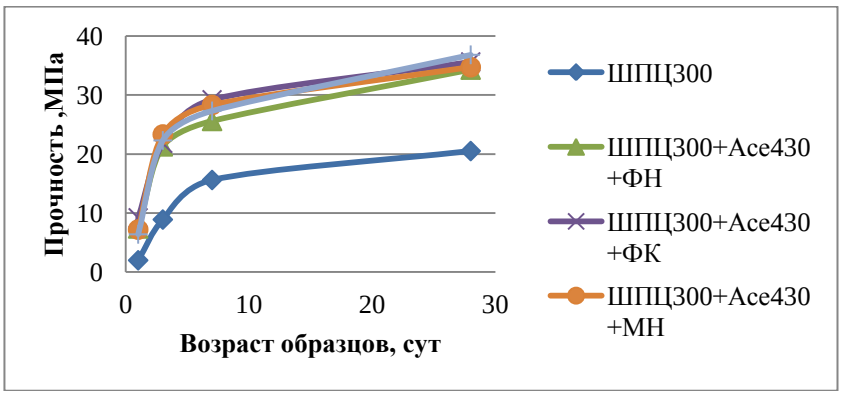


Рис. 1. Кинетика набора прочности бетона с комплексными добавками до 28 суток твердения в нормальных условиях на ШПЦ 300

Из полученных зависимостей (рис. 1) следует, что применение всех комплексов добавок для ШПЦ 300 уже к 3 суткам твердения обеспечивает набор прочности до 75 % от марочной, в то время как контрольный состав в 28 суток не набрал и 70 % от марки. К 28 суткам все остальные добавки ускорители позволили получить прочности выше марочных 35 МПа вместо 30 МПа.

На рис. 2. показано влияние комплексных добавок на набор прочности ШПЦ 400 до 28 суток твердения в нормальных условиях.

Результаты набора прочности ШПЦ 400 выявили, что применяемые комплексные добавки на 3 сутки твердения обеспечивают набор прочности образцов до 60–70 % от марочной прочности. Контрольный состав в марочном возрасте набрал только 60 %. Все остальные добавки в марочном возрасте практически обеспечили требуемую прочность. Кроме этого, следует отметить, что для всех видов ШПЦ к 28 суткам твердения без применения тепловой обработки, предпочтительнее использовать комплексные добавки с ускорителем микрокремнеземом, которые позволяют полу-

чить прочность выше, чем у контрольного состава на 80 %. Влияние остальных комплексов на набор прочности ШПЦ 300 примерно одинаково, а в случае применения рассмотренных добавок на ШПЦ 400 наиболее предпочтителен ФН.

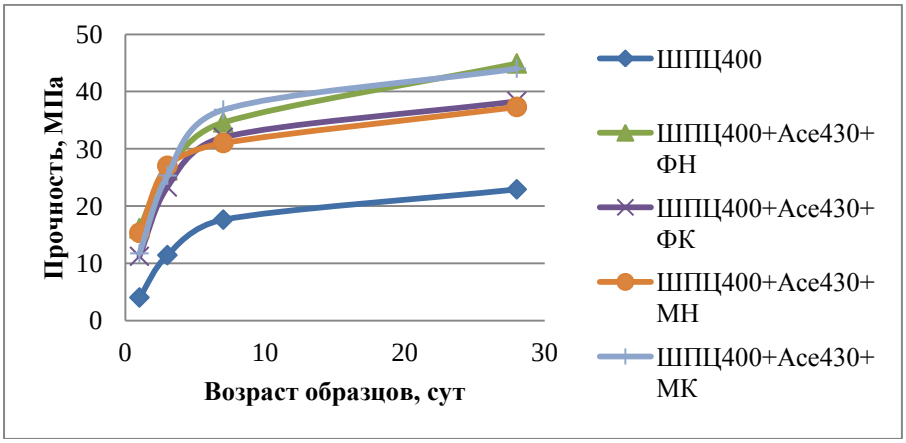


Рис. 2. Кинетика набора прочности бетона с комплексными добавками до 28 суток твердения в нормальных условиях на ШПЦ 400

Изучение фазового состава цементного камня при твердении, полученного при твердении цементов позволило выявить следующее. Введение комплекса добавок ускорителей в ШПЦ 300 и ШПЦ 400, кроме ФН, снижают содержание свободного гидроксида кальция в цементном камне до 2 %. Использование в качестве ускорителя ФН в комплексе приводит к повышению содержания гидроксида кальция в цементом камне, что, вероятно, связано с пониженной растворимостью гидроксида кальция в жидкой фазе цементного камня в присутствии щелочи – NaOH. ШПЦ 300 и ШПЦ 400 без добавок твердеют в нормальных условиях гораздо медленнее, так как требуют активации процессов твердения и гидратации.

По данным ДТА и РФА выявлено, что все составы с комплексными добавками слабозакристаллизованны и представлены в основном гидросиликатными фазами CSH I, CSH II, стабильными гидроаллюминатами типа C_3AH_6, C_4AH_{13}, CAH_{10}, гидрогранатами и гидроксидом кальция в количестве 2–2,5 %. Введение ФН способствует образованию гидросиликатов кальция пониженной основности, предпочтительно тоберморитоподобных в сочетании с CSH I, CSH II фазами, что, вероятно, приводит к повышению прочности камня.

Таким образом, введение разработанных комплексных добавок позволяет:

– повысить скорость набора прочности шлакопортландцементов при нормальном твердении в 3х суточном возрасте на 90 % для ШПЦ 400 и на 80 % для ШПЦ 300 по сравнению с бездобавочными составами;

– модифицировать структуру цементного камня с преобладанием низкоосновных ГСК и стабильных гидроалюминатов кальция;

– получить на ШПЦ 300 и ШПЦ 400 бетоны классов В30…В35 и выше соответственно с применением комплексных добавок без дополнительной тепловой обработки.

Библиографический список

1. Сватовская, Л.Б. Активированное твердение цементов / Л.Б. Сватовская, М.М. Сычев. – Л.: Стройиздат, 1983. – 160 с.

2. Рамачандран, В. Добавки в бетон. Справочное пособие / В. Рамачандран. – М.: Стройиздат, 1988. – 575 с.

3. Сватовская, Л.Б. Активированное твердение цементов / Л.Б. Сватовская, М.М. Сычев. – Л.: Стройиздат, 1983. – 159 с.

4. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. –187 с.

5. Башлыков, Н.Ф. Бетон и железобетон / Н.Ф. Башлыков, А.Я. Вайнер, Р.Л. Серых, В.Р. Фаликман. – 2004. – № 6. – С. 13–16.

6. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М.: Стройиздат, 1998. – 768 с.

7. Тейлор, Х. Химия цемента / Х. Тейлор. – М.: Мир, 1996. – 560 с.

8. Малолепши, Я. Влияние метакаолина на свойства цементных растворов / Я. Малолепши, З. Питель // Химические и минеральные добавки в бетон. – Харьков: Колорит, 2005. – С. 61–77.

9. Кирсанова, А.А. Органоминеральные модификаторы на основе метакаолина для цементных бетонов / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар // Строительные материалы. – 2013. – Вып. 13. – С. 45–48.

10. Heikal M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes // Cement and Concrete Research. 2004. – № 34. – Pp. 1051–1056.

11. Кирсанова, А.А. Комплексный модификатор с метакаолином для получения цементных композитов с высокой ранней прочностью и стабильностью / А.А. Кирсанова, Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, З.В. Стафеева, Т.М. Аргынбаев // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – Вып. 13. – № 1. – С. 49–57.

К содержанию

УДК 514.18 + 378.016:514.18

ПРЕПОДАВАНИЕ НАЧЕРТАТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ФАКУЛЬТЕТЕ ЮУрГУ С УЧЕТОМ НОВЫХ ГОС

Н.С. Кувшинов

Показано, что в соответствии с новыми ГОС на технических специальностях необходимо изменить методику преподавания «Начертательной геометрии». Для этого разработаны и апробированы методически взаимосвязанные конспект лекций и рабочая тетрадь.

Ключевые слова: ГОС, начертательная геометрия, конспект.

В настоящее время приоритет в высшем образовании отдается техническим специальностям. Требованиями новых ГОС для электротехнических специальностей по учебной дисциплине «Начертательная геометрия» в I семестре являются: 1) упор на построение линий пересечения поверхностей и разверток поверхностей; 2) упор на самостоятельную работу. Эти требования напрямую связаны с дальнейшим изучением «Инженерной графики» во II семестре и «Компьютерной графики» в III семестре.

В то же время при одинаковых требованиях к студентам дневной и заочной формы обучения распределение учебных часов по начертательной геометрии в рабочих программах имеет принципиальные различия (табл.).

Таблица

Распределение учебных часов по «Начертательной геометрии» в рабочих программах на Э факультете ЮУрГУ согласно ГОС 3-го поколения

Форма обучения	Трудоемкость	Аудиторные занятия	Лекции	Практические занятия	Самостоятельная работа	Контроль самостоятельной работы
Очная	108	54	18	36	49	5
Заочная	108	14	6	8	85	9

Учитывая вышеизложенное, используемые ранее конспект лекций по начертательной геометрии [1] и рабочая тетрадь [2] были переработаны в соответствии с требованиями новых ГОС ([3] – рис. 1) и ([4] – рис. 2). Рабочая тетрадь [4] сдана в печать, а конспект лекций [3] подготовлен к сдаче в печать.

В новом конспекте лекций [3] представлены теоретические положения по основным темам учебной дисциплины «Начертательная геометрия», дополненные многочисленными примерами решения задач.

Рис. 1. Обложка нового конспекта лекций по начертательной геометрии [3]

Рис. 2. Обложка новой рабочей тетради
по начертательной геометрии [4]

В отличие от известных учебников и учебных пособий:

1) материал предельно сжат и весь скомпонован из отдельных рисунков;

2) каждый рисунок выполнен в форме мини-опорного конспекта с необходимыми текстовыми пояснениями;

3) для большинства задач приведены анализ, схема, алгоритм и последовательность их решения в символьной форме;

4) показана последовательность решения и оформления задач методами 3D-компьютерной графики на основе пакета AutoCAD;

5) приведены вопросы для самоконтроля.

Конспект лекций соответствует требованиям государственных образовательных стандартов для вузов. Он предназначен для самостоятельной работы студентов, обучающихся по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки «Инженерное дело, технологии и технические науки».

Электронная версия конспекта лекций [3] может быть рекомендована студентам, преподавателям и аспирантам высших учебных заведений.

Отличительные особенности новой рабочей тетради [4] по сравнению с предыдущей [2]:

1) представлены краткие теоретические положения по основным темам учебной дисциплины «Начертательная геометрия», дополненные примерами решения задач;

2) все темы соответствуют, а примеры с характерными задачами совпадают с конспектом лекций [3];

3) появились новые темы, например, «Способ прямоугольного треугольника», «Взаимно перпендикулярные прямые и плоскости», «Кривые линии», «Способ вспомогательных сфер», «Развертки поверхностей»;

4) увеличилось количество задач для самостоятельного решения с 31 до 94, включая задачи повышенной сложности по новым темам.

Следует отметить, что главным при таком подходе является прямая взаимосвязь нового конспекта лекций [3] с новой рабочей тетрадью [4].

Теперь, например, студенты заочной формы обучения (табл.) при укороченном курсе лекций (6 часов) и малом количестве практических занятий (8 часов) имеют полную возможность сначала самостоятельно проработать теоретический материал по работе [3], разобрать примеры решения подобных задач непосредственно в новой рабочей тетради [4] и уже потом приступать к решению конкретных задач в той же рабочей тетради.

Новая методика преподавания начертательной геометрии студентам очной и заочной форм обучения на Э факультете ЮУрГУ апробирована в первом семестре 2013/2014 учебного года. Ее эффективность подтвердилась при решении новых олимпиадных задач повышенной сложности, например, по теме «Развертки поверхностей» (рис. 3) и при сдаче экзаменов.

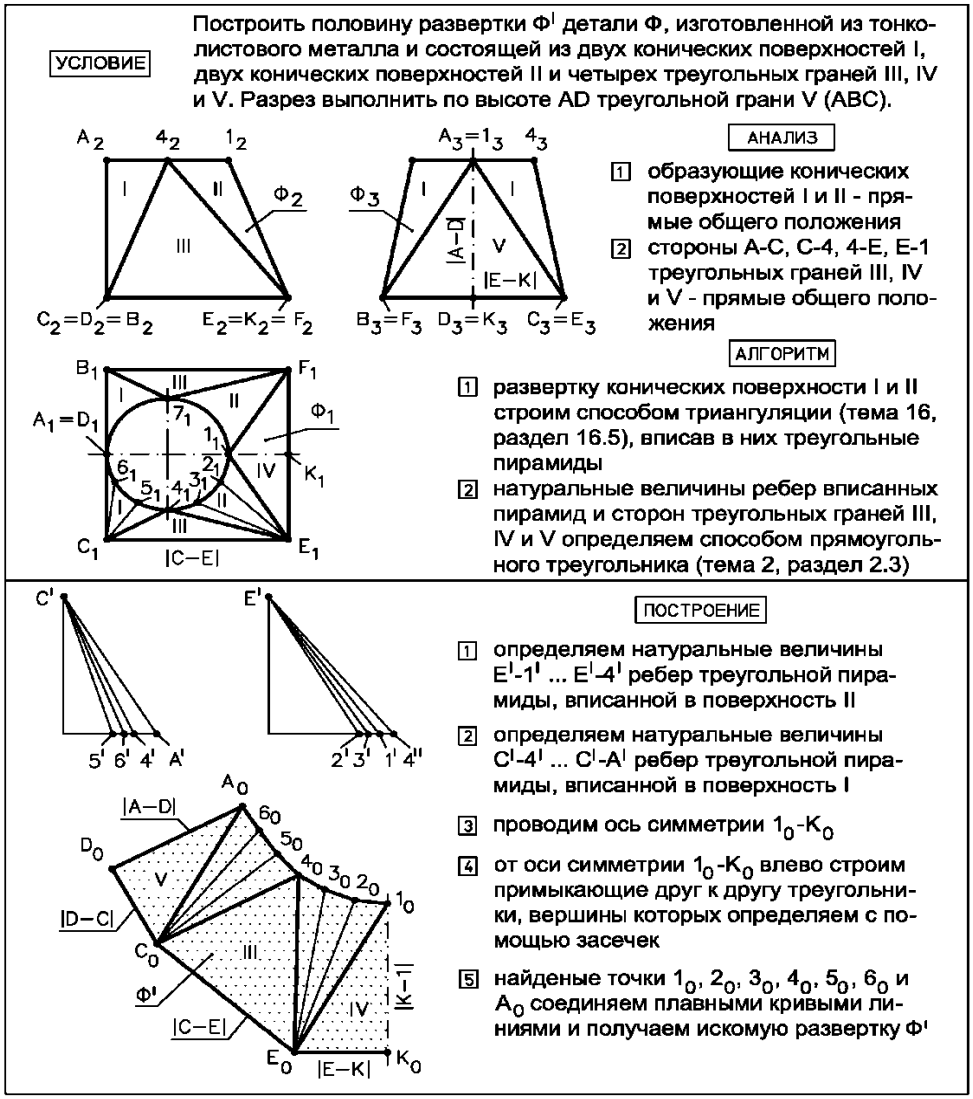


Рис. 3. Пример задачи II тура олимпиады «Прометей»

Библиографический список

1. Кувшинов, Н.С. Начертательная геометрия. Компьютерный курс лекций / Н.С. Кувшинов, В.С. Дукмасова, Б.Н. Пинигин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 136 с.

2. Путина, Ж.В. Сборник задач по инженерной графике для студентов Э, ПС факультетов: Учебное пособие / Ж.В. Путина, А.Л. Решетов, Ю.Д. Кузнецов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 30 с.

3. Кувшинов, Н.С. Начертательная геометрия: экспресс-курс с примерами решения задач / Н.С. Кувшинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – 149 с.

4. Кувшинов, Н.С. Начертательная геометрия: Сборник задач / Н.С. Кувшинов, Т.Н. Скоцкая, И.Л. Костюнина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 103 с.

К содержанию

УДК 378.18(470.55) + 728.1.012(470.55)

СТРУКТУРА СТУДЕНТОВ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА ЮУрГУ ПО МЕСТУ ПРОЖИВАНИЯ

В.Н. Кучин, Н.В. Шилоносова

По результатам исследования приведен анализ количества, доли и мест проживания иногородних студентов, обучающихся на архитектурно-строительном факультете Южно-Уральского государственного университета. Показано увеличение доли иногородних студентов на факультете за последние 5 лет. Повышение объемов жилищного строительства в Челябинске связывается с ростом заинтересованности студентов в жилье.

Ключевые слова: архитектурно-строительный факультет; иногородние студенты; место проживания.

В последние годы наблюдается увеличение доли иногородних студентов, обучающихся в высших учебных заведениях Челябинска. Это влияет на особенности организации учебного процесса. Некоторым студентам не просто адаптироваться к жизни и учебе в условиях крупного города – областного центра. Студентам приходится решать вопросы, связанные с поиском жилья, так как не всем желающим могут быть предоставлены места в общежитии.

В статье рассмотрена структура студентов архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ по месту их постоянного проживания. В табл. 1 приведено количество студентов, обучающихся на факультете в 2013–2014 учебном году, по курсам и месту проживания.

Таблица 1

Количество студентов по курсам и месту проживания

Курс	Количество студентов, чел.	Количество проживающих в Челябинске, чел.	Количество иногородних студентов, чел.
1	323	167	156
2	225	84	141
3	238	112	126
4	203	91	112
5	225	145	80
Всего	1214	599	615

Как видно из табл. 1, из 1214 студентов в городе Челябинск проживают 599 человек, что составляет 49,3 %, а иногородними являются 615 человек (50,7 %). То есть половина всех студентов архитектурно-строительного факультета являются иногородними студентами.

Распределение студентов по местам постоянного проживания приведено в табл. 2.

Таблица 2

Места постоянного проживания иногородних студентов

Места проживания	Доля студентов, %
1. Близлежащие города	11,0
2. Города и районы Челябинской области	52,6
3. Регионы за пределами Челябинской области	36,4
Итого	100

Из табл. 2 видно, что среди всех иногородних студентов 11 % проживают в близлежащих к Челябинску городах-спутниках: Копейск, Коркино, Еманжелинск, а также в Сосновском и Красноармейском районах. Транспортная доступность позволяет большинству из этих студентов приезжать на занятия в университет из дома на общественном транспорте.

Из общего количества иногородних студентов примерно половина проживают в городах и районах Челябинской области (52,6 %). Это такие города как Миасс, Златоуст, Троицк, Магнитогорск и другие города, районы области. Постоянное место жительства за пределами Челябинской области имеют 36,4 % иногородних студентов. Рассмотрим подробнее структуру проживания иногородних студентов за пределами Челябинской области в табл. 3.

Таблица 3

Доля студентов архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ, проживающих за пределами Челябинской области

Наименование региона	Доля студентов, %
1. Казахстан	26,2
2. Оренбургская область	16,6
3. Башкортостан	15,7
4. Курганская область	15,5
5. Ханты-Мансийский автономный округ	10,7
6. Другие регионы России и СНГ	15,3
Итого	100

Из табл. 3 видно, что наибольшее количество иногородних студентов, проживавших за пределами Челябинской области – жители Казахстана (26,2 %). Также студенты проживают в Оренбургской области (16,6 %), Башкортостане (15,7 %), Курганской области (15,5 %). То есть всего 74 % приехали в Челябинск из близлежащих уральских и приуральских регионов. Другие регионы представлены такими областями, как Свердловская, Московская, Астраханская, Пермским краем, странами Узбекистан, Кир-

гизия, республикой Саха. На факультете учатся студенты из стран дальнего зарубежья: семнадцать человек из Ирака, один человек из Китая, один человек из Конго. Все иностранные студенты проживают в общежитии студгородка. Скорее всего, после окончания учебы иностранные студенты покинут пределы России, поедут в свои страны. Многие иногородние студенты, вполне возможно, останутся жить в городе Челябинске.

Доля иногородних студентов, обучающихся в настоящее время на факультете, представлена в табл. 4. На четвертом курсе учатся 6 групп бакалавров со сроком обучения 4 года, год выпуска этих студентов – 2014, также на четвертом курсе в 10 группах учатся инженеры со сроком обучения 5 лет, они выпускаются в 2015 году, поэтому год выпуска повторяется в двух графах.

Таблица 4

Доля иногородних студентов архитектурно-строительного факультета ЮУрГУ

Год выпуска	2014	2014, 2015	2015	2016	2017
Курс	5	4	3	2	1
Доля иногородних студентов, %	35,6	55,2	52,9	62,7	48,3

Из табл. 4 видно, что доля иногородних студентов на 2, 3, 4 курсах составляет более половины от общего количества студентов. Эта динамика за 5 лет примечательна, так как в течение последних 20–30 лет доля иногородних студентов была стабильной и составляла 30–40 %.

Опрос студентов показал, что примерно два из десяти иногородних студентов живут в собственных городских квартирах, специально купленных родителями. Треть студентов пользуются услугами съемного жилья. Некоторые студенты проживают у родственников. Остальные студенты живут в близлежащих городах. Места проживания иногородних студентов во время учебы представлено в табл. 5. Итого около 60 % иногородних студентов заинтересованы в приобретении жилья в городе Челябинске.

Таблица 5

Места проживания иногородних студентов

Места проживания	Доля иногородних студентов, %
1. Общежития университета	35
2. Собственное жилье	20
3. Арендуемое жилье	25
4. Жилье у родственников	9
5. Жилье в пригороде Челябинска	11
Итого	100

Анализ структуры студентов в Южно-Уральском государственном университете в целом показал, что доля иногородних студентов, поступивших на 1 курс, в 2012 году составила 70,3 %, в 2013 году – 56,8 %. Следует отметить, что по разным оценкам доля иногородних студентов в других учебных заведениях Челябинска является достаточно значимой и составляет от 50 до 70 %.

Таким образом, рассматривая иногородних студентов как потенциальных покупателей жилья в Челябинске, отметим то, что их доля растет и становится значительной. Известно, что отток населения в крупные города является общемировой тенденцией [1].

Количество жилья, вводимого ежегодно в Челябинске за последние 5 лет, выросло с 520 в 2009 году до 902 тысяч квадратных метров в 2013 году [2]. В 2012 году в Челябинске было построено и введено более 1 миллиона квадратных метров жилья.

Таким образом, информация по доле иногородних студентов может стать одним из важных индикаторных показателей, которые определяют политику жилищного строительства в Челябинске. Повышение доли иногородних студентов, обучающихся в Челябинских вузах, должно учитываться при планировании общего количества жилья, типа застройки (многоэтажное, малоэтажное строительство), типа квартир. Такой фактор, как изменение доли рынка жилья, приходящихся на местных и иногородних покупателей, должен интересовать главное управление архитектуры и градостроительства администрации города. Также такие данные могут быть полезными для риэлтерских компаний.

Библиографический список

1. www.domchel.ru.
2. www.dostup1.ru.

К содержанию

УДК 514.18 + 004.92

НАЧЕРТАТЕЛЬНАЯ ГЕОМЕТРИЯ В ПАКЕТЕ SOLIDWORKS

А.Н. Логиновский

Рассмотрены вопросы ведения курса начертательной геометрии в пакете SolidWorks. Приведены примеры задания геометрических фигур, решения позиционных и комплексных задач.

Ключевые слова: комплексный чертеж; 3D модель; эскиз; геометрические тела; поверхности; 3D пространство; взаимосвязи; SolidWorks.

Современные графические пакеты позволяют решать геометрические задачи непосредственно в 3D пространстве без преобразования его в 2D. В то же время чертеж пока остается одним из основных средств документирования проекта. Поэтому в рамках курса начертательной геометрии необходимо сочетать вопросы теоретических основ чертежа и компьютерного геометрического моделирования.

Образование комплексного чертежа

Графический редактор пакета SolidWorks предназначен для создания 3D моделей объектов. Плоские изображения – эскизы носят вспомогательный характер и предназначены для последующих преобразований в пространственные 3D модели. Ортогональное проецирование выполняется командой «Преобразование объектов» на выбранную плоскость эскиза. В качестве плоскостей проекций могут быть «штатные» плоскости триады, плоские грани или «справочные плоскости» (рис. 1, *а*).

Комплексный чертеж объекта формируется по команде «создать чертеж из детали» на специальных листах с образованием отдельного файла, сохраняющим ассоциативную связь с 3D моделью (рис. 1, *б*). Перед созданием чертежа следует в параметрах установить: *настройки пользователя – отображение/выбор кромки – по первому углу*. По умолчанию действует американский стандарт, где главным является вид сверху.

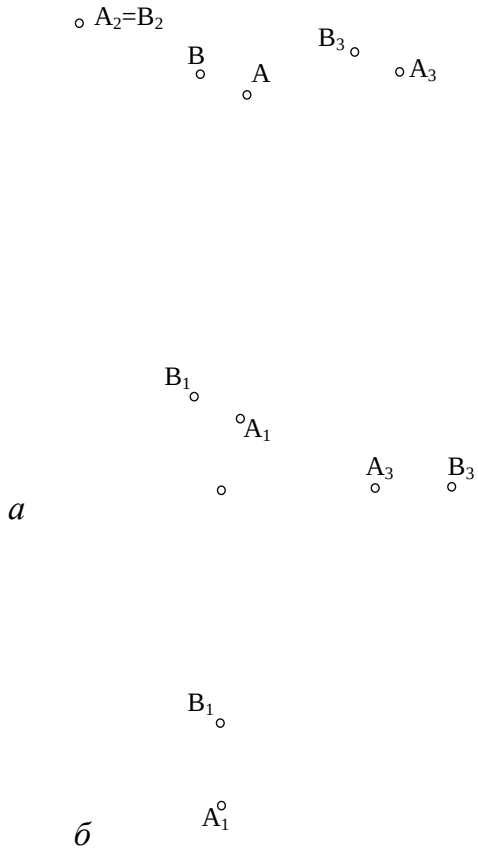


Рис. 1. *а* – пространственная модель образования комплексного чертежа; *б* – комплексный чертеж

Создание 3D модели по комплексному чертежу

В зависимости от типа заданных геометрических фигур возможны два метода преобразования 2D модели в 3D. Геометрические тела удобнее задавать размерами, отрезки прямых – координатами.

Например, эллиптический гиперболоид задан тремя скрещивающимися отрезками. На комплексном чертеже проводятся оси *x*, *y*, *z* и измеряются численные значения координат конечных точек отрезков (рис. 2, *а*). Затем в 3D эскизе произвольно строят три отрезка, активируют их конечные точки и задают им координаты, взятые с комплексного чертежа (рис. 2, *б*).

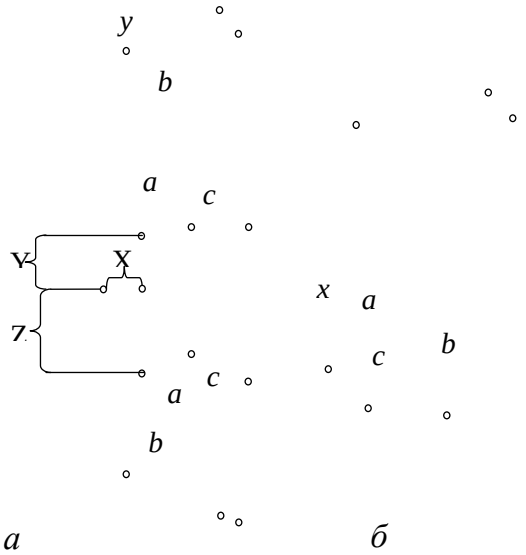


Рис. 2. *а* – построение осей координат на комплексном чертеже; *б* – 3D модель, построенная по координатам

Плоские и пространственные линии

Положение прямых относительно плоскостей проекций и между собой в SolidWorks задается взаимосвязями: параллельность, перпендикулярность, коллинеарность, вдоль координатной оси. Прямую общего положения целесообразно задавать в 3D эскизе по координатам, как это показано на рис. 2, *б*. Истинную величину отрезка прямой и ее углы наклона к плоскостям проекций, расстояние между скрещивающимися прямыми определяют командой «измерить». Данные измерения можно сохранить во вкладке «датчики».

Рис. 3. *а* – «штатные» коники; *б* – кривые, заданные параметрическими уравнениями

Кривые линии алгебраические и трансцендентные задаются различными способами: с использованием «штатных» примитивов (рис. 3, *а*) или уравнений. Например, эвольвенту окружности можно построить, задав ее уравнением: x_t = r*cos(t) + r*t*sin(t); y_t = r*sin(t) – r*t*cos(t). Уравнение пространственной спирали, «намотанной» на глобоид: x_t = R*cos(t); y_t = a – (a – R*sin(t))*cos(b*t); z_t = (a – r*sin(t))*sin(b*t) (рис. 3, *б*).

Поверхности, геометрические тела

Пакет SolidWorks дает возможность задать, практически, любые поверхности, тела, рассматриваемые в начертательной геометрии. Наличие 3D параметризации значительно облегчает процесс построения поверхностей, геометрический определитель которых состоит из ряда прямых или кривых линий. Например, линейчатая поверхность, заданная тремя скрещивающимися прямыми *a, b,c* (рис. 4,*а*). Для построения образующей *k* на заданных прямых строят точки *1, 2, 3* с взаимосвязью «совпадение» и проводят произвольную прямую. Прямой поочередно придают взаимосвязь «совпадение» с указанными точками. Прямая, перемещаясь в пространстве, занимает положение образующей *k*. Аналогично проводят построение образующей *l*.

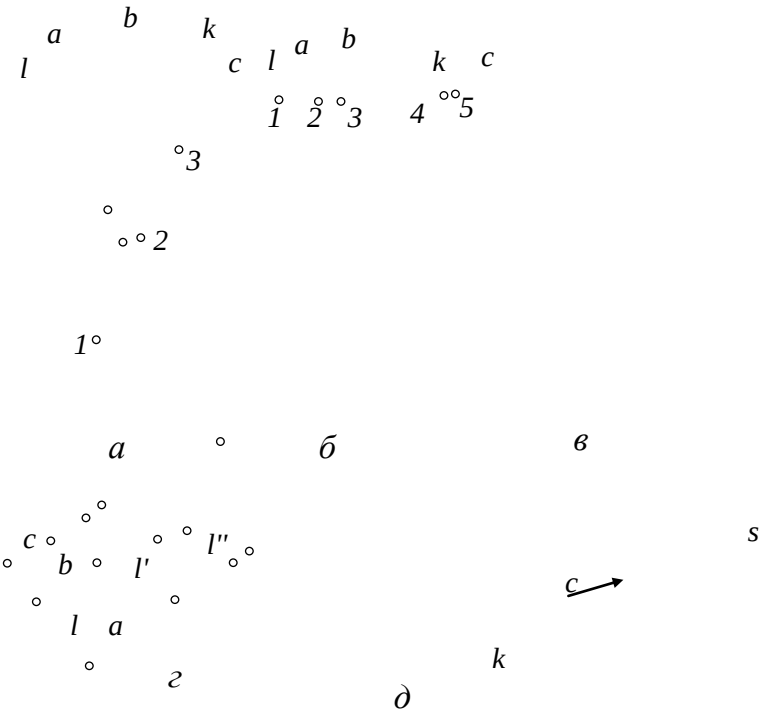


Рис. 4. *а* – построение образующих гиперболоида; *б* – эллиптические сечения; *в* – эллиптический гиперболоид; *г* – линейчатая поверхность общего вида; *д* – эвольвентный геликоид

Чтобы построить сечения, задают плоскость, которая пересекает все образующие. В плоскости определяют точки пересечения *1, 2, 3, 4, 5* (точки пронзания) прямых с плоскостью (рис. 4, *б*). Строят произвольный эллипс, который взаимосвязью «совпадение» совмещают с точками. Задав ряд параллельных плоскостей, аналогично создают необходимое количество сечений. Командой «по сечениям», используя построенные эллипсы, строят эллиптический гиперболоид (рис. 4, *в*).

Линейчатую поверхность, заданную тремя направляющими кривыми, строят после создания достаточно плотного каркаса из образующих отрезков (рис. 4, *г*). Образующие отрезки *l, l', l''* …, строят с использованием взаимосвязи «совпадение» аналогично каркасу гиперболоида, предварительно задав точки на направляющих кривых *a, b, c*. Поверхность формируют командой «поверхность границы».

Для построения эвольвентного геликоида необходима направляющая – цилиндрическая гелиса *c* и образующая – прямая *k*, касательная к гелисе (рис. 4*д*). Гелиса создается с использованием «штатной» команды спираль. Затем в трехмерном эскизе, используя взаимосвязи «совпадение» «касательность»,

строят образующую. Поверхность создают командой «поверхность по траектории», указав в качестве профиля касательную прямую, а направления – гелису.

Позиционые и комплексные задачи

В качестве примера рассмотрим задачу, содержащую как фрагменты позиционных, так и комплексных задач.

Условие задачи (рис. 5, а): даны окружность с, сфера σ и плоскость α(m∩n). Построить конус k с основанием с и вершиной в некоторой точке S, принадлежащей плоскости α, пересекающийся со сферой по окружностям [1].

Плоскость *α* заменим справочной плоскостью *Δ,* проведя ее через пересекающиеся прямые *m∩n* (рис. 5, *б*). Зададим справочной плоскостью ∑ плоскость симметрии, используя центр сферы *A* и диаметр *1–2* окружности *c*. Вершина конуса *S* должна принадлежать как плоскости ∑, так и плоскости *Δ* , то есть их линии пересечения *g*. В 3D эскизе проводим линию *g* в виде произвольной прямой и назначаем ей взаимосвязь «на плоскости» с плоскостями ∑ и *Δ*. Командой «эскиз вдоль линии пересечения тел» построим окружность *δ*, как результат пересечения сферы с плоскостью симметрии ∑. На прямой *g* зададим произвольно точку *S* и соединим ее с конечными точками *1, 2* диаметра окружности *c*. Соединим хордами точки пересечения прямых *S-1, S-2* с окружностью *δ*. Из центра сферы *A* к серединам хорд *3-4, 5-6* проведем отрезки. Назначим хордам взаимосвязи: *3-4* «параллельность» диаметру *1-2*; *5-6* «перпендикулярность» отрезку *A-7*. Точка *S*, скользя по прямой *g*, занимает нужное положение.

Командой «по сечениям», указав точку *S* и окружность *c* в качестве профилей и отрезки *S-1, S-2* – в качестве направляющих, создаем искомый конус (рис. 5, *в*).

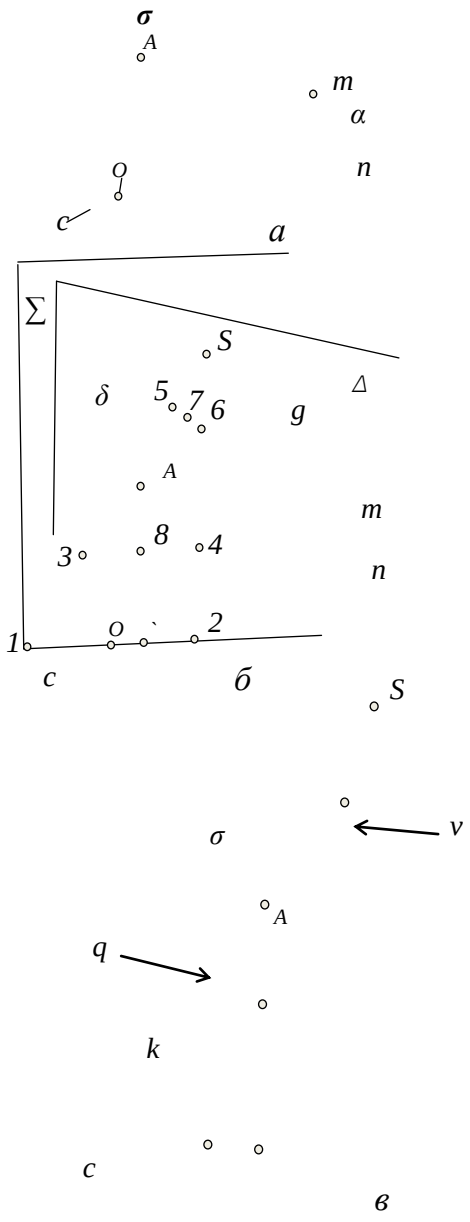


Рис. 5. *а* – условия задачи; *б* – этапы решения; *в* – результат решения

Библиографический список

1. Пеклич, В.А. Задачи по начертательной геометрии: учебное пособие / В.А. Пеклич, С.Н. Павленко. – М.: Высшая школа, 1999. – 139 с.

К содержанию

УДК 711.4.021.2 + 339.49:332.8

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

И.В. Малев, Н.В. Шилоносова

По результатам проведенного анализа предприятий городского хозяйства были выявлены основные проблемы, сдерживающие развитие качественной городской инфраструктуры.

Ключевые слова: территориальное развитие, городское хозяйство, экономика, финансы городского хозяйства, коммунальная инфраструктура, государственное регулирование.

Современная тенденция роста городов сопровождается целым комплексом нерешенных проблем, начиная с экологии и заканчивая социальной сферой. Наряду с этим, развивающиеся города становятся основным инструментом устойчивого развития постиндустриального общества. Мегаполисы формируют основной спрос на высокотехнологичные продукты, информационные технологии и инновационные решения.

Агломерации участвуют в глобальной конкуренции за материальные, финансовые, информационные ресурсы, за наиболее квалифицированные и креативные кадры. В настоящее время концентрация трудовых ресурсов, существующий производственный аппарат, инфраструктура и агломерационный эффект оказывают даже большее влияние на принятие решений относительно размещения производительных сил, чем природные ресурсы.

Рынок жилья и обслуживающая его инфраструктура начинают представлять собой центральные механизмы городского развития, в своем взаимовлиянии они составляют основу для развития городского хозяйства на локальном уровне.

При этом в первую очередь требуется создание и поддержание приемлемой коммунальной среды, которая может сделать город максимально конкурентоспособным и обеспечить предприятия наиболее благоприятными возможностями с точки зрения роста.

Однако отсутствие должного внимания к этой сфере на протяжении двадцати лет привело к тому, что городское хозяйство до сих пор остается наиболее отсталой отраслью городской экономики. В его составе насчитывается более 30 отраслей и видов деятельности. На его долю приходится ¾ основных фондов городского хозяйства. Затраты ЖКХ достигают 70 % расходной части местных бюджетов, однако этих средств хронически не хватает. В результате растет степень изношенности основных фондов во многих регионах – более 60 %. Треть инженерных коммуникаций в России имеет 100 % износ [2].

Экономические проблемы отражаются в финансовой сфере. Финансовые проблемы предприятий городского хозяйства ярко выражены по двум направлениям: во-первых, российские банки, столкнувшись с трудностями финансового кризиса, не вдаваясь в детали функционирования жилищно-коммунальной сферы, предпочитают прекратить или приостановить кредитование, с другой стороны, предприятия отрасли все чаще сталкиваются с существенным снижением уровня собираемости платежей за услуги.

По оценкам экспертов, одной из главных причин сложившейся ситуации является недостаточное финансирование сферы ЖКХ. В последние годы недофинансирование жилищно-коммунального хозяйства составило около 20 % объема необходимых средств, что усугубляется большим объемом накопленной задолженности в данной сфере. Задолженность в жилищно-коммунальной сфере является источником цепочки неплатежей, которая охватывает практически все отрасли экономики муниципального образования и превращается в источник угроз для социально-экономического развития города.

Недостаточность бюджетного финансирования жилищно-коммунального комплекса в целях реализации адресных программ капитального ремонта и развития привело к резкому увеличению износа основных фондов. Техническое состояние коммунальной инфраструктуры характеризуется, во-первых, высоким уровнем износа, во-вторых, высокой аварийностью, в-третьих, низким коэффициентом полезного действия мощностей и, наконец, большими потерями энергоносителей.

Существующая непривлекательность комплекса городского хозяйства для частных инвестиций обусловлена невыполнением бюджетных обязательств и отсутствием эффективных и прозрачных процедур формирования и изменения тарифов. Между тем большинство проектов модернизации жилищного фонда и коммунальной инфраструктуры, транспортной сферы потенциально являются коммерчески выгодными. Возможно, что создание условий для притока частных инвестиций могло бы кардинально изменить финансовое положение отрасли.

К сфере ЖКХ, при всей стабильности и большой привлекательности по объемам работ, современный частный бизнес относится с опаской по следующим причинам:

– большая «затратность» производства;

– высокая стоимость капитального строительства;

– долгий срок окупаемости инвестиционных проектов;

– нестабильность тарифной политики;

– недостаточная прозрачность финансовых потоков;

– риски потери инвестиций от непрогнозируемой политики региональных властей [1].

Как отмечает большинство специалистов, в целях обеспечения благоприятных условий для привлечения частного бизнеса в жилищную и коммунальную сферы необходимо:

– финансовое оздоровление предприятий и организаций жилищно-коммунального комплекса;

– законодательное установление единого порядка тарифного регулирования;

– перевод отдельных видов услуг на самоокупаемость;

– проведение детального анализа системы управления жилищным и коммунальным комплексами муниципальных образований;

– создание рыночных отношений в сфере управления жилищным фондом.

Мы выделяем три первоочередные организационные задачи, которые необходимо решить для начала решения экономико-финансовых проблем предприятий городского хозяйства:

– решение межведомственной «неразберихи», то есть создание четкой нормативно-правовой базы, которая прописывала бы обязанности всех ведомств в ходе реформы ЖКХ;

– привлечение бюджетных средств для организации реформы ЖКХ;

– создание городской межведомственной комиссии по вопросам реформирования ЖКХ.

Решение этих задач позволит существенно снизить риски реформы ЖКХ за счет привлечения частного бизнеса в жилищную и коммунальную сферу. Однако надо понимать, что сложность экономических проблем предприятий городского хозяйства очень велика, и потребуется немало усилий для повышения экономической эффективности городского хозяйства.

Библиографический список

1. Кондратьева, М.Н. Организация и управление жилищно-коммунальным хозяйством / М.Н. Кондратьева. – Ульяновск: УлГТУ, 2009. – 160 с.

2. Российский статистический ежегодник. 2013. – М.: Росстат, 2013. – 717 с.

К содержанию

УДК 624.074.4 + 691.175.5/.8:678.067.5

РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОЙ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И МОНТАЖА КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.В. Мишнёв, В.М. Асташкин, Д.А. Маликов

Работа носит прикладной характер, относится к области строительства и посвящена разработке новой мобильной технологии производства и монтажа крупногабаритных оболочек из ПКМ (в частности стеклопластиков), применяемых в таких промышленных сооружениях как дымовые и вентиляционные трубы, подводящие газоходы, резервуары, трубопроводы и нефтепроводы. Результаты могут быть использованы как при новом строительстве, так и при реконструкции существующих промышленных сооружений.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, стеклопластики, метод намотки.

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–20013 годы» в Южно-Уральском государственном университете разрабатываются основные принципы и опытное оборудование для изготовления оболочек из ПКМ вертикальной намоткой с подращиванием.

Разрабатываемый способ позволит производить оболочки теоретически неограниченной длины непосредственно на месте строительства по мобильной технологии.

В строительной отрасли крупногабаритные цилиндрические оболочки из полимерных композиционных материалов (ПКМ) применяются в конструкциях сооружений, подверженных одновременному воздействию механических нагрузок, агрессивных сред и, в частых случаях, повышенных температур. К таким конструкциям относятся трубопроводы инженерных сетей, нефтепроводы, дымовые трубы, газоходы, пульпопроводы, резервуары и емкости.

Эффективность применения оболочек из ПКМ (в основном стеклопластиков) обеспечивается благодаря высокой удельной прочности материала, его химической стойкости, малому весу и подтверждается российским и мировым опытом [1, 2, 3, 4, 5]. Например, в России за период с 1991 по 2012 год возведено и успешно эксплуатируется более 100 дымовых труб диаметром до 5 м и высотой до 150 м из стеклопластика. Также на сегодняшний день существует потребность применения крупногабаритных оболочек из ПКМ при реконструкции существующих дымовых труб, выполненных из традиционных материалов (железобетона, стали, кирпича) и исчерпавших свой ресурс [2].

Выбор направления исследований, которые легли в основу настоящей работы, во многом был обусловлен тенденциями к снижению тепловой нагрузки, изменению структуры топливно-энергетического баланса, а также внедрению энергосберегающих технологий и систем мокрой газоочистки. Предпосылки и обоснование внедрения данных мероприятий приведены во многих публикациях, например в обзорных статьях [6, 7, 8]. Данные мероприятия способствуют улучшению экологической обстановки и ведут к снижению издержек обусловленных компенсацией экономических последствий загрязнения окружающей среды.

Однако для существующих конструктивных решений газоотводящего тракта, выполненного из традиционных материалов, снижение температуры ниже точки росы не допускается, так как в противном случае образуется кислый конденсат, который приводит к быстрой коррозии и выходу из строя конструкций.

Между тем, при охлаждении дымовых газов ниже точки росы, теплоносителю при утилизации тепла отводимых газов кроме физической передачи энергии отдается тепло конденсации, величина которого на порядок выше. Как видно из рис. 2, съем тепловой энергии при охлаждении дымовых газов на 40 °С в интервале температур 90…50 °С в 6 раз выше, чем при охлаждении дымовых газов на те же 40 °С в интервале температур 130…90 °С.

Наиболее эффективными для конструкций, работающих в этих условиях, являются полимерные композиционные материалы и, в частности, стеклопластики. Обеспечив химическую стойкость конструкций газоотводящего тракта, мы намного повысим эффективность утилизации тепла и снизим энергопотери. Кроме того, так как в первую очередь конденсируются вредные примеси, то осуществляется более глубокая очистка отводимых в атмосферу газов.

Существующие способы производства крупногабаритных оболочек из ПКМ основаны на принципах мокрой или сухой намотки, одним из плюсов данных способов является монолитность и, как следствие, высокая надежность получаемой оболочки. При этом транспортировка крупногабаритных оболочечных конструкций диаметром более 2,5 м серьезно затруднена, а диаметром более 4,5 м практически невозможна, поэтому в данном случае либо можно прибегнуть к использованию сборных оболочек, либо к организации производства оболочек вблизи площадки строительства.

При использовании сборных оболочек из отдельных малогабаритных сегментов многократно снижается надежность конструкции из-за большого количества стыков и сложности их герметизации; существенно снижается технологичность изготовления, возрастают сроки и стоимость монтажа.

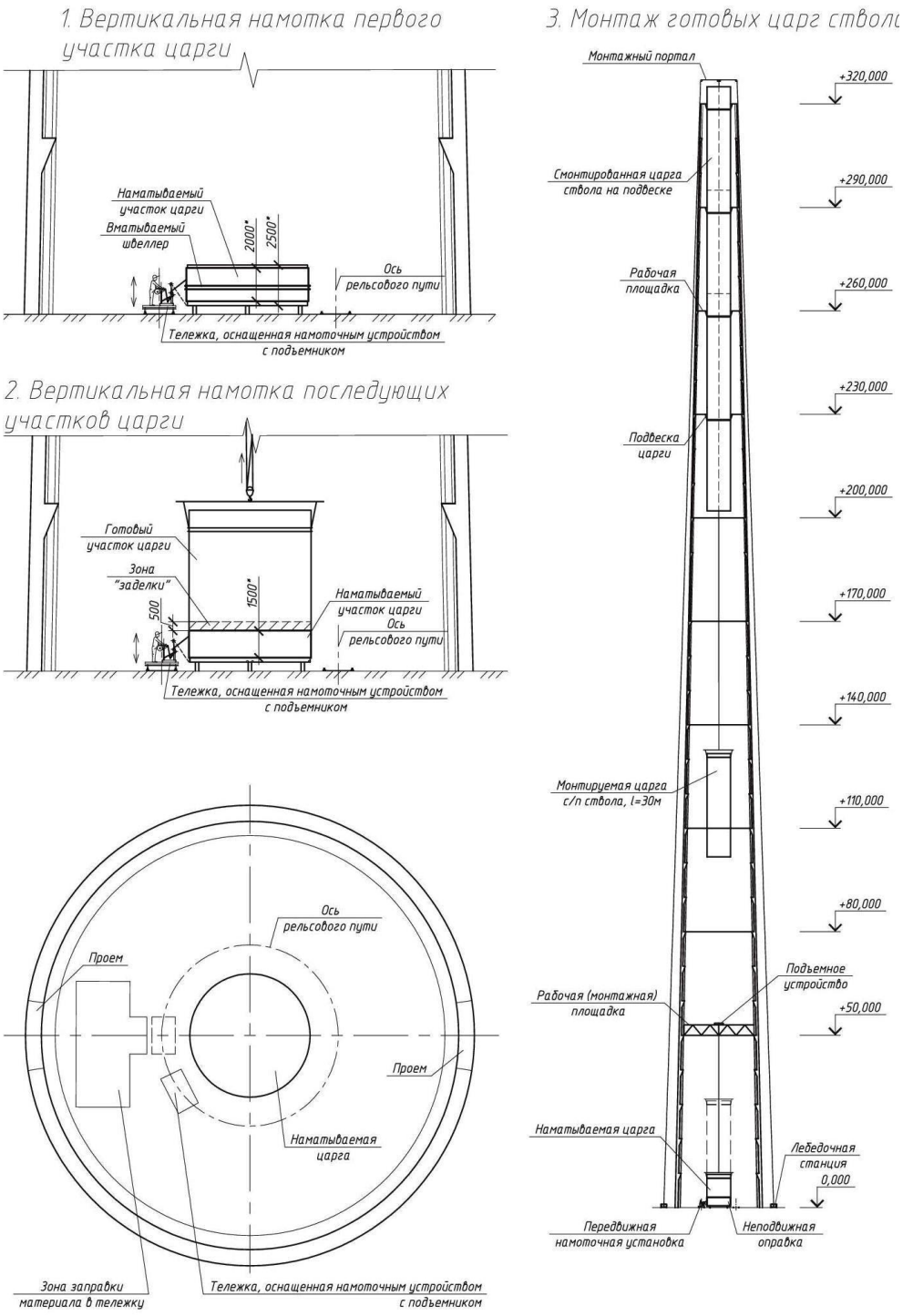


Рис. 1. Схемы производства и монтажа
внутреннего стеклопластикового ствола
для железобетонной дымовой трубы высотой 320 м
(со стационарной оправкой)

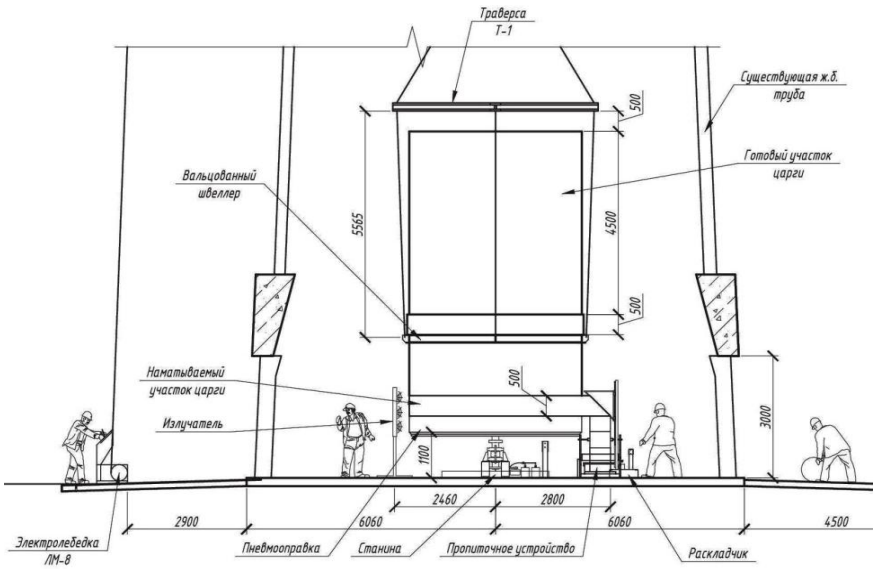


Рис. 2. Схемы производства и монтажа внутреннего стеклопластикового ствола для железобетонной дымовой трубы высотой 320 м (с вращающейся оправкой)

Существующие технологические линии непрерывной намотки для производства труб большой длины ориентированы на заводское изготовление труб малого диаметра. Оборудование для циклической намотки оболочек большого диаметра на месте монтажа требует громоздкой оснастки, главным образом, из-за необходимости применения оправок с рабочей длиной равной длине монтажного элемента.

Для оболочек дымовых труб большого диаметра (более 2,5 м) определяющими толщину сечения их стенки являются монтажные нагрузки, поэтому для их изготовления рациональным видится переход от горизонтальной намотки к вертикальной, что позволит исключить операцию кантовки оболочки и снизить монтажные нагрузки, в результате снизится материалоемкость оболочки.

Существующие способы и оборудование для вертикальной намотки либо могут быть использованы только в заводских условиях, либо являются циклическими и позволяют производить оболочки фиксированной длины, ограниченной длиной оправки [9, 10, 11].

Идея, положенная в основу наших разработок, заключается в изготовлении оболочек из ПКМ вертикальной мокрой намоткой на короткой оправке с циклическим подращиванием оболочки снизу до получения ее необходимой длины. При этом последовательность операций в методе подращивания следующая: наматывается и отверждается первая секция трубы, она сдвигается по оправке вверх, далее без отрезки ткани продолжается намотка следующей секции, при этом образуется монолитный стык между наращиваемой и подращиваемой секциями.

При установке стеклопластикового ствола в железобетонную трубу технически возможно по этой технологии, используя метод подращивания, изготавливать за короткое время непосредственно внутри железобетонной трубы монолитные оболочки диаметром до 12 м длиной по 30…50 м. Это существенно уменьшит расход материала на оболочки и поддерживающие конструкции, снизит стоимость, а также облегчит их монтаж. Такие работы рационально выполнять силами строительно-монтажных организаций на мобильных комплексах.

Предлагаемый способ совмещает процессы производства и монтажа царг газоотводящего ствола. В строительстве давно и успешно применяются подобные подходы. Наиболее распространенным примером является возведение конструкций из монолитного железобетона, когда формирование конструкции осуществляется в ее проектном положении непосредственно на строительной площадке, т.е. монтаж и создание конструкции происходят в рамках одного процесса.

Схемы производства и монтажа внутреннего стеклопластикового ствола на примере реконструкции дымовой трубы высотой 320 м показаны на рис. 1, 2. Возможны два способа организации производства: 1-й – со стационарной оправкой, вокруг которой по рельсовым путям перемещается пропиточное устройство с раскладчиком и нагреватели (рис. 1); 2-й – со стационарным пропиточным устройством и нагревателями, с вращающейся оправкой (рис. 2).

При стационарной оправке преимуществом является то, что намотанная труба, имеющая значительную длину, не вращается, однако при этом возникают сложности с подачей материалов на движущийся раскладчик и организацией термообработки. При вращающейся оправке упрощается подача материалов и термообработка, но возникает необходимость организации балансировки намотанной части трубы.

Разработка модифицированного принципа вертикальной намотки требует решения комплекса задач:

– разработка основных положений предлагаемой технологии;

– подбор состава стеклопластика для изготовления газоотводящих стволов дымовых труб с учетом особенностей предлагаемой технологии, эксплуатационных и экономических требований;

– оценка влияния на механические свойства стеклопластика различных дисперсных добавок, обеспечивающих требуемые свойства связующего на стадии изготовления и изготовленных оболочек на стадии эксплуатации;

– разработка проекта и изготовление опытного, а впоследствии опытно-промышленного оборудования для вертикальной намотки труб методом подращивания для отработки технологического процесса;

– задание параметров технологического процесса и их корректировка при его отработке;

– разработка технической документации по изготовлению и монтажу оболочек из ПКМ вертикальной намоткой с подращиванием и др.

В настоящее время разработана и изготовлена лабораторная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 3.

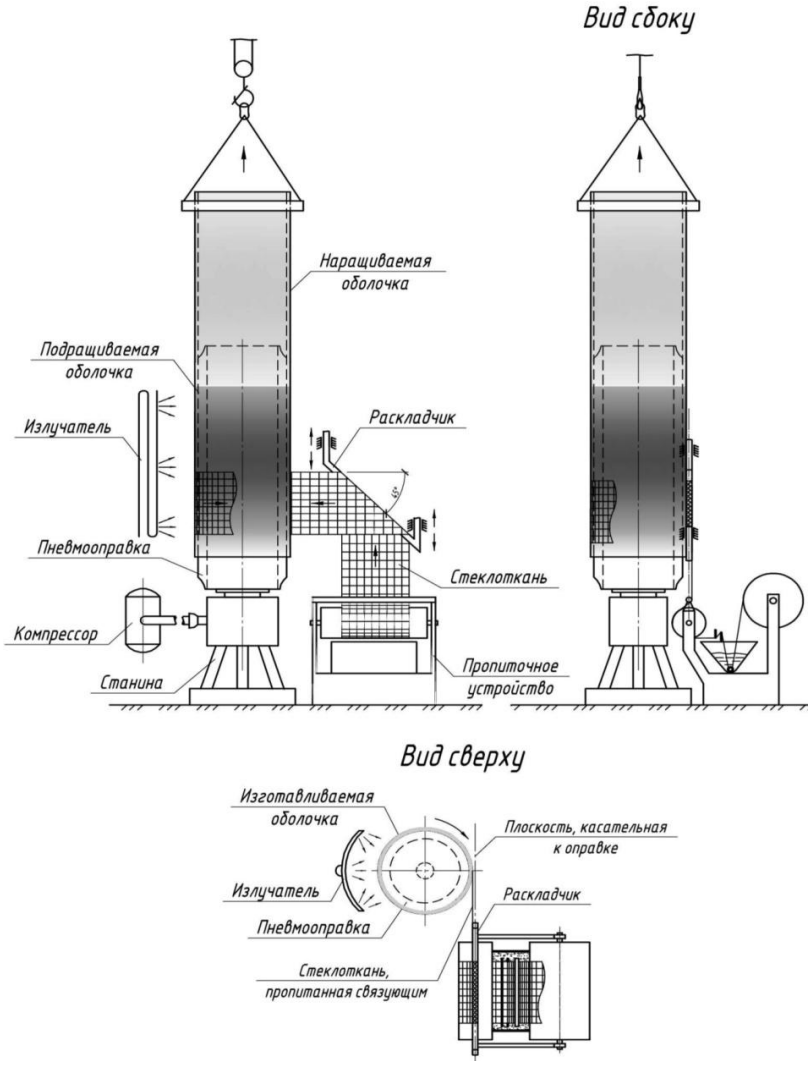


Рис. 3. Схема производства оболочки на лабораторной установке

Для обеспечения непрерывности изготовления в методе подращивания одним из наиболее важных моментов является правильный выбор технологических параметров, таких как – скорость вращения оправки и скорость перемещения раскладчика. Выбор скорости перемещения раскладчика зависит от требуемой толщины стенки изделия, выбор скорости вращения оправки зависит от времени отверждения изделия на оправке. Данные параметры должны быть подобраны таким образом, чтобы к концу намотки секции она полностью отвердилась и была готова к сдвижке вдоль оправки.

Дальнейшее развитие и внедрение в практику строительства разрабатываемой технологии позволит снизить материалоемкость крупногабаритных стволов дымовых труб из ПКМ за счет уменьшения толщины стенки (ориентировочно на 20…30 %), снижения количества монтажных элементов и стыков, поддерживающих металлоконструкций (в среднем в 3…5 раз), сократить сроки и в целом снизить стоимость строительства.

Библиографический список

1. Асташкин, В.М. Крупногабаритные оболочки из стеклопластиков в химических аппаратах и газоотводящих трактах / В.М. Асташкин, М.В. Мишнёв, В.А. Пазущан // Композитный мир. – 2006. – № 6. – С. 10–14.

2. Асташкин, В.М. Методы реконструкции и ремонта дымовых труб / В.М. Асташкин, Д.А. Маликов, М.В. Мишнев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Строительство и архитектура». – 2012. – Вып. 15. – № 38 (297). – С. 14–18.

3. Вирясов, А.Н. Применение труб коррозионно-стойкого исполнения для обеспечения надежности нефтегазотранспортных систем Западной Сибири [Электронный ресурс] / А.Н. Вирясов // «Инженерный вестник Дона». – 2013. – № 1. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1487/.

4. McConnell, V. Resurgence in corrosion resistant composites / Vicky P. McConnell // Reinforced plastics. – November 2005. – pp. 20–25.

5. NewBerry, A. World largest FRP storage tanks / Alfred L. Newberry // Reinforced plastics. – November 2005. – pp. 26–29.

6. Зерщикова, М.А. Последствия загрязнения окружающей среды и их влияние на экономические показатели (методы сохранения и улучшения состояния окружающей среды) [Электронный ресурс] / М.А. Зерщикова // «Инженерный вестник Дона». – 2011. – № 1. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/326/.

7. Гавриленко, А.В. Основные направления энергосбережения в региональной экономике [Электронный ресурс] / А.В. Гавриленко, А.Л. Кирсанов, Т.П. Елисеева // «Инженерный вестник Дона». – 2011. – № 1. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/340/.

8. Страхова, Н.А. Концепция энергоресурсосберегающей деятельности в промышленности [Электронный ресурс] / Н.А. Страхова, Н.Ю. Горлова // «Инженерный вестник Дона». – 2011. – № 1. – URL: http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2011/359/.

9. Цыплаков, О.Г. Основы формования стеклопластиковых оболочек: Монография / О.Г. Цыплаков. – Л.: Машиностроение, 1968. – 176 с.

10. Басов, Н.И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов: Учеб. для вузов / Н.И. Басов, Ю.В. Казанков, В.А. Любартович. – М.: Химия, 1986. – 488 с.

11. Асташкин, В.М. Дымовые трубы и элементы газоотводящих трактов из полимерных композиционных материалов: Монография / В.М. Асташкин, В.С. Жолудов, А.З. Корсунский, Е.В. Малютин, Б.Б. Спорыхин; под ред. члена-корреспондента РАН Б.В. Гусева и генерального директора ОАО «Авангард» К.А. Горелого. – Челябинск: Абрис-принт, 2011. – 155 с.

К содержанию

УДК 624.012.45 + 378.016:624.014.45

МЕТОДИКА ПРЕПОДАВАНИЯ КУРСА «ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ» НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ПРИМЕРА РАСЧЁТА ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ

В.А. Мусихин

Рассмотрена оптимизированная методика преподавания курса «Железобетонные конструкции» с помощью теоретических отступлений (ТО), которые являются составной частью расчётно-теоретического примера конструирования и расчёта предварительно напряжённой плиты междуэтажного перекрытия.

Ключевые слова: методика преподавания, теоретические и эмпирические формулы, теоретические отступления, расчётно-теоретический пример, усвоение знаний.

Все науки, и строительство в том числе, состоят из двух частей: теории и практики. В строительстве теория и практика слились в одно целое, и отделить их друг от друга очень непросто. Но в процессе обучения студентам нужно объяснить теоретическую основу практических расчётов. Студентов нужно научить отвечать на вопрос «почему так, а не иначе?».

Традиционная методика преподавания, принятая в высших учебных заведениях Российской Федерации, заключается в раздельном изучении теории и практики. Сначала читаются лекции по теории, а затем проводятся практические занятия, либо курсовое проектирование. Очень часто лекции и практические занятия проводятся параллельно, то есть, может происходить опережающее изучение практики без наработанной теоретической базы. Часто лекции и практику ведут разные преподаватели, которые по различным причинам слабо скоррелированы между собой. Случается, что на практических занятиях преподаватель вынужден повторять некоторые разделы теории, которые сложны для восприятия.

Жёсткое деление на «чистую» теорию и «чистую» практику, принятое в высшей математике, физике, теоретической механике и других фундаментальных науках, абсолютно не применимо в прикладной строительной науке. Студенты, проучившись на первых курсах, часто плохо подготовлены к восприятию специальных курсов.

Многие строительные закономерности (процессы, явления) невозможно смоделировать чисто теоретически, а можно исследовать только опытным путём. И к теоретическим формулам добавятся эмпирические поправочные коэффициенты. Получается сложная комбинированная формула.

Для оптимизации процесса обучения автор статьи, основываясь на своём опыте проведения практических занятий скоррелированных с лекционным (теоретическим) материалом, предлагает использовать в **практиче-**

ском примере расчёта и конструирования железобетонной конструкции **теоретические отступления (ТО)** [1]. В результате получается **расчётно-теоретический пример**, который позволяет добиться целостного восприятия студентом курса железобетонных конструкций. При выполнении численных расчётов происходит системная корреляция с теоретическими постулатами через ТО, которые в доступной форме объясняют студенту различные теоретические закономерности и сложные формулы.

Основной базовый учебник по курсу «Железобетонные конструкции» это учебник В.Н. Байкова [2] толщиной 767 страниц. Случается, что увидев этот учебник студент пугается и совсем его не открывает, опасаясь вообще не найти в нём нужный материал из-за колоссального объёма учебника и только зря потерять время на поиски. В этом учебнике даны практические примеры расчёта и конструирования различных железобетонных конструкций, но эти примеры представлены сплошным текстом (и числа, и формулы) без каких-либо пояснений и объяснений, откуда что берётся. При этом примеры и рисунки представлены с многочисленными опечатками, затрудняющими понимание. Рисунки и схемы в примерах настолько уменьшены, что понять их не всегда возможно. Разобраться в учебнике [2] очень трудно даже хорошо подготовленному кандидату технических наук, имеющему время для подготовки к учебным занятиям.

Общеизвестно, что уровень общей подготовки студентов дневной, очно-заочной (вечерней) и заочной форм обучения может значительно различаться. Кроме того, студенты заочной формы обучения из отдалённых и труднодоступных районов РФ имеют возможность консультироваться у квалифицированного преподавателя только во время сессий (три раза в год). В процессе изучения курса строительных конструкций неподготовленному студенту, ограниченному во времени, самостоятельно разобраться в примерах учебника [2] практически нереально.

Предложенный автором **расчётно-теоретический пример** не является заменой базовых учебников. Авторское учебное пособие [1] представляет собой демпфирующий слой (буфер) между студентом и базовыми учебниками (рис. 1).

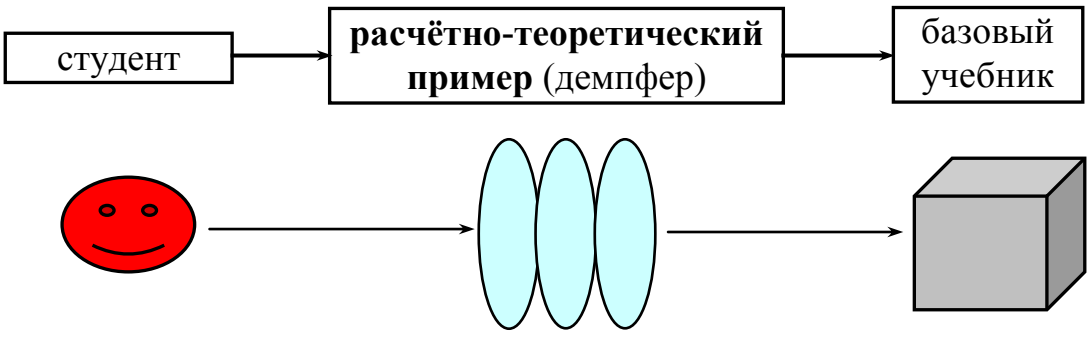


Рис. 1. Место учебного пособия в системе обучения

Автор, потратив много времени на изучение теории железобетонных конструкций, легче ориентируется в базовых учебниках большого объёма. Автор пособия имеет возможность, не торопясь, спокойно выбрать в океане информации нужный для изучения материал и указать его точное месторасположение. Таким образом, студент не тратит время на поиски нужной информации в различных учебных изданиях большого объёма, а сразу приступает к изучению нужного вопроса.

Практически в каждом ТО после авторского объяснения теоретического материала приводится ссылка на развёрнутую информацию объёмом 2…4 страницы в базовых учебниках. На указанных страницах теоретический материал из авторских ТО представлен более подробно и дополнен пояснительными рисунками и схемами. Студент при выполнении курсового проекта может ограничиться изучением ТО, а впоследствии при подготовке к экзамену изучить материал учебника.

Каждое ТО в пособии [1] представляет собой «мост» от студента к какому-либо базовому учебнику. Наглядно этот тезис представлен на рис. 2.

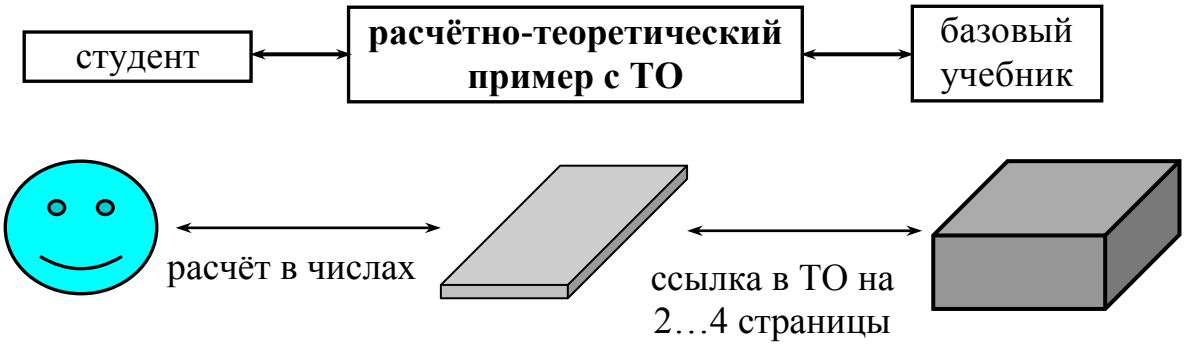


Рис. 2. Путь к базовому источнику знаний через учебное пособие

При использовании в процессе обучения разработанного автором **расчётно-теоретического примера** [1] достигается объёмное восприятие конструирования и расчёта железобетонной конструкции. Также при этом оптимизируется процесс самостоятельной работы студентов и, таким образом, повышается качество усвоения знаний, в особенности у иногородних студентов, которые не имеют возможности консультироваться с преподавателем постоянно.

Библиографический список

1. Мусихин, В.А. Расчёт и конструирование железобетонных плит сборного перекрытия: учебное пособие / В.А. Мусихин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 142 с.

2. Байков, В.Н. Железобетонные конструкции. Общий курс: учебник для вузов / В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.

К содержанию

УДК 697.34 + 697.911

ПРИМЕНЕНИЕ CFD-ПРОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И ВОЗДУШНЫХ РЕЖИМОВ ПОМЕЩЕНИЙ

А.Н. Нагорная

Проведено численное моделирование и исследование формирования температурных и скоростных полей в помещении кинотеатра при проектировании вентиляции. Для реализации задачи используется конечно-элементарный программный комплекс Flow Simulation, являющийся приложением к продукту SolidWorks. Произведена оценка комфортности помещения на основе интегрированных в комплекс критериев.

Ключевые слова: CFD-моделирование воздушных и тепловых полей, Solid Works Flow Simulation; вентиляция помещений.

Поведение тепловых и воздушных потоков при вентиляции помещений представляет собой сложное явление, которое трудно прогнозировать. Используемые в настоящее время инженерные методы расчета воздушных струйных течений, основанные на решении аналитических уравнений теплового и воздушного баланса помещений, крайне ограничены в своих возможностях. Инженерный расчет, как правило, является неточным, поэтому применение пакетов CFD-программ (computational fluid dynamics) на основе расчетного газодинамического моделирования позволяет получить полный анализ распределения полей температур и скоростей в отапливаемых и вентилируемых помещениях[1]. Развитие современной вычислительной техники и коммерческих программных пакетов для CFD-моделирования позволяют использовать персональные компьютеры для решения комплексных задач воздухораспределения сложных помещений различного назначения.

На этапе предварительного проектирования систем обеспечения микроклимата помещений, результаты численного моделирования позволяют:

– спрогнозировать и объективно сравнить между собой результаты реализации различных рассматриваемых схем подачи и удаления воздуха, размещения отопительных приборов;

– получить картину пространственного распределения величин температуры, вредных примесей, влажности и скорости воздуха в заданном помещении для рассматриваемой конфигурации системы;

– глубже понять особенности функционирования систем и выработать рекомендации по оптимизации конструкции либо режима их функционирования.

Из минусов данного подхода следует отметить то, что использование CFD-программ для трехмерного моделирования требует определенной квалификации и компьютерных ресурсов.

В данной работе проведено исследование тепловлажностного режима помещения кинотеатра при проектировании приточной вентиляции по вытесняющей схеме. Приточный воздух подается под кресла зрителей в объеме 40 м^3/ч через одно воздухораспределительное устройство. Количество воздухораспределительных устройств равно количеству посадочных мест в зале – то есть 120 штук. Температура приточного воздуха 20 °С. Удаление воздуха осуществляется из верхней зоны помещения.

Расчет системы вытесняющей вентиляции отличается от традиционного расчета смешивающей схемы (подача воздуха в верхнюю зону и удаление с верхней зоны), где все помещение представляется как единая зона. Суть расчета вытесняющей вентиляции заключается в определении минимального расхода воздуха при заданной температуре притока, необходимого для обеспечения расчетной температуры воздуха в помещении и соблюдения при этом условий комфортности. Сложность расчета заключается в том, что изначально не известна температура удаляемого воздуха. Эта температура определяется путем решения системы уравнений теплового баланса отдельных зон помещения с учетом лучистого теплообмена между внутренними поверхностями помещения. Более точным методом расчета вытесняющей вентиляции является подробный расчет конвективного и лучистого теплообмена всего помещения с использованием вычислительной аэрогидродинамики. Для расчета использовался программный пакет Solid Works Flow Simulation.

В качестве расчетной области рассматривается параллелепипед, заполненный воздухом. Так как помещение кинозала находится в составе развлекательного комплекса, то есть внутри другого помещения, то принимается, что теплопередача между смежными помещениями отсутствует.

Исследуемая задача описывается системой уравнений, в состав которой входит:

– система уравнений Навье — Стокса:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} + V\Delta\vec{v} - \frac{1}{\rho}\nabla \mathrm{p} + \vec{f}, \quad (1)$$

– уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \alpha\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \quad (2)$$

– уравнение радиационного теплообмена:

$$Q_k = \varepsilon\sigma_0 T_w^4, \quad (3)$$

Влияние гравитации моделируется с помощью члена $S_{gravity}$:

$$S_{gravity} = -\rho g_i, \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) используются следующие обозначения: ∇ – оператор Набла, Δ – оператор Лапласа, ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, p – давление, $\vec{f}$ – векторное поле массовых сил, t – время, u – скорость текучей среды, ε – степень черноты поверхности, σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана, T_w – температура поверхности, g_i – i-я составляющая (вдоль i-й оси системы координат) вектора гравитационного ускорения.

Используемые в математической модели системы дифференциальных и/или интегральных уравнений обычно не имеют аналитического решения, поэтому они приводятся к дискретному виду и решаются на некоторой расчетной сетке. Таким образом, решение математической задачи будет тем точнее, чем лучше расчетная сетка разрешает области нелинейного поведение решения уравнений, что лучше достигается использованием более мелкой расчетной сетки в этих полях.

Для нахождения искомого численного значения задачи непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов, используемая в Flow Simulation, дискретизируется как по пространству, так и по времени. Чтобы выполнить дискретизацию по пространству, вся расчетная область покрывается расчетной сеткой, грани ячеек которой параллельны координатным плоскостям используемой в расчете декартовой глобальной системы координат модели. Поскольку в Flow Simulation используется метод конечных объемов, значения переменных рассчитываются в центрах ячеек, а не в узлах расчетной сетки, то используемая в расчетная сетка описывается ее ячейками, а не узлами, как в методах конечных разностей. Соответственно, ячейки расчетной сетки имеют форму параллелепипедов. Область, в которой эта сетка строится, также имеет единообразную для всех задач форму параллелепипеда.

Минимальный размер ячейки в двухмерном пространстве составляет 5 мм, в зоне пребывания людей размер ячейки уменьшен до 1 мм.

В помещениях с массовым пребыванием людей и незначительным остеклением, таких как кинозал, основным источником теплоты является человек. Локальный нагрев в области его пребывания создает вертикальный и горизонтальный градиенты температуры (рис. 1). Течение воздуха в нижней части направлено к центру, а над центральной частью (источником теплоты) формируется интенсивное подъемное течение. В верхней части слоя радиальное движение направлено к периферии. Данным образом происходит формирование конвективного струйного течения.

В масштабах всего помещения, просматривается формирование слоев воздуха с одинаковой температурой (рис. 2), что типично для данной схемы подачи воздуха.

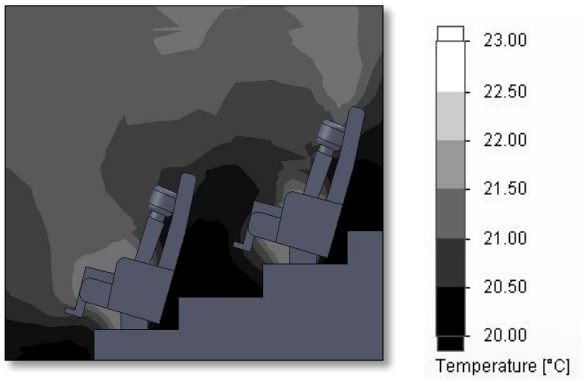


Рис. 1. Градиент температуры в зоне пребывания человека

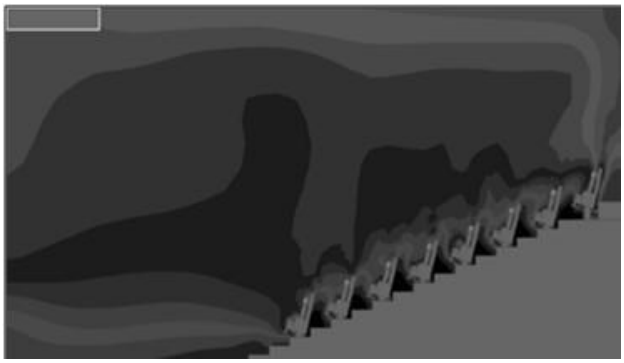


Рис. 2. Градиент температуры в объеме помещения кинотеатра

На рис. 3 представлен график распределения температуры воздуха по высоте помещения.

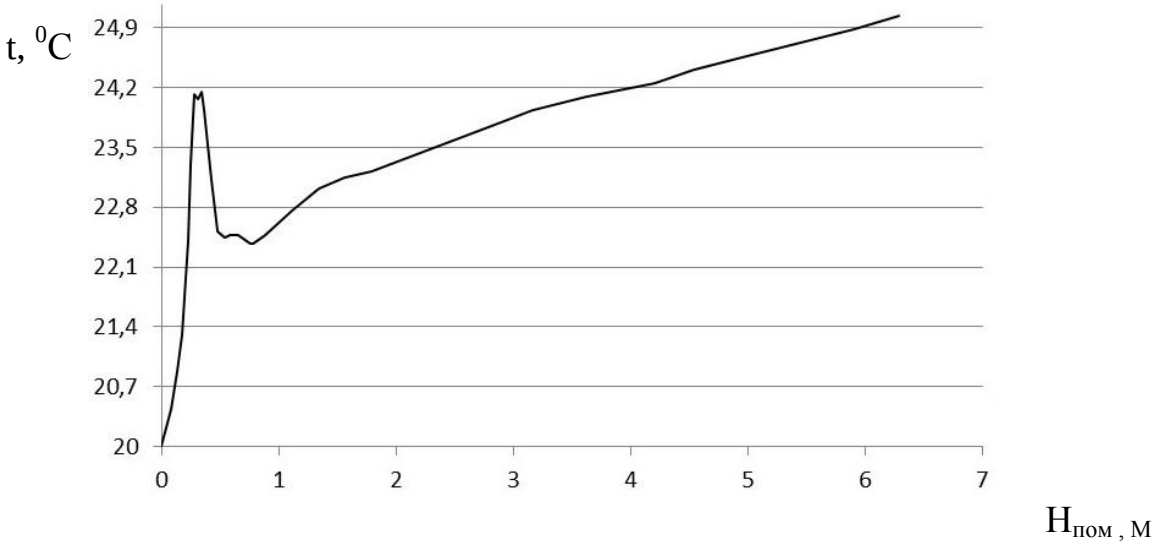


Рис. 3. Градиент температуры в объеме помещения кинотеатра

Температура воздуха в наивысшей точке помещения является температурой удаляемого воздуха и равна 25,1 °С.

В рамках аналитического метода проектирования, температура удаляемого воздуха определяется следующим соотношением:

$$t_y = t_в + \text{grad } t \cdot (H - H_{р.з.}) \quad (5)$$

Температура воздуха, полученная в результате расчета по формуле (5) равна 25,75 °С. По полученной разнице температур можно судить о хорошей сходимости результатов для двух методов проектирования.

Расчет температурного поля показал, что средняя температура в окрестности сидящего человека составляет 22,5 °С (рис. 4).

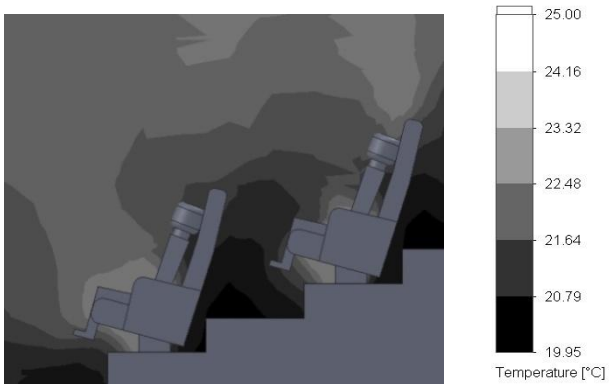


Рис. 4. Формирование поля температур в рабочей зоне

Средняя подвижность воздуха в окрестности сидящего человека составляет 0,154 м/с (рис. 5).

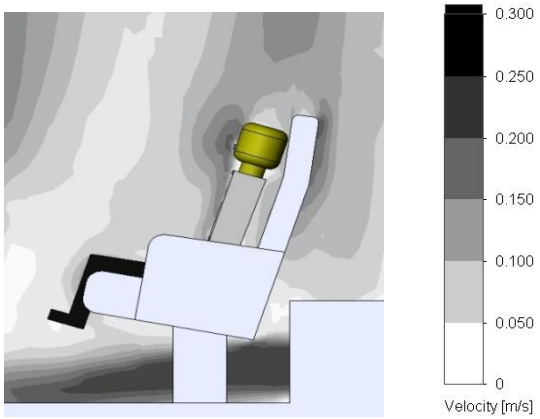


Рис. 5. Формирование поля скоростей в рабочей зоне

Формирование потенциально опасной *примыкающей* зоны, то есть зоны, где расстояние от воздухораспределителя до точки, в которой скорость воздуха уменьшается до значения 0,3 м/с, показано на рис. 6.

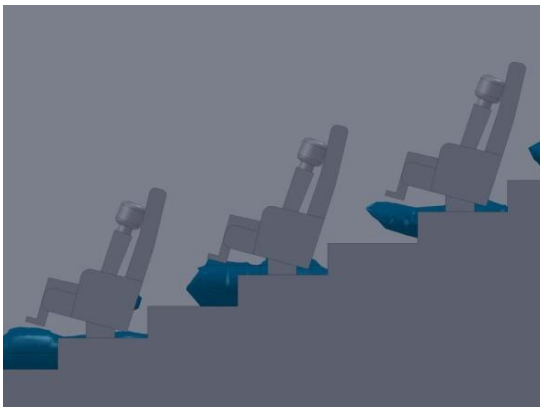


Рис. 6. Расчет примыкающей зоны

Согласно [3] величина примыкающей зоны определяется следующим соотношением:

$$l_{\text{п}} = 0{,}005 \cdot q_s \cdot K_{Dr} \quad (6)$$

где K_{Dr} – постоянная воздухораспределителя, для распределителя типа АНР, согласно данным производителя, принимается равной 5,7; q_s – объемный расход приточного воздуха, л/с.

Расчет по формуле (6) показал, что длина примыкающей зоны равна 0,37 м, что соответствует длине зоны, полученной в результате моделирования.

Как видно рассчитанные параметры микроклимата (температура, подвижность воздуха, длина примыкающей зоны) близки к оптимальным условиям, принятым по [2].

Программный модуль HVAC Flow Simulation обладает функциональностью, позволяющей прогнозировать параметры теплового самоощущения, степень дискомфорта людей, подвергнутых действию окружающей среды, и оценить качество воздуха посредством соответствующих критериев.

Функция средней прогнозируемой оценки PMV (Predicted Mean Vote) показывает реакцию человека на тепловой комфорт и описываются уравнением:

$$\text{PMV} = (0.303\, e^{-0.036M} + 0.028)\, L, \quad (7)$$

где M – показатель обмена веществ, характеризующий тепловыделения от людей в зависимости от их двигательной активности, met (*1 met = 58,1 Вт/*м^2); *L* – разница между производимым внутренним теплом человека и потерями в окружающую среду.

Распределение средней прогнозируемой оценки показано на рис. 7. Стоит заметить, что диапазон оптимальных значений находится в промежутке от -0,5 до +0,5. Видно, что значение PMV находится в оптимальных пределах во всей зоне пребывания людей за исключением последнего ряда, где значения PMV повышены до +0,64. Это объясняется сосредоточением на-

гретых конвективных потоков вследствие их естественного движения вверх. В целом, отклонение от верхнего предела оптимальных значений на 0,14 не является критичным фактором, так как верхний предел критерия составляет +3, что обуславливает сбои в работе систем кондиционирования.

На основании интегрированных критериев комфорта можно делать выводы о благоприятных и неблагоприятных зонах в масштабах пребывания одного человека. Так из рис. 7 следует, что «теплой» является зона возле головы человека – следствие влияния конвективных потоков.

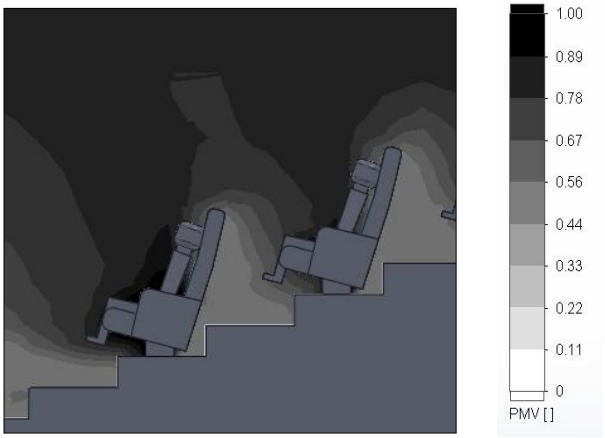


Рис. 7. Распределение средней прогнозируемой оценки (PMV)

Следующим исследуемым параметром является действующая температура сквозняка EDT (Effective Draft Temperature), которая является мерой различия температуры между местным и средним ее значениями с учетом движения воздуха при условии, что влажность и излучение постоянны в рассматриваемом объеме.

Согласно [4] большинство людей в сидячем положении ощущает себя комфортно, если EDT находится в интервале от -1,7 °C до 1 °C. На рис. 8 представлено распределение температуры сквозняка в исследуемом помещении. Локальные значения этой функции находятся в допустимых пределах, за исключением зоны ног, где значение действующей температуры сквозняка равно -2,1 °C, что свидетельствует о слегка повышенной подвижности воздуха с температурой ниже средней температуры воздуха в помещении.

В данной работе было проведено численное исследование формирования температурных и скоростных полей в помещении кинотеатра посредством использования конечно-элементарного программного комплекса Flow Simulation. Анализ полученных результатов был проведен на основе базовых термодинамических параметров и интегрированных в программный комплекс критериев комфорта.

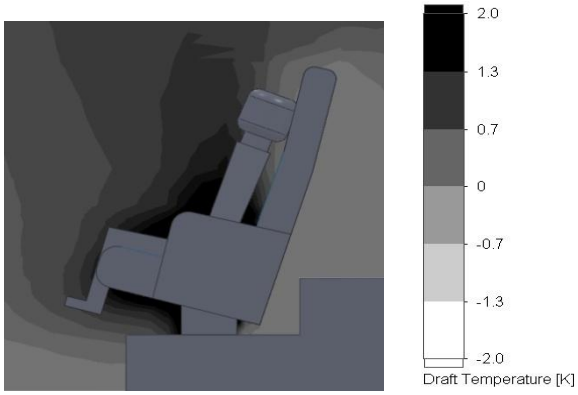


Рис. 8. Распределение температуры сквозняка (EDT)

На основании решения данной задачи сделаны следующие выводы:

– для посетителей рассматриваемое помещение кинотеатра комфортно, так как параметры микроклимата в нем близки к оптимальным;

– в качестве зоны пониженного комфорта стоит отметить последний ряд, где наблюдается увеличение температуры воздуха в зоне пребывания людей, что объясняется сосредоточением нагретых конвективных течений вследствие их естественного движения вверх.

Кроме того, выполненная работа доказала достойную функциональность CFD-пакетов применительно к задачам этой и смежных отраслей. В случае расчета параметров микроклимата в помещениях большого объема, применение данных программных комплексов является обязательным, так как дает возможность получить практически любую информацию о формировании микроклимата в помещении, о распределении температур и скоростей в помещении, оценивать технические решения при проектировании инженерных систем и находить оптимальные варианты.

Библиографический список

1. Алямовский, А.А. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А.И. Харптонович, Н.В. Пономарев. – СПб.: БХВ-Пстсрбург, 2005. – 800 с.

2. ГОСТ 30494-96 «Параметры микроклимата в помещениях». – М: Издательство стандартов, 1999.

3. Алямовский, А.А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.

К содержанию

УДК 628.11(470.55) + 628.15(470.55)

ПРОБЛЕМЫ РЕНОВАЦИИ ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ г. ЮРЮЗАНЬ

Е.В. Николаенко, А.А. Курбангалеева

В результате анализа работы системы водоснабжения г. Юрюзань, показана её не эффективность и предложены мероприятия по её реконструкции на основе новейших технологий реновации водопроводных сетей с использованием современных и долговечных материалов.

Ключевые слова: источники водоснабжения, водопроводная сеть населенного пункта, бестраншейные методы реновации трубопроводов.

Челябинская область в сравнении с другими областями Уральского региона является дефицитной в плане обеспечения её пресной водой, не смотря на то, что обладает довольно развитой сетью рек и на территории области расположено достаточно много озер. Причиной этого является то, что большинство рек представлено на территории области своим верхним течением, поэтому имеют небольшие размеры и очень маловодны, а среди озер преобладают малые с площадью водного зеркала 0,5 кв. км и менее. Подавляющая часть подземных вод области относится к Большеуральскому сложному бассейну пластово-трещиноватых напорных и безнапорных гидрокарбонатных по химическому составу вод и запасы их на большей части области очень ограничены. В связи с этим экономия и рациональное использование природных вод является на сегодняшний день одной из приоритетных задач области [1].

Город Юрюзань расположен на западе Челябинской области в Катав-Ивановском районе. Источниками питьевого водоснабжения города являются подземные воды двух водозаборов Сильгинского и Молебского, относящихся к одному из крупных месторождений области – Катав-Ивановскому. На рис. 1 представлена доля каждого в структуре водозабора системы водоснабжения г. Юрюзань.

Система водоснабжения города кроме водозаборных сооружений включает в себя насосные станции 1-го и 2-го подъема, площадки очистных сооружений с обработкой воды гипохлоритом натрия, резервуары чистой воды, водопроводную сеть.

Общая протяженность сетей хозяйственно – питьевого водоснабжения г. Юрюзань составляет 51 км. Большая часть сети выполнена из стальных и чугунных трубопроводов, но встречается и асбестоцементные, которые на сегодняшний день не рекомендуются для сетей хозяйственно-питьевого водоснабжения. Большинство водоводов находятся в эксплуатации с 1954 года и по данным эксплуатирующей организации – ООО «Энергосервис»,

процент износа трубопроводов на 2013 год составляет 82 %. Результаты обследования показали, что на сегодняшний день требуется замена 44 км водоводов. Основным видом повреждений на стальных водопроводных трубопроводах является образование свищей, на чугунных трубах – нарушение герметичности раструбных соединений и перелом труб. Данное обстоятельство является причиной многочисленных утечек из системы водоснабжения и ухудшения качества воды, что приносят огромный экономический и экологический ущерб.

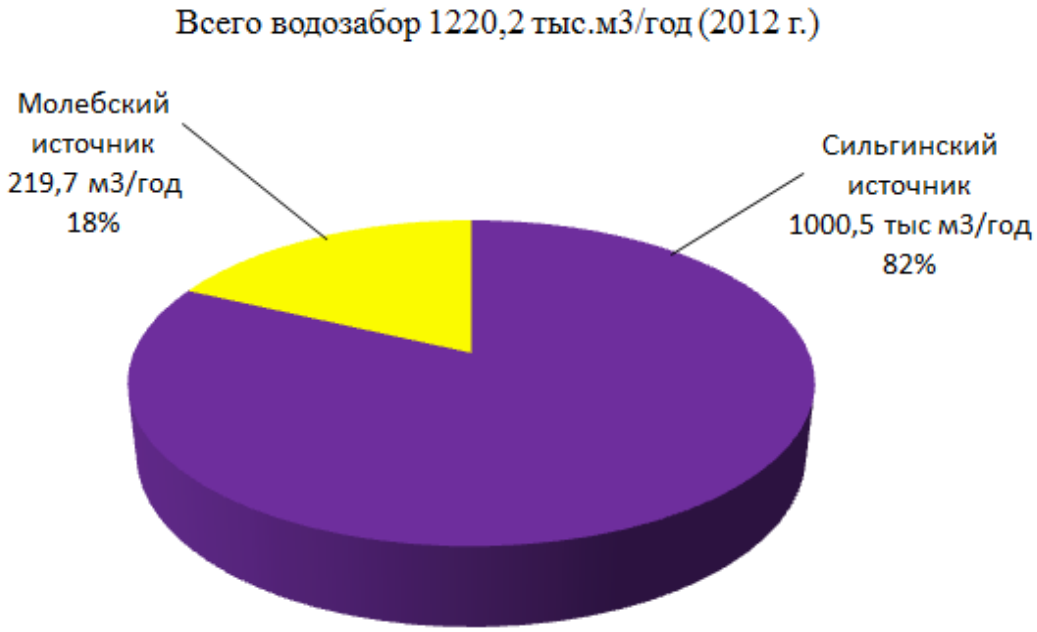


Рис. 1. Структура водозабора системы водоснабжения г. Юрюзань

На рис. 2 представлены диаграммы забора воды из источника, её распределение и потери, связанные с аварийностью водопроводной сети г. Юрюзань за последние четыре года.

Анализ работы системы водоснабжения города показал её крайнюю неэффективность, почти половина всей забираемой из подземных источников воды питьевого качества теряется водопроводной сетью по пути к потребителю. Это совершенно недопустимо при общем дефиците воды.

В связи с этим чрезвычайно важным является реновация сети города в самые кратчайшие сроки. Аварийность сети влияет не только на количество подаваемой воды, но и на её качество, делая её не безопасной в бактериальном и химическом отношении, а также неудовлетворительной по органолептическим показателям.

Однако замена старых трубопроводов на новые в таких количествах требует немалых финансовых средств, а также влечет технические трудности при открытом способе прокладки: превратить город в сплошную

траншею, это значит создать большие неудобства для жителей и автомобильного транспорта, а кроме того высока вероятность повреждения других подземных коммуникаций. Решением проблемы может стать бестраншейное восстановление поврежденных трубопроводов, которое в настоящее время приобретает все большую популярность. Их возможное применение в г. Юрюзань особенно актуально в связи со сложностью разработки скального грунта при традиционных способах замены трубопроводов. Неоспоримыми преимуществами бестраншейных технологий являются также их оперативность и экономичность. По данным строительной организации ЗАО «ЭНТОС» реконструкция водопроводных сетей открытым способом с разработкой траншеи в 1,5 раза дороже бестраншейной реновации.

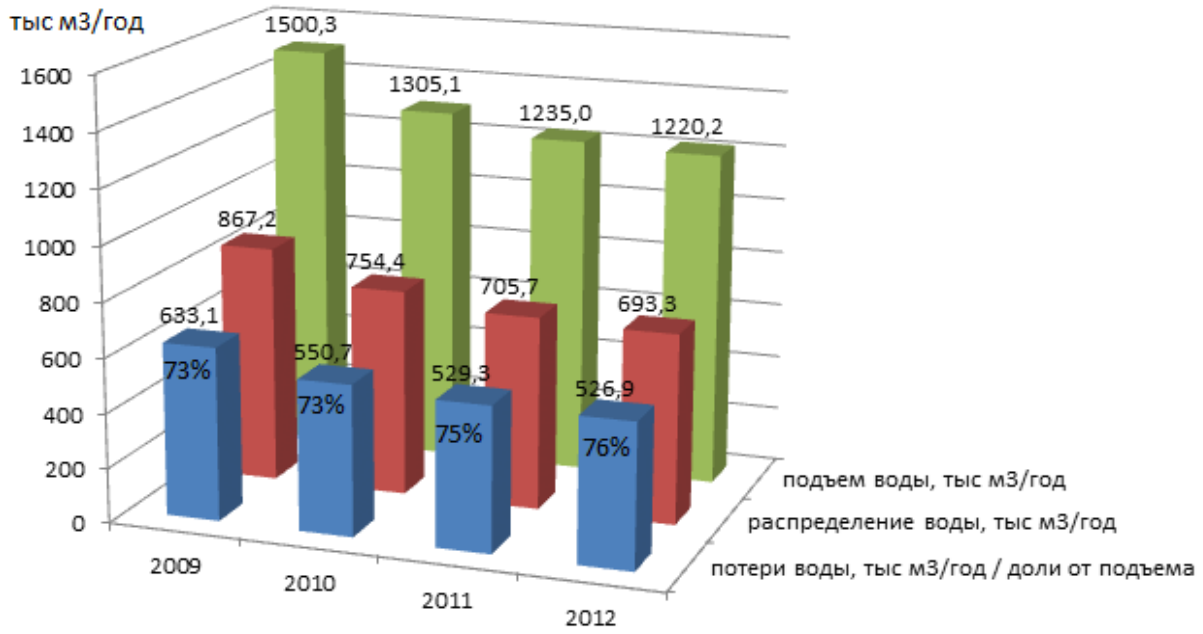


Рис. 2. Динамика водопотребления г. Юрюзань

Из многообразия существующих методов восстановления водопроводных сетей бестраншейными способами можно выделить следующие, получившие наибольшее распространение в мировой практике:

– нанесение цементно-песчаных покрытий на внутреннюю поверхность восстанавливаемого трубопровода;

– протаскивание нового трубопровода в поврежденный старый (с его разрушением и без разрушения) с помощью специальных устройств, например, пневмопробойников;

– протаскивание гибкой (предварительно сжатой или сложенной U-образной формы) полимерной трубы внутрь старого ремонтируемого трубопровода;

– использование гибкого комбинированного рукава (чулка), позволяющего формировать новую композитную трубу внутри старой.

Каждый из перечисленных методов восстановления отличается специфическими особенностями и имеет свои преимущества, на основе которых определяется соответствующая область их применения для ремонта водопроводных сетей.

В связи с критическим состоянием водопроводных сетей г. Юрюзань наиболее целесообразно применять метод протаскивания гибкого комбинированного рукава (чулка) для стальных и чугунных трубопроводов (рис. 3). Основным достоинством данного метода является возможность восстановления сильно разрушенных трубопроводов путем создания новой композитной тонкостенной трубы внутри ремонтного участка трубопровода, обладающей достаточной самостоятельной несущей способностью при минимальном снижении диаметра действующего трубопровода.

Метод протаскивания используется для нанесения сплошного защитного покрытия на внутреннюю поверхность трубопроводов при любой глубине заложения труб и не зависит от типа грунтов, окружающих трубопровод.

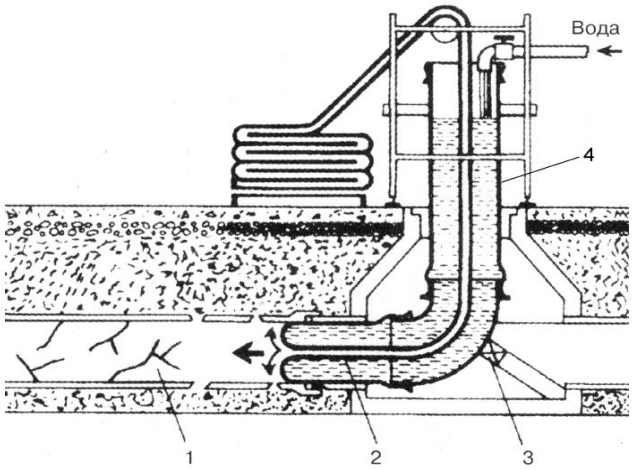


Рис. 3. Схема введения на ремонтный участок скрученной в рулон оболочки в виде чулка: 1 – восстанавливаемый трубопровод; 2 – защитное покрытие в виде выворачивающегося наружу чулка; 3 – упор; 4 – сборно-разборный стояк из пластмассовой трубы

Для участков трубопроводов из асбестоцементных труб предлагается применить метод протаскивания нового трубопровода в поврежденный старый с параллельным его разрушением (рис. 4) [2].

Реновация водопроводной сети позволит изменить используемые в настоящий момент методы обеззараживания воды. Для обеспечения населения качественной питьевой водой и в соответствии с особенностями источников водоснабжения, будет возможным полностью перейти на обеззараживание воды УФ-облучением. Данный метод обладает более высокой эффективностью по инактивации спорообразующих бактерий и энтерови-

русов, чем хлорирование, не влияет на химический состав воды, однако не имеет пролонгирующего обеззараживающего действия. В условиях безаварийной работы сети это вполне допустимо при условии периодической санации трубопроводов растворами хлорсодержащих реагентов.

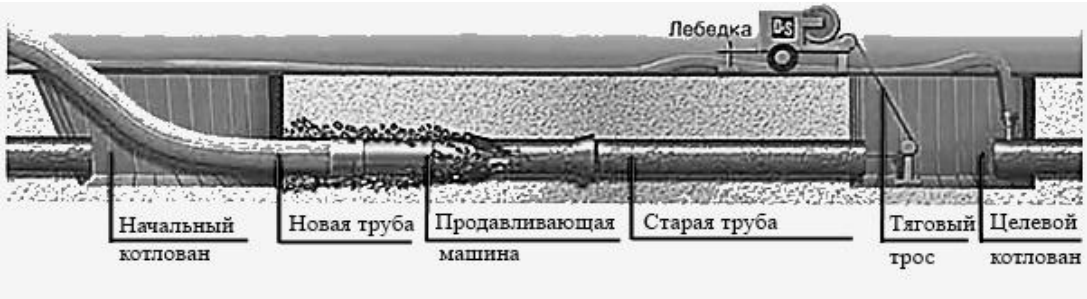


Рис. 4. Разрушение старого трубопровода с протаскиванием нового

Для обеспечения отдаленных районов города качественной питьевой водой, безопасной в бактериальном отношении наилучшим образом в данном случае может оказаться предварительная аммонизация воды [3].

Аммиак и аммонийные соли или органические вещества, в состав которых входят аминогруппы, вступая в реакцию с гипохлоритом, образуют моно- и дихлорамины (связанный хлор), обладающие в 20–25 раз меньшими бактерицидными свойствами в сравнении со свободным хлором, но имеющие более длительный обеззараживающий эффект.

Реализация на практике изложенных предложений позволит, прежде всего, экономно расходовать имеющиеся природные водные ресурсы, во-вторых, обеспечить жителей города доброкачественной питьевой водой в нужном количестве, что, несомненно, будет способствовать поднятию общего уровня благоустройства города.

Библиографический список

1. Левит, А.И. Южный Урал: География, экология, природопользование. Учебное пособие / А.И. Левит. – Челябинск: Юж.-Урал. Кн. Изд-во, 2001. – 246 с.

2. Храменков, С.В. Технологии восстановления подземных трубопроводов бестраншейными методами: Учебное пособие / С.В. Храменков, В.А. Орлов, В.А. Харькин. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 240 с.

3. Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: издание второе, переработанное и дополненное. Учебное пособие / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 496 с.

К содержанию

УДК 666.962.3

ДОБАВКИ-ИНТЕНСИФИКАТОРЫ ОБЖИГА ДОЛОМИТА

А.В. Носов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар

В работе представлены результаты исследований влияния различных добавок-интенсификаторов на изменения фазового состава доломита при нагреве методом рентгенофазового анализа. Выявлено, что при использовании добавок, способных с составляющими доломита вступать в ионно-обменные реакции, происходит значительное замедление кристаллизации новообразований вследствие дестабилизации кристаллической решетки доломита. Установлено, что наиболее эффективными интенсификаторами обжига являются добавки, способные образовывать расплав до декарбонизации $MgCO_3$ и сохраняющие жидкую фазу до полного окончания этого процесса.

Ключевые слова: доломит, доломитовое вяжущее, обжиг, добавки-интенсификаторы обжига.

Известно, что для получения качественного вяжущего из доломитов, не уступающего по эксплуатационным характеристикам вяжущим из высокомагнезиального сырья, обжиг необходимо вести так, чтобы при максимальной декарбонизации $MgCO_3$ исключить разложение $CaCO_3$ [1, 2, 3]. Это приводит к необходимости точного выдерживания температуры, времени обжига и постоянному регулированию режима в связи с изменениями химико-минералогического состава породы, что затруднительно в промышленных масштабах. Существует эффективный способ разделения процессов разложения $MgCO_3$ и $CaCO_3$ в доломите и создания температурного интервала между ними – это введение добавок-интенсификаторов обжига, позволяющих снизить температуру разложения $MgCO_3$ [4, 5].

Оценка эффективности различных добавок-интенсификаторов обжига весьма сложна, при ее проведении нужно обращать внимание на кристаллохимические свойства добавки, в частности на радиус и электроотрицательность катиона, способность диссоциировать на ионы при нагревании, образовывать жидкую фазу при обжиге и на температуру ее появления, но при этом выявить наиболее значимые факторы сложно. Также необходимо учитывать механизм действия добавок, который обуславливает их влияние на кристаллизацию новообразований, происходящих при обжиге доломита. Однако современными исследованиями не установлено влияние добавок-интенсификаторов на кристаллизацию продуктов обжига доломита.

Целью данной работы стало изучение изменений фазового состава, происходящих при обжиге доломита в присутствии различных добавок-интенсификаторов и выявления влияния добавок на формирование новообразований – периклаза и кальцита.

Для этого, одновременно с нагревом был проведен рентгенофазовый анализ доломитовой породы без добавок (рис. 1) и в присутствии добавок-интенсификаторов (рис. 2, 3). Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре ДРОН-3М, (модернизированном приставкой PDWin), съемку РФА вели одновременно с нагревом материала до 900 °С, скорость нагрева составляла 10 град/мин.

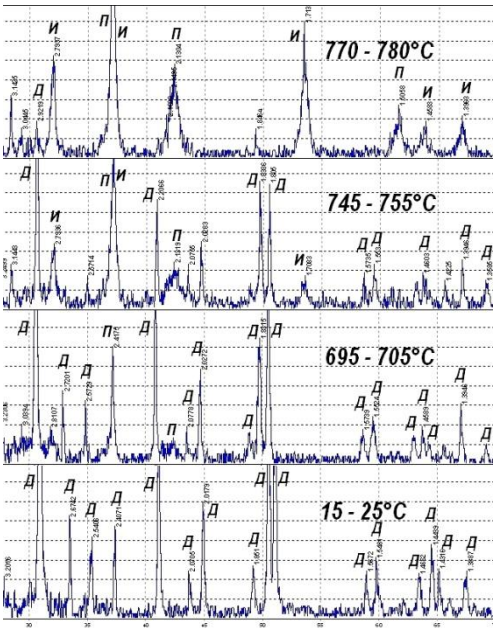
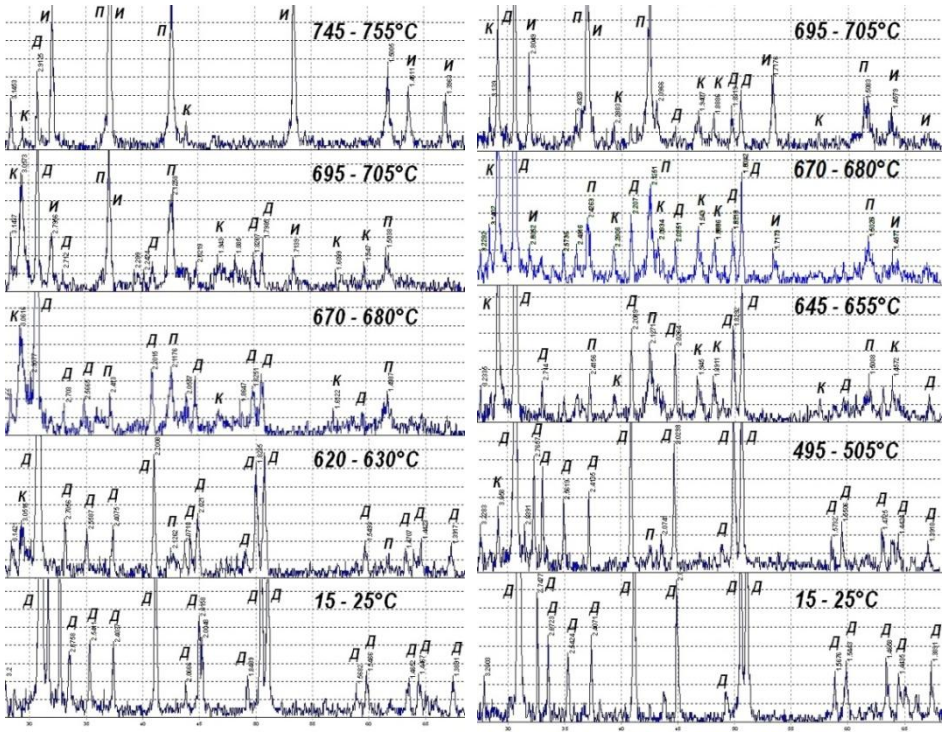


Рис. 1. Изменение фазового состава в доломите в процессе обжига.
Одно деление по оси ординат соответствует 50 имп/сек.
Д – отражения, соотв. доломиту, П – периклазу, К – кальциту, И – извести

При температурах 695–705 °С наблюдается уменьшение высоты основных отражений доломита и появление небольших пиков, соответствующих началу образования периклаза (MgO). Исходя из того, что отражения кальцита не фиксируются на рентгенограммах – кальциевая составляющая доломита находится в полуаморфном состоянии, о чем также свидетельствует диффузная дуга, зафиксированная при температурах 695–705 °С. При температурах 745–755 °С отмечается появление отражений, соответствующих образованию CaO, диффузная дуга пропадает, следовательно разложение полуаморфной кальциевой составляющей начинается при 700…750 °С. При дальнейшем нагреве до 795–805 °С полностью пропадают отражения доломита, на рентгенограмме можно наблюдать характерные пики оксидов магния и кальция.

Изменение фазового состава с введением добавки хлорида натрия (рис. 2-а) начинается при температурах 620–630 °С, что на 70 °С ниже, чем в случае с бездобавочным материалом. При этой температуре начинают формироваться широкие пики, соответствующие периклазу. В отличие от бездобавочного материала, одновременно с этим отмечаются отражения

формирующегося кальцита. С повышением температуры до 670–680 °С высота пиков кальцита и периклаза увеличивается, что говорит об увеличении количества этих минералов, а ширина пиков уменьшается, свидетельствуя об упорядочении их кристаллической структуры. В то же время высота отражений доломита закономерно снижается. При дальнейшем повышении температуры до 695–705 °С отражения кальцита уменьшаются, и можно наблюдать начало кристаллизации оксида кальция. Дальнейшее нагревание материала приводит к увеличению высоты пиков периклаза и оксида кальция.



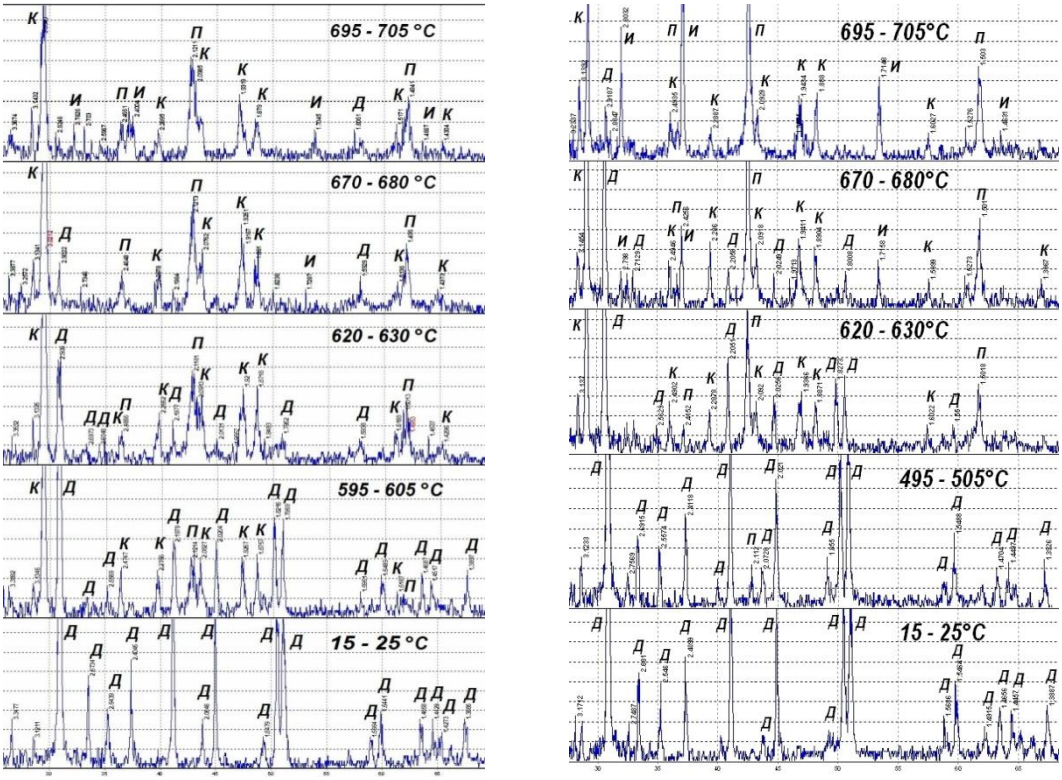
а) б)

Рис. 2. Изменение фазового состава в доломите
в процессе обжига в присутствии 2% добавки: а) NaCl; б) $MgCl_2 \cdot 6H_2O$
Д – отражения, соотв. доломиту, П – периклазу, К – кальциту, И – извести

При введении добавки бишофита (рис. 2-б) фазы кальцита и периклаза начинают формироваться уже при 495–505 °С. С повышением температуры фаза доломита постепенно сменяется кальцитом и периклазом. При темпе-ратурах 670–680 °С начинается уменьшение отражений кальцита и формирование оксида кальция, но отражения доломита фиксируются до 695–705 °С, что свидетельствует о не полном его разложении при этих температурах. К 745–755 °С на ренгенограмме обнаружены только отражения оксидов магния и кальция, что говорит о полном разложении породы.

В присутствии гидрокарбоната натрия (рис. 3-а) изменение фазового состава фиксируется при температурах 595–605 °С – начинают формироваться фазы периклаза и кальцита. С повышением температуры фазы доломита постепенно сменяются фазами периклаза и кальцита, однако ново-

образованиям соответствуют широкие пики, что свидетельствует об их слабой степени закристаллизованности. Следовательно, при использовании добавок, способных с составляющими доломита вступать в ионно-обменные реакции, происходит значительное замедление кристаллизации новообразований, причиной чего является дестабилизация кристаллической решетки доломита в процессе обжига. При температурах 670–680 °С начинают появлятся отражения, соответствующие оксиду кальция, а к 745–755 °С на ренгенограмме можно обнаружить только широкие отражения оксидов магния и кальция.



а) б)

Рис. 3. Изменение фазового состава в доломите в процессе обжига в присутствии 2% добавки: а) $NaHCO_3$; б) $KCl{\cdot}MgCl_2{\cdot}6H_2O$
Д – отражения, соотв. доломиту, П – периклазу, К – кальциту, И – извести

При введении карналлита (рис. 3-б) фазы кальцита и периклаза также начинают формироваться уже при температурах 495–505 °С, т.е. на 200 °С ниже, чем в бездобавочном доломите. С повышением температуры фаза доломита постепенно сменяется периклазом и кальцитом, а после 670–680 °С доломит практически не фиксируется на рентгенограмме. При температурах 670–680 °С также начинается уменьшение отражений кальцита и к 745–755 °С на рентгенограмме можно обнаружить только отражения оксидов магния и кальция. Следовательно, для исключения разложения $CaCO_3$, обжиг доломита с добавкой карналлита необходимо проводить при температурах до 700 °С.

Таким образом, при использовании добавок, способных с составляющими доломита вступать в ионно-обменные реакции, происходит значительное замедление кристаллизации новообразований вследствие дестабилизации кристаллической решетки доломита. Такие добавки не рекомендуется использовать в качестве интенсификаторов, т.к. слабая степень закристаллизованности новообразований может значительно повлиять на качество вяжущего.

Предпочтительно использовать добавки, образующие жидкую фазу и не вступающие в ионно-обменные реакции с составляющими доломита (т.е. добавки первой группы), с низкой температурой плавления и временем существования расплава до окончания декарбонизации $MgCO_3$. Такие добавки наиболее эффективно понизят температуру разложения магниевой составляющей доломита, не оказывая влияния на кальциевую, что позволит получить качественное доломитовое вяжущее для строительных целей.

Библиографический список

1. Шелихов, Н.С. Особенности формирования активной фазы MgO в доломитовом цементе / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов, В.П. Морозов // Строительные материалы. – 2008. – № 10. – С. 32–33.

2. Falikman, W.R. Magnesium Caustic Dolomite Concrete. Industrieboden / W.R Falikman, Ju.W. Sorokin, A.Ja. Weiner, N.F. Baschlykow, L.G. Bernstein, W.A. Smirnow // 5 Internationales Kolloquium. Ostfildern/Stuttgart. – 2003. – Pp. 186–191.

3. Galai, H. Mechanism of growth of MgO and CaCO3 during a dolomite partial decomposition / H. Galai, M. Pijolat, K. Nahdi, M. Trabelsi-Ayadi // Solid State Ionics. – V. 178. – 2007. – Pp. 1039–1047.

4. Кузьменков, М.И. Интенсификация процесса декарбонизации доломита солевыми добавками / М.И. Кузьменков, Е.В. Марчик, Р.Я. Мельникова // Работа в рамках ГКПНИ «Химические реагенты и материалы». – Минск: БГТУ. – 2009. – 9 с.

5. Черных, Т.Н. Снижение температуры получения магнезиального вяжущего из бруситов / Т.Н. Черных, А.А. Орлов, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов, А.В. Перминов // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 3. – С. 29–35.

6. Волконский, Б.В. Минерализаторы в цементной промышленности / Б.В. Волконский, П.Ф. Коновалов, С.Д. Макашев. – М.: Стройиздат. – 1963. – 192 с.

К содержанию

УДК 72.03.025.4+ 72.03(09)(086.6)

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕСТАВРАЦИИ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

В.Д. Оленьков

Рассматриваются перспективные методы повышения эффективности оценки технического состояния памятников архитектуры, а также возможности проектирования реставрации зданий на качественно новом уровне с применением компьютерных методов моделирования. Проводится анализ проводимых по данной теме исследований в нашей стране.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, информационное моделирование зданий (BIM); лазерное сканирование; автоматизация обработки данных.

Автоматизированное проектирование – это процесс получения проектной документации с помощью средств автоматизации, которые позволяют свести к минимуму количество ручных операции на всех стадиях разработки проекта. Оно уже давно стало неотъемлемой частью строительного производства. Автоматизация процесса проектирования позволяет уменьшить количество ошибок на всех стадиях разработки проекта, будь то процесс разработки обмерных чертежей или анализ технического состояния объекта. Для автоматизированного проектирования применяют информационную модель. Она помогает при наблюдении за объектом и оценке рисков после производства работ. Применение данного метода при проектировании реставрации памятников архитектуры целесообразно по следующим причинам. Во-первых, создание точного первоначального исторического облика памятника – основная задача реставрации. Во-вторых, возникает необходимость уделять особое внимание прочностным расчётам, поскольку процесс реставрации зачастую связан с восстановлением утраченных объёмов объекта, и как следствие, дополнительными нагрузками на существующую часть здания.

В нашей стране вопрос использования информационных моделей для реставрации зданий начал рассматриваться сравнительно недавно. К исследованиям в этой области относится деятельность научно-производственного предприятия «Фотограмметрия» и работы Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета.

Научно-производственное предприятие «Фотограмметрия», основанное в 2005 году, специализируется на производстве комплексных архитектурных обмеров и является ведущим предприятием Санкт-Петербурга в данной области. За 8 лет работы специалисты компании выполнили обмеры и

фиксации более сотни объектов, среди которых такие значительные как: Собор Св.Петра и Павла в Петропавловской крепости, южный фасад Эрмитажа на Дворцовой площади, Екатерининский дворец в Царском Селе, Памятник Николаю I на Исаакиевской площади, Вознесенский войсковой кафедральный собор в Новочеркасске и др. [1].

НПП «Фотограмметрия» обладает технологическими возможностями по трехмерной фиксации архитектурных памятников на основе сочетания лазерного сканирования и цифровой фотограмметрической съемки. Применяемые автоматизированные средства позволяют зафиксировать как геометрию памятника, так и его цветовые характеристики, а далее на их основе получить точные цветные трехмерные модели объектов и ортофотопланы высокого разрешения. На основе данных лазерного сканирования фирма разработала технологию создания трёхмерных 3D моделей различных архитектурных объектов и промышленных установок. Однако, в публикациях организации приводятся примеры твердотелых 3D моделей для не сложных объектов, и разработчиками так же не отражено, как дальше использовать полученную модель для различных прочностных расчётов.

В ходе исследований по созданию информационных моделей памятников архитектуры Новосибирским государственным архитектурно-строительным университетом были разработаны 3D модели двух объектов: «Дом композиторов» и гостиница «Метрополитен» в городе Новосибирске. В качестве программного средства создания информационной модели использовался Autodesk Revit Architecture 2009. В 2013 году была разработана информационная модель здания Зашиверской церкви с использованием комплекса программ Autodesk [2].

С помощью полученной информационной модели авторы считают возможным прогнозирование степени разрушений конструкций памятника под воздействием внешних нагрузок. Для этого созданная в Revit Architecture модель передается в Revit Structure для задания и корректировки нагрузок, уточнения конструктивных элементов и связей и подготовки данных для расчета конструкций. Затем информация из Revit Structure импортируется в Robot Structural Analysis и другие программы для завершения формирования модели, осуществления конструктивных расчетов и анализа полученных результатов. При этом, можно проследить за ходом расчетов, использованием системных ресурсов и затратами времени. На основе произведенных оценочных действий с информационной моделью, во-первых, устраняются ошибки в проектировании работ по реставрации, которые могут привести памятник к разрушению, принимается наилучшее проектное решение. Во-вторых, оценивается необходимость выполнения тех или иных укрепительных работ по сохранению памятника [3].

Выполненные работы по созданию информационных моделей зданий объектов культурного наследия не в полной мере отражают дальнейшее

использование модели при прочностных расчётах и эксплуатации здания при наблюдении за техническим состоянием объекта после реставрации. В анализируемых исследованиях не представлена информация о статических и аэродинамических расчётах, что актуально для высотных зданий, особенно таких, как культовые объекты культурного наследия.

Опыт создания информационных моделей объектов культурного наследия имеется в Южно-Уральском государственном университете (ЮУрГУ г. Челябинск) [4]. В научно-исследовательском и проектном центре «Наследие» университета выполнены несколько проектов реставрации объектов культурного наследия в Челябинской области, в числе которых Церковь Покрова Пресвятой Богородицы в селе Большой Куяш, Церковь Иоанна Предтечи в городе Катав-Ивановске, Церковь Александра Невского в селе Харино и Церковь Александра Невского в городе Челябинске. Центр «Наследие» использует методику, суть которой заключается в объединении данных, полученных различными инструментами и приборами (лазерный сканер, георадар, тепловизор, ультразвуковые измерители и т.д.) в единую цифровую модель здания. На первом этапе работ производится трехмерное лазерное сканирование существующего объекта. Результат сканирования – оцифрованное «облако точек», которое в дальнейшем используется для создания обмерных чертежей и точной трёхмерной модели объекта. На следующих этапах 3D модель объекта оптимизируется и в дальнейшем используется для статических и аэродинамических расчётов (рис. 1). Наличие детальной модели увеличивает скорость проектирования и повышает точность расчётов.

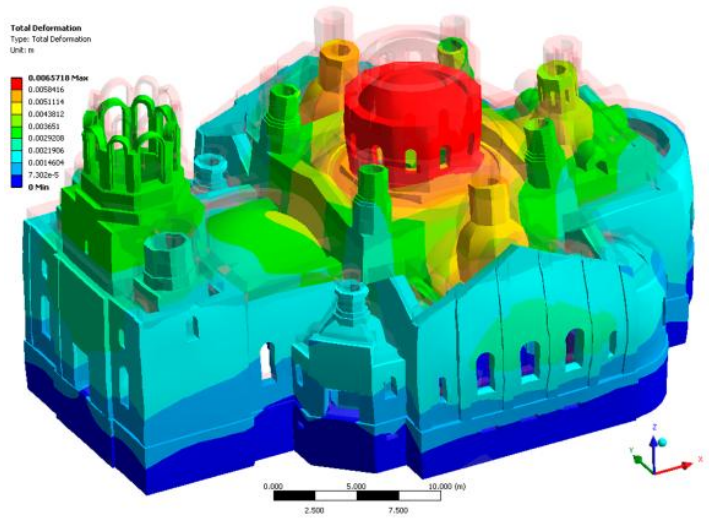


Рис. 1. Расчёт напряжений в конечно-элементной модели

Таким образом, выполненные исследования позволяют говорить о том, что использование информационных моделей для реставрации памятников архитектуры даёт следующие преимущества:

- ускорение процесса разработки чертежей, благодаря применению системы лазерного сканирования объекта;
- существенное уменьшение количества ошибок на всех этапах проектирование за счёт уменьшения ручных операций;
- наличие трёхмерной модели позволяет выполнять более точные статические и аэродинамические расчёты;
- возможность использования информационной модели для оценки рисков и наблюдением за техническим состоянием объекта культурного наследия после реставрации.

Библиографический список

1. О компании НПП «Фотограмметрия». – URL: http://photogrammetria.ru/10-about-photogrammetria-company.html.

2. Козлова, Т.И. Опыт информационного моделирования памятников архитектуры / Т.И. Козлова, В.В. Талапов // Электронный журнал. – URL: http://www.marhi.ru/AMIT/2009/3kvart09/Talapov/Article.php.

3. Козлова, Т.И. Информационная модель недвижимого объекта культурного наследия как новый инструмент работы в музеефикационной практике / Т.И. Козлова // Вестник ТГУ. Серия «История». – 2013. – № 3 (23). – С. 33–37.

4. Оленьков, В.Д. Автоматизация диагностики технического состояния зданий и сооружений в процессе их эксплуатации / В.Д. Оленьков, Д.С. Попов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2012. – Вып. 14. –№ 17. – С. 82–85.

К содержанию

УДК 666.962:666.151

СТЕКЛОМАГНЕЗИАЛЬНЫЕ ЛИСТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.А. Орлов

Приведены результаты опыта производства стекло-магнезиальных листов и их применения в отделке помещений. Проведен анализ перспектив развития производства стекло-магнезиальных листов. Предложены пути улучшения качества материалов и технологии их производства.

Ключевые слова: стекло-магнезиальные листы, СМЛ, магнезиальное вяжущее, модифицирование.

В настоящее время отмечается тенденция к значительному ускорению темпов строительного производства при обеспечении высокого качества возводимого жилья и максимально возможном ресурсосбережении. В связи с этим строительная индустрия испытывает потребность в современных, экологичных материалах с высокими физико-механическими свойствами.

Одним из новых отделочных материалов на основе магнезиального вяжущего являются стекломагнезиальные листы (СМЛ) относятся к листовым отделочным строительным материалам на основе магнезиальных вяжущих. Магнезиальные вяжущие придают СМЛ высокую прочность в ранние сроки твердения в естественных условиях, что делает их более энергоэффективными по сравнению с цементными материалами (при производстве СМЛ не нужна тепловлажностная обработка). Кроме того, магнезиальные материалы препятствуют размножению бактерий и грибков, что обуславливает их предпочтительное применение при внутренней отделке помещений [0]. Кроме магнезиальных вяжущих для производства СМЛ также используют: затворитель – водный раствор бишофита ($MgCl_2 6H_2O$); легкие заполнители; наполнители; армирующую сетку; спантбонд (нетканый, щелочестойкий полимерный материал); техническую пену.

СМЛ состоит из несколько структурных элементов:

1) лицевой поверхностный слой определяет внешнюю эстетику СМЛ;
2) стеклосетка обеспечивает прочность СМЛ при изгибе;
3) основной слой – легкий магнезиальный бетон;
4) тыльный поверхностный слой листов – еще один слой стеклосетки.

Согласно характеристикам, заявляемым производителями СМЛ в своих технических условиях, листы обладают высокими физико-механическими и технико-эксплуатационными свойствами. Такие характеристики СМЛ определяют широкий спектр их применения для внутренней отделки помещений с любым температурным и влажностным режимом. Известен также положительный опыт применения СМЛ в наружной отделке зданий в условиях мягкого климата [0]. Так как СМЛ является новым материалом,

на данный момент существует большое количество направлений для регулирования его свойств и повышения эффективности производства. В связи с этим, необходим поиск перспективных направлений улучшения качества СМЛ, основанный на анализе причин, сдерживающих развитие конкурентоспособности стекло-магнезиальных листов, производящихся и применяющихся в России.

По мнению авторов, таких причин несколько:

1. дефицит магнезиального вяжущего в РФ;

2. набухание и коробление СМЛ при длительном и/или многократном увлажнении и низкая долговечность при эксплуатации во влажных условиях;

3. выделение вредных и опасных веществ в условиях пожара;

4. «отсутствие» комплектных систем монтажа СМЛ.

1. Дефицит магнезиального вяжущего в РФ. Несмотря на «разнообразие» нормативной базы производство СМЛ в последние годы развивается очень интенсивно, что приводит к дефициту каустического магнезита (марки ПМК и МКС). Возникшая ситуация обуславливает необходимость поиска сырья, альтернативного каустическому магнезиту [0, 0], которым с успехом могут стать бруситы ($Mg(OH_2)$) и доломиты ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$). При правильном обжиге этих пород, вяжущие обладают стабильностью свойств и обеспечат СМЛ надлежащее качество [0, 0]. При замене каустического магнезита на бруситовое или доломитовое вяжущее в СМЛ обязательна корректировка его состава.

2. Набухание и коробление СМЛ при длительном и/или многократном увлажнении и низкая долговечность при эксплуатации во влажных условиях. Как известно, магнезиальное вяжущее не является водостойким вяжущим, однако производители листов указывают, что коэффициент их размягчения (отношение прочности при изгибе в насыщенном водой состоянии к прочности в сухом состоянии) составляет более 0,8, что характеризует СМЛ как водостойкий материал, который можно применять в помещениях любой влажности (в т.ч. душевых, банях, в наружной отделке и т.д.) [0, 0]. Связано это с тем, что высокую прочность листов при изгибе обеспечивают стеклосетка и прочность ее сцепления с основным слоем СМЛ. Опыт показывает, что при однократном насыщении в процессе испытания листов на водостойкость по стандартной методике сцепление сетки с основным слоем практически не нарушается и предел прочности при изгибе стекломагнезиальных листов снижается незначительно. В реальных условиях, в процессе эксплуатации при длительном и/или многократном увлажнении происходит растворение и вымывание из магнезиального камня гидрооксида магния и разложение гидрооксихлоридов магния, что ведет к снижению прочности основного слоя и прочности сцепления основного слоя со стеклосеткой [0, 0]. Это значительно снижает предел прочности при изгибе, а также вызывает набухание и коробление СМЛ.

Таким образом, «обычный» СМЛ нельзя применять во влажных помещениях, а методику оценки водостойкости СМЛ необходимо пересмотреть. Одним из способов повышения стойкости СМЛ при эксплуатации во влажных условиях является покрытие листов со всех сторон водонепроницаемыми составами, например, акриловыми или другими полимерными покрытиями [0]. Так как после нанесения таких покрытий СМЛ становятся паронепроницаемыми, их можно применять только при устройстве вентилируемого фасада. Кроме прочего, существуют научные работы, посвященные повышению водостойкости магнезиального вяжущего за счет введения компонентов, связывающих гидрооксид магния в нерастворимые силикаты магния, такими компонентами являются: доменные шлаки, золы ТЭС, микрокремнезем и др. [0, 0, 0]. Также имеются сведения, что полная или частичная замена затворителя на ортофосфорную кислоту и ее соли также приводит к эффективному повышению водостойкости [0], однако при этом значительно ускоряется загустевание формовочной смеси [0]. Повышение водостойкости магнезиального вяжущего эффективно осуществляется путем введения в сырьевую смесь добавок, содержащих ионы трехвалентного железа и некоторые другие модифицирующие добавки [0, 0, 0]. Такие добавки также позволяют снизить гигроскопичность стекломагнезиальных листов, т.е. способность материала поглощать пары воды из воздуха. Несмотря на то, что гигроскопичность отделочных материалов позволяет регулировать влажность в помещении и обеспечивать комфортные условия для человека, ее высокие значения у СМЛ, затворенных раствором бишофита (более 20 %), снижают эксплуатационные свойства изделий, приводят к образованию конденсата на поверхности листов, отслоению финишных отделочных покрытий, короблению и неравномерному изменению цвета листов. Достичь приемлемого уровня гигроскопичности (не более 8 %) можно также, затворяя магнезиальное вяжущее растворами сульфата магния, но при этом значительно (более чем в 2 раза) снижается их прочность [0, 0, 0].

3. Выделение вредных и опасных веществ в условиях пожара. Также как и вода, огонь разрушает СМЛ, в связи с этим, перспективным направлением для модификации СМЛ является получение «противопожарных» листов, негорючих, не выделяющих при высоких температурах вредных веществ, препятствующих распространению огня, защищающих конструкционные элементы от воздействия высоких температур. В «обычных» СМЛ в качестве одного из легких заполнителей используются опилки, которые в процессе производства листов пропитываются солевым раствором. Из-за этого под воздействием высоких температур возгорания листа не происходит, но выделяется большое количества углекислого газа в результате их тления. Еще одним отрицательным моментом при нагревании СМЛ является выделение хлора или соляной кислоты в процессе разложения

минералов, составляющих магнезиальный камень. Такие листы сдерживают распространение пламени и защищают несущие конструкции, но могут быть угрозой здоровью и жизни людей при пожаре. Таким образом, для получения «противопожарных» листов необходимо отказаться от использования опилок [0], а так же получить магнезиальный камень, либо не разлагающийся при температурах до 1200 °С, либо в процессе разложения не выделяющий вредных веществ. С этой целью необходимо заменить бишофит ортофосфорной кислотой или содержащими ее побочными продуктами промышленности [0].

4. «Отсутствие» комплектных систем монтажа СМЛ. Для монтажа СМЛ часто используются системы, разработанные под гипсовые листовые материалы. Это приводит к некоторым негативным явлениям, в частности, шпаклевка, предназначенная для гипсовых материалов, может иметь низкое сцепление с СМЛ вплоть до отслаивания ее с поверхности листов, а незащищенные от коррозии элементы крепежа со временем могут начать корродировать, особенно при высокой гигроскопичности листов. Решением этого вопроса может стать разработка и производство сопутствующих листам специализированных материалов, составляющих систему монтажа, которая обеспечит долговечность конструкций. В частности, простым и необходимым шагом является разработка и производство магнезиальных шпаклевок для выравнивания листов и их стыков [0].

Таким образом, СМЛ имеют очень высокий потенциал для развития и улучшения их качества, а модифицирование их структуры и свойств является перспективным направлением работ в области строительного материаловедения. Создание долговечных, высокоэффективных стекломагнезиальных листов и единых нормативных документов на их производство и применение будет способствовать их широкому и более успешному применению в строительстве.

Библиографический список

1. Ведь, Е.И., Изучение продуктов твердения магнезиального цемента с введением алюмофосфатной добавки / Е.И. Ведь, В.К. Бочаров // Украинский хим. журнал. – 1970. – № 6. – С. 851–860.

2. Ведь, Е.И., К вопросу получения водостойкого магнезиального вяжущего / Е.И. Ведь, В.К. Бочаров // Вестник Харьковского политехнического института. – 1970. – № 40. – С. 66–67.

3. Ведь, Е.И. Изучение продуктов твердения водостойкого оксихлоридного цемента на основе каустического доломита и алюмо- и железофосфатных добавок / Е.И. Ведь, В.К. Бочаров, Е.Ф. Жаров // ЖПХ. – 1975. – № 12. – С. 2607–2611.

4. Зимич, В.В. Влияние различных видов затворителей на гигроскопичность магнезиального камня / В.В. Зимич, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2008. – Вып. 6. – № 12 (112). – С. 13–15.

5. Зимич, В.В. Снижение гигроскопичности и повышение водостойкости хлормагнезиального камня путем введения трехвалентного железа / В.В. Зимич, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2009. – № 5. – С. 58–61.

6. Зырянова, В.Н. Создание водостойкого магнезиального вяжущего на основе MgO и золошлаковых отходов ТЭС / В.Н. Зырянова, М.А. Савинкина, А.Т. Логвиненко // Электрические станции. – 1992. – № 12. – С. 11–13.

7. Козлова, В.К. Применение низкообжиговых магнезиальных вяжущих при получении теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов / В.К. Козлова, И.Г. Сутула, Е.Н. Гущина и др. // Ползуновский вестник. – 2008. – № 3. – С. 232–235.

8. Крамар, Л.Я. Особенности твердения магнезиального вяжущего / Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, Б.Я. Трофимов // Цемент и его применение. – 2006. – № 9. – С. 58–61.

9. Крамар, Л.Я. Магнезиальные вяжущие из природного сырья. Монография / Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных, А.А. Орлов и др. – М.: Изд-во «Перо», 2012. – 147 с.

10. Носов, А.В. Высокопрочное доломитовое вяжущее / А.В. Носов, Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 30–37.

11. Орлов, А.А., Комплектная система для внутренней отделки магнезиальными материалами / А.А. Орлов, Б.Я. Трофимов, Т.Н. Черных и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2011. – Вып. 13. – № 35(252). – С. 33–37.

12. Рыбьев, И.А. Технология гидроизоляционных материалов / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1964. – 287 с.

13. Самченко, С.В. Влияние вида затворителя на свойства магнезиального вяжущего / С.В. Самченко, Т.А. Лютикова, Т.В. Кузнецова // Международная научно-техническая конференция «Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI-го века». – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2000. – С. 285–288.

14. Самченко, С.В. Влияние микрокремнезема на свойства водостойких магнезиальных вяжущих / С.В. Самченко, О.А. Белимова, Т.А. Лютикова // Экспресс-обзор ВНИИЭСМ. Серия 1. Цементная промышленность. – 1999. – Вып. 4. – С. 15–20.

15. Хорошавин, Л.Б. Рынок магнезиального сырья / Л.Б. Хорошавин, В.А. Кононов. – М.: Огнеупоры и техническая керамика. – 1993. – № 11. – С. 18–23.

16. Черных, Т.Н. Свойства магнезиального вяжущего из бруситовой породы и их взаимосвязь с размерами кристаллов периклаза / Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2006. – № 1. – С. 52–53.

17. Черных, Т.Н. Сульфатно-магнезиальная композиция и сухие штукатурные смеси на ее основе / Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2009. – Вып. 9. – № 35(168). – С. 39–42.

18. El-Gammal, M.A. Using magnesium oxide wallboard as an alternative building façade cladding material in modern cairo buildings / M.A. El-Gammal, A.M. El-Alfy, N.M. Mohamed // Journal of Applied Sciences Research. – 2012. – Vol. 8. Issue 4. – Pp. 2024–2032.

19. Deng Dehua, The effect of aluminate minerals on the phases in magnesium oxychloride cement / Deng Dehua, Zhang Chuanmei // Cement and Concrete Research. – 1996. – Vol. 26. Issue 8. – Pp. 1203–1211.

20. Deng Dehua The mechanism for soluble phosphates to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement // Cement and Concrete Research. – 2003. – Vol. 33. – Issue 9. – Pp. 1311–1317.

21. Xiangming Zhou, Light-weight wood–magnesium oxychloride cement composite building products made by extrusion / Xiangming Zhou, Zongjin Li // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 27. Issue 1. – Pp. 382–389.

22. Судакас, Л.Г. Фосфатные вяжущие системы / Л.Г. Судакас. – Спб.: РИА «Квинтет», 2008. – 260 с.

К содержанию

УДК 004.921 + 378.041

САМООБУЧЕНИЕ И САМООБРАЗОВАНИЕ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКИ

Т.Ю. Попцова, Е.П. Дубовикова, Л.Л. Карманова

Самостоятельная работа должна являться для студентов основой для формирования компонентов обучения – способность к саморазвитию и самосовершенствованию.

Ключевые слова: самостоятельная работа, самообучение, учебно-методические материалы.

Основная образовательная программа подготовки бакалавриата разработанная на основе требований федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования (ФГОС ВПО), определяет требования к результатам освоения образовательной программы дисциплины через формирование общекультурных и профессиональных компетенций. Обязательная учебная нагрузка регламентируется государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по всему теоретическому обучению. Содержание внеаудиторной самостоятельной работы определяется в соответствии с рабочей программой учебной дисциплины.

В рабочей программе предусмотрены рекомендации по организации и учебно-методическому обеспечению текущего контроля успеваемости студентов и промежуточной аттестации приобретенных знаний по каждой конкретной дисциплине. В связи с этим, для успешного освоения студентами курса инженерной компьютерной графики необходимо внедрять в практику учебные программы с повышенной долей самостоятельной работы, разрабатывать методические материалы, направляющие самостоятельную работу студентов вовне аудиторных занятий.

Рабочая программа дисциплины, компьютерная графика, имеет вполне конкретные цели и задачи – это развитие пространственного представления и воображения, конструктивно-геометрического мышления, способность к анализу пространственных форм, изучение современных способов и практических основ создания трехмерных моделей деталей и механизмов, и в конечном итоге получение чертежей деталей и сборочных единиц. Также дополнительно ставится задача овладения теоретическими и практическими основами современной компьютерной технологии построения чертежа по 2-D и 3-D технологиям.

Основная образовательная программа (ООП) должна обеспечиваться учебно-методической документацией и материалами по всем учебным курсам и дисциплинам программы [1]. И еще одно необходимое требование ФГОС – содержание каждой из таких учебных дисциплин (модулей) должно быть представлено в сети Интернет или локальной сети образовательного учреждения.

В рабочей программе компьютерной графики предусмотрены практические занятия – 36 часов в семестре, а также самостоятельная работа студента (СРС) на которую в семестре отводится еще 36 часов, и контроль самостоятельной работы в объеме 4 часов.

Самостоятельная работа студентов является не просто важной формой образовательного процесса, она должна стать его основой. Это предполагает ориентацию на активные методы овладения знаниями, развитие творческих способностей студентов, переход от поточного к индивидуальному обучению с учетом потребностей и возможностей личности. Усиление роли самостоятельной работы студентов означает принципиальный пересмотр организации учебного процесса, который должен строиться так, чтобы развивать умение учиться, формировать у студента способности к саморазвитию, творческому применению полученных знаний.

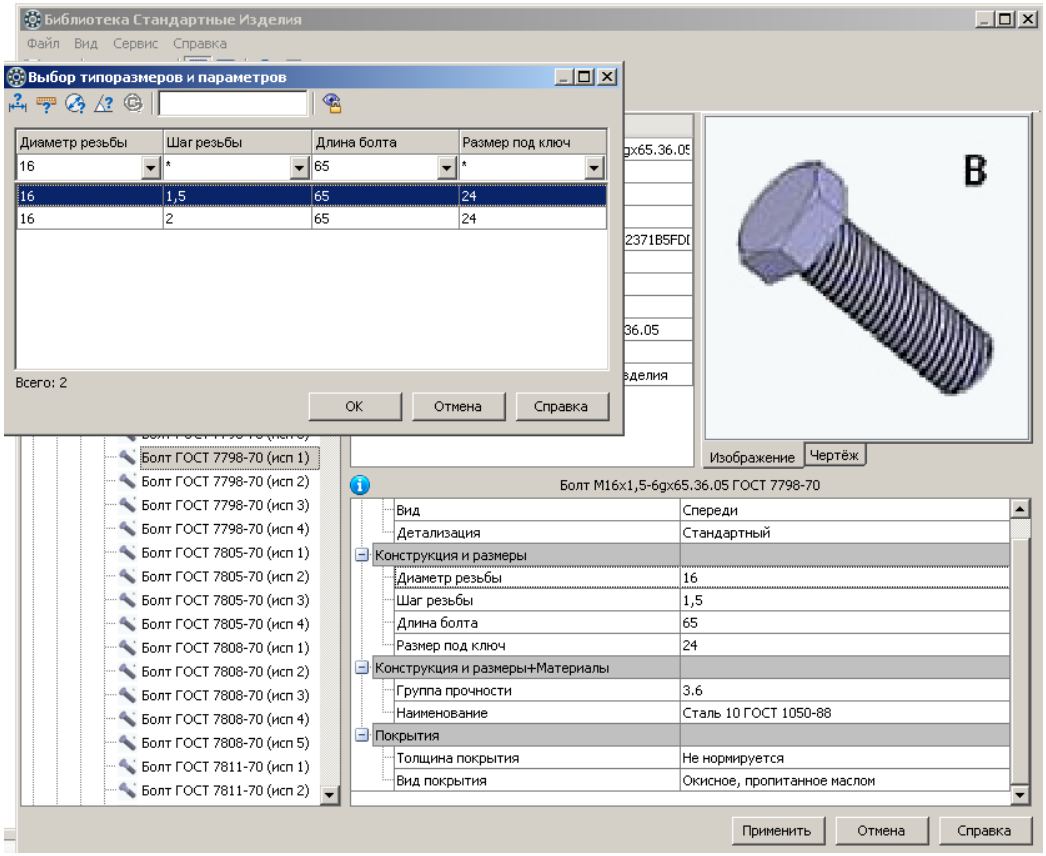


Рис. 1. Выбор болта из библиотеки стандартных изделий в пакете КОМПАС

Актуальным становится требование к личным качествам студента – умению самостоятельно добывать и пополнять знания, вести самостоятельно поиск необходимого материала. Особое значение для правильной

организации учебного процесса, на наш взгляд, имеет развитие навыков самоорганизации и самообучения у студентов. Ведь не секрет, что многие студенты сталкиваются с рядом трудностей, связанных с отсутствием привычки к систематическому умственному труду, неорганизованностью, шаблонным мышлением и т.д. Именно поэтому, студентам так важно в период обучения научиться методам самостоятельного умственного труда, сознательно развивать свои способности и овладевать навыками творческой работы.

Известно, что активизация самостоятельной познавательной деятельности студента возможна только при условии развития познавательной активности личности и диалога студента с преподавателем [2]. В этой связи задачей преподавателя является развитие навыков самостоятельной работы студентов. Развитие этих важных качеств возможно только в ходе выполнения самостоятельной работы. Задача преподавателей кафедры состоит в том, чтобы предложить эффективный и доступный для понимания методический материал по изучаемой теме. Так в курсе инженерной графики, студенты в течение одного (или на некоторых специальностях двух семестров) изучают компьютерную графику.

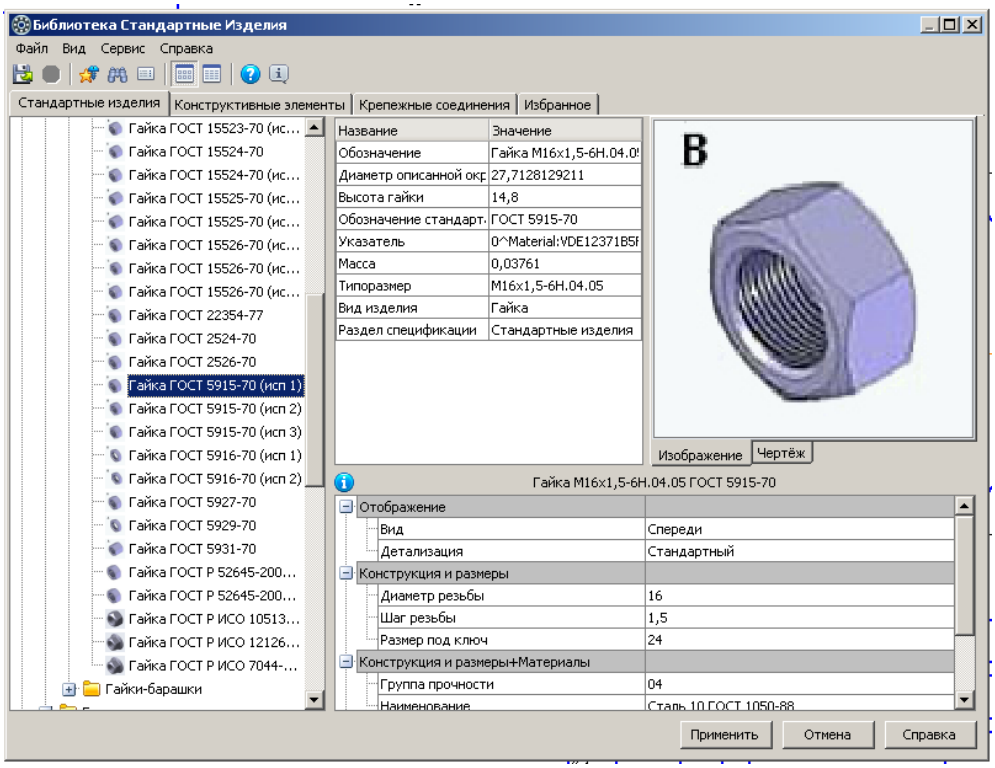


Рис. 2. Выбор гайки из библиотеки
стандартных изделий в пакете КОМПАС

Преподавателями кафедры графики на протяжении многих лет разработано большое количество учебных и учебно-методических пособий, позволяющих самостоятельно разобраться в теме и выполнить задание. Так для самостоятельной работы по теме «Резьба. Резьбовые соединения» студентам предлагается выполнить работу: соединение деталей с помощью стандартных крепежных изделий с метрической резьбой – болта, винта и шпильки. Основываясь на знаниях, которые получили студенты в аудитории при объяснении материала преподавателем, они приступают к самостоятельной работе – соединение деталей с помощью болта и гайки. Студентам предлагается методика (электронные уроки) где подробно, пошагово, расписана последовательность действий, со ссылкой на нормативно-справочную библиотеку изучаемого графического пакета КОМПАС (рис. 1, рис. 2).

Многолетний опыт преподавания графических дисциплин показывает, что большинство студентов-первокурсников не имеет представления о самостоятельной работе, не понимают, для чего она выполняется, каковы ее суть, цели и задачи. В то время как студенты второго курса уже имеют представление о выполняемой работе, они свободно ориентируются среди различного рода методического и справочного материала, имеют навыки его использования, при этом стремятся освоить новые. Большинство второкурсников понимает важность личностно-ориентированного подхода в обучении.

Эффективность всей самостоятельной работы студентов во многом определяется уровнем самоконтроля, развивает умение добывать и использовать нормативную, справочную документацию и специальную литературу, а также развивает самостоятельность мышления, способности к саморазвитию и самосовершенствованию.

Библиографический список

1. ФГОС ВТО 3 поколения 2011 г.
2. Трофимова, А.И. Педагогика и психология. Основы самостоятельной работы студентов / А.И. Трофимова. – СПб, 2001. – 222 с.

К содержанию

УДК 624.04:539.3:534

АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ И КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ

А.Н. Потапов

Предложены математические модели нелинейного расчета дискретных диссипативных конструкций. Уравнения реакции физически и конструктивно-нелинейной системы записываются с единых позиций на основе теории временного анализа.

Ключевые слова: конструкция, колебание, деформация, перемещение, диаграмма, жесткость, матрица, вектор.

Введение. Современные конструкции испытывают интенсивные динамические воздействия, что вынуждает нагруженные элементы работать на пределе своих возможностей. По этой причине в несущих элементах и узлах конструкции накапливаются пластические деформации, в отдельных случаях происходит разрушение связей, что требует проведения проверки прочности системы в поврежденном состоянии и оценки последствий этих разрушений.

В связи с этим, в последнее время возрос интерес специалистов к колебаниям систем с физической и конструктивной нелинейностью. Данная проблема находит широкое обсуждение в печати, на конференциях и на «круглых столах, где отмечается, что до сих пор нет ясности, как адекватно учитывать эффект разрушения связей [1–3]. Подчеркивается недостаток исследований теоретического характера в отношении задач колебаний конструкций с разрушающими связями и отмечается отсутствие эффективных аналитических методов расчета поврежденных конструкций.

В настоящей статье дается краткий обзор результатов исследований, проводимых на кафедре строительной механики по направлению, связанному с анализом колебаний диссипативных систем с учетом физической и конструктивной нелинейности. В качестве метода решения используется временной анализ реакции конструкции, моделируемой дискретной расчетной схемой. При колебаниях системы с физически нелинейными свойствами материала учет пластических деформаций проводится с помощью билинейной диаграммы деформирования ($\sigma - \varepsilon$). С целью удобства записи математических моделей эта диаграмма представляется в координатах «восстанавливающая сила – относительное перемещение», как для отдельного несущего элемента, так и всей конструкции в целом. При колебаниях конструктивно нелинейных систем эффект от выключения связи учитывается диаграммой деформирования разрывного вида, что обусловлено внезапным изменением жесткостных характеристик системы.

Диаграммы деформирования. Исследования показывают, что нелинейные составляющие динамической восстанавливающей силы (ДВС) тесно связаны с параметрами пластического гистерезиса (ширина a и высота h петли на рис. 1 a). В общем случае упругопластических колебаний вектор ДВС $R(t)$ может быть выражен так: $R(t) = K_i Y(t) + B$, где $Y(t)$ – вектор перемещений. Матрица жесткости K_i и вектор постоянных значений B формируются в зависимости от i-го состояния системы.

При упругом режиме колебаний (1-й участок диаграммы) $K_i = K$, где K – матрица жесткости исходной системы; вектор $B = 0$. С началом нелинейного деформирования (2-й участок: снижение жесткости в j-м элементе) состояние системы выражается новой матрицей жесткости K_i. Вектор $B = R_u = \Delta K_i Y_u$, где R_u, Y_u – векторы предельных значений ДВС и предельных перемещений (Y_u строится в момент перехода системы в промежуточное состояние); $\Delta K_i = K - K_i$. При разгрузке в j-м элементе (3-й участок) система возвращается к первоначальной жесткости $K_i = K$ (линии разгрузки и нагрузки параллельны друг другу), а $B = R_p = KY_p$, где R_p, Y_p – векторы остаточных усилий и перемещений.

Отсюда следуют выражения вектора ДВС для различных состояний:

$$R(t) = KY(t), \qquad R(t) = K_i Y(t) + R_u(t_i), \qquad R(t) = KY(t) - R_p(t_i). \tag{1}$$

Формулы (1) позволяет сформировать дифференциальное уравнение движения квазиупругой системы (2), которое совместно с начальными условиями (3) на любом интервале движения имеет вид ($t \in [t_i, t_{i+1}]$):

$$M_i \ddot{Y}(t) + C_i \dot{Y}(t) + K_i Y(t) = P(t) + Q - R_u(t_i) + R_p(t_i). \tag{2}$$

$$Y(t_i) = Y_0, \qquad \dot{Y}(t_i) = \dot{Y}_0, \tag{3}$$

где M_i, C_i, K_i – матрицы масс, демпфирования и жесткости в i-м состоянии системы; $P(t)$, Q – векторы динамической и постоянной нагрузки.

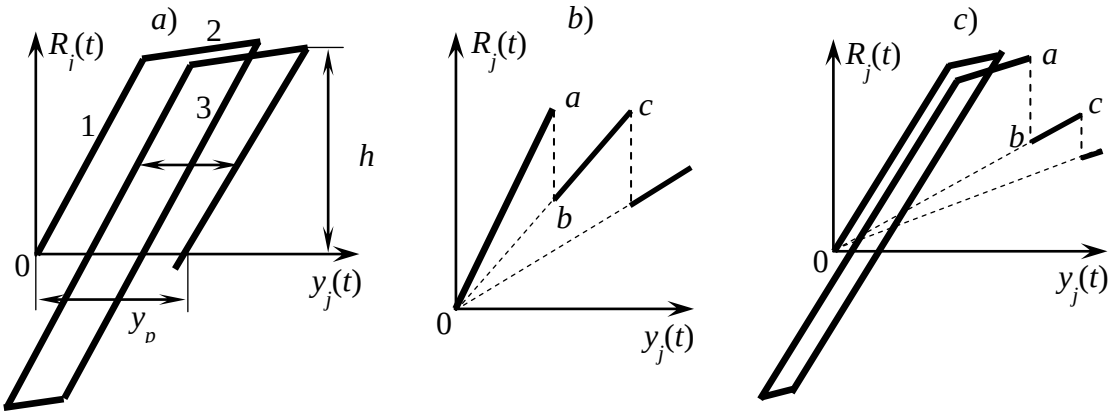


Рис. 1. Диаграммы деформирования ($R_j - y_j$) j-го несущего элемента:
a – физически нелинейного; b – конструктивно нелинейного;
c – комбинированного

Запись уравнения в форме (2) обладает тем достоинством, что все нелинейные составляющие вектора (1) перенесены в правую часть, в результате чего интегрирование (2) протекает по схеме решения упругой задачи.

При колебаниях конструктивно-нелинейной системы (внезапное выключение j-го несущего элемента, рис. 1 *b*) и при условии отсутствия пластических деформаций все нелинейные составляющие в выражениях вектора (1) будет равны нулю: $R_u = R_p = 0$. Если же при этом в элементах конструкции возникают пластические деформации, то $R_u \neq 0$, $R_p \neq 0$ (рис. 1 *c*). В обоих случаях уравнения движения сохраняют свою структуру в форме записи (2).

Уравнение (2) описывает движение квазиупругой системы на интервале времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$, находясь в i-м промежуточном состоянии. При переходе системы в новое (i+1)-е состояние происходит корректировка (изменение) параметров расчетной динамической модели (РДМ: в левой части уравнения – матрицы M_{i+1}, C_{i+1}, K_{i+1}, в правой части – векторы $R_u(t_{i+1})$, $R_p(t_{i+1})$ с обязательной сменой начальных условий (3).

Такое моделирование физически и конструктивно-нелинейного процесса позволяет сводить динамическую задачу к разработанному расчетному алгоритму, при котором неупругий анализ рассматривается как последовательность расчета упругих систем [4].

Математические модели нелинейного расчёта. Часть математических моделей нелинейного расчета представлена в предыдущем пункте уравнениями (1) – (3). Ниже приведена система уравнений, выражающая динамическую реакцию квазиупругой модели диссипативной конструкции на интервале времени $t \in [t_i, t_{i+1}]$ при произвольном внешнем воздействии:

$$\left.\begin{aligned} Y(t) = 2\mathrm{Re}\,\{Z(t)\}, \qquad \dot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\,\{SZ(t)\}, \\ \ddot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\,\{S^2 Z(t)\} + M^{-1}[Q + P(t) - R_u(t_i) + R_p(t_i)] \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где:

$$\left.\begin{aligned} Z(t) = Z_0(t-t_i) + Z^{QR}(t-t_i) + Z^{P}(t-t_i), \\ Z_0(t-t_i) = \Phi(t-t_i) U^{-1} M[-\overline{S}\, Y_0 + \dot{Y}_0\,], \\ Z^{QR}(t-t_i) = [\Phi(t-t_i) - E](US)^{-1}[Q - R_u(t_i) + R_p(t_i)], \\ Z_0(t-t_i) = U^{-1} \int_{t_i}^{t} \Phi\,(t-\tau)^{\mathrm{T}}\, P(\tau)\, \mathrm{d}\tau \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Здесь: $\Phi(t-t_i) = e^{S(t-t_i)}$; $U = MS + S^{\mathrm{T}}M + C$. Матрица S является корнем характеристического матричного уравнения $M_i S^2 + C_i S + K_i = 0$, вытекающего из однородного дифференциального уравнения, соответствующего (2). Чтобы не усложнять запись формул, индекс «i», отвечающий за номер состояния системы, у матриц U и S опущен.

Уравнения (4), (5) позволяют с единых позиций определять динамическую реакцию системы в ее *i*-м состоянии независимо от вида нелинейности (физической или конструктивной).

Силовые параметры реакции (векторы восстанавливающих, диссипативных и инерционных сил) вычисляются по формулам:

$$\left.\begin{aligned} R(t) = K_i Y(t) + R_u(t_i) - R_p(t_i), \qquad F(t) = C_i \dot{Y}(t), \\ I(t) = -M\ddot{Y}(t) = -2M\mathrm{Re}\,\{S^2 Z(t)\} - [Q + P(t) - R_u(t_i) + R_p(t_i)]. \end{aligned}\right\}$$

Выводы. Представленные математические модели позволяют с единых позиций проводить нелинейный временной анализ при сложных динамических воздействиях, включая запроектные воздействия. Динамическая реакция строится в аналитическом виде для конструкций, моделируемых дискретной расчетной схемой с физически и конструктивно-нелинейными свойствами.

Библиографический список

1. Андросова, Н.Б. Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений / Н.Б. Андросова, Н.В. Клюева, В.И. Колчунов // Вестник отделения строительных наук. – 2011. – Выпуск № 15. – С. 17–25.

2. Еремеев, П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 2. – С. 65–72.

3. Чернов, Ю.Т. К расчету систем с выключающимися связями / Ю.Т. Чернов // Строительная механика и расчет сооружений. – 2010. – № 4. – С. 53–57.

4. Потапов, А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях: монография / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.

К содержанию

УДК 624.07+ 624.04

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ В КОНИЧЕСКИХ СТЕРЖНЯХ, ИМЕЮЩИХ ЗАМКНУТЫЙ ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ, НЕДЕФОРМИРУЕМЫЙ КОНТУР, НАХОДЯЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ СТЕСНЁННОГО КРУЧЕНИЯ

В.Ф. Сбитнев

Излагается метод МКЭ в форме метода перемещений, разработанный применительно к вычислению частот свободных колебаний в слабоконических тонкостенных стержнях, находящихся в условиях стеснённого кручения и имеющих односвязный прямоугольный недеформируемый контур.

Ключевые слова: тонкостенный стержень, частота свободных колебаний, определитель, детерминант, МКЭ, метод перемещений, замкнутый контур, депланация, угол закручивания.

В динамических расчётах есть понятие резонанса. Это колебательный процесс, при котором частоты активной нагрузки и свободных колебаний совпадают Сооружение быстро разрушается. Естественно, такой режим работы конструкций не допустим. В то же время, многочисленные примеры показали, что влияние стеснения депланации сечения в тонкостенном стержне при действии динамических нагрузок, оказывается гораздо бóльшим, чем в случае действия аналогичных нагрузок, действующих статически.

Первостепенной в этом случае становится задача вычисления частот свободных колебаний. В некоторых конструкциях частоты свободных колебаний находятся в замкнутой форме, в других их находить сложнее, а в некоторых их вычислить невозможно. К последним относят задачу вычисления частот свободных колебаний в тонкостенных стержнях переменного сечения. В этом случае для решения задачи применяют приближенные методы, например, методы численного анализа, к которым относится МКЭ. В стержнях с произвольным замкнутым контуром крутильные колебания происходят одновременно с изгибными колебаниями; такие колебания называют изгибно-крутильными. В работах русских учёных [2, 3] доказано, что в тонкостенных стержнях, имеющих две оси симметрии, происходит разделение изгибных и крутильных колебаний и изгибные колебания в работе не рассматривается, а рассматриваются только крутильные колебания.

В работе рассматривается задача вычисления частот свободных колебаний в тонкостенных стержнях переменного сечения, имеющих коробчатое сечение с жёстким контуром (рис. 1, а, б, в) и находящихся в условиях стеснённого кручения. Предлагается МУЭ (метод укрупнённых элементов) в форме метода перемещений.

Точные расчёты тонкостенных стержней переменного сечения описываются дифференциальным уравнением 4-го порядка с переменными коэффициентами. Решить его в замкнутой форме пока не удалось.

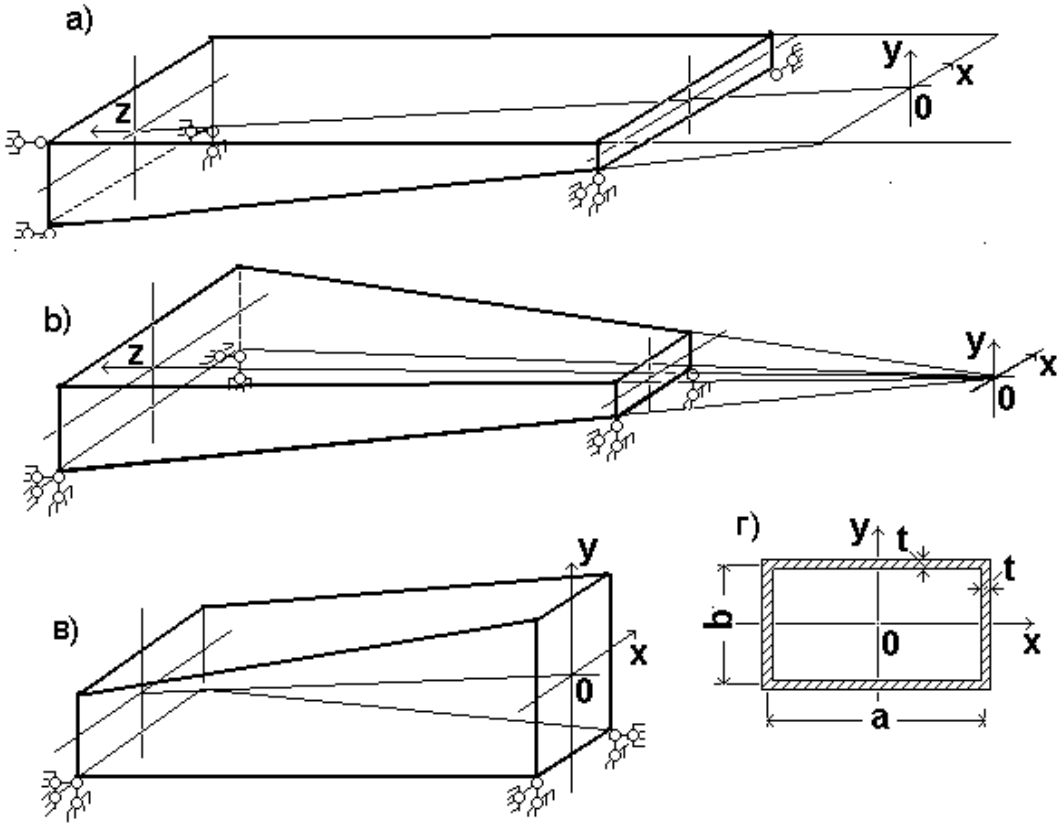


Рис. 1. Виды слабоконических стержней-оболочек

Уравнение крутильных колебаний для тонкостенного стержня с постоянным поперечным сечением описывается однородным дифференциальным уравнением 4-порядка с постоянными коэффициентами [1, 2, 3]:

$$EJ_\omega \frac{\partial^4\theta}{\partial z^4} + J_O \frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} - GJ_\alpha \frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} = 0 \qquad (1.1)$$

В этом уравнении E, G, J_ω, J_O, J_α, J_ρ, θ, γ, g – различные физико-геометрические характеристики [3], о которых будет сказано ниже.

Для тонкостенного стержня коробчатого (прямоугольного) сечения секториальные характеристики равны [2]:

$$J_\omega = ta^2b^2(a + b)/24;\ J_\rho = tab(a + b)/2;\ J_\alpha = 2ta^2b^2/(a + b);\ D = (a – b)^2/(a + b)^2.$$

В основе приводимых исследований лежат: динамические исходные уравнения для тонкостенных стержней [2, 3], метод начальных параметров [2, 3] и классический метод перемещений строительной механики.

Имея ввиду дать в данной работе общий метод расчёта указанных выше тонкостенных стержней по вычислению частот свободных колебаний при произвольно заданных граничных условиях, будем исходить из метода перемещений, изложенного в [4]. В этих работах приведены основные положения этого метода (применительно к расчёту на прочность).

Итак, рассмотрим тонкостенный слабоконический стержень, у которого размеры поперечного сечения в произвольном сечении с координатой z можно выразить через размеры поперечного сечения в «базовом» сечении, которое может находиться как в начале, так и в конце стержня. Пусть этот стержень находится в условиях стеснённого кручения.

За неизвестные принимаются перемещения $z_к$ в намеченных сечениях (узлах): это депланация контура и угол закручивания.

Согласно идее МКЭ для расчёта выбираем основную систему. Это делается так: мысленно стержень разбиваем на несколько укрупнённых элементов, принимая ширину каждого элемента равной ΔL (рис. 2). Это элементы типа рамы-полоски с замкнутым прямоугольным сечением. В намеченные сечения вводятся дополнительные условные связи, препятствующие депланации сечения и углу закручивания, как изображено на рис. 2.

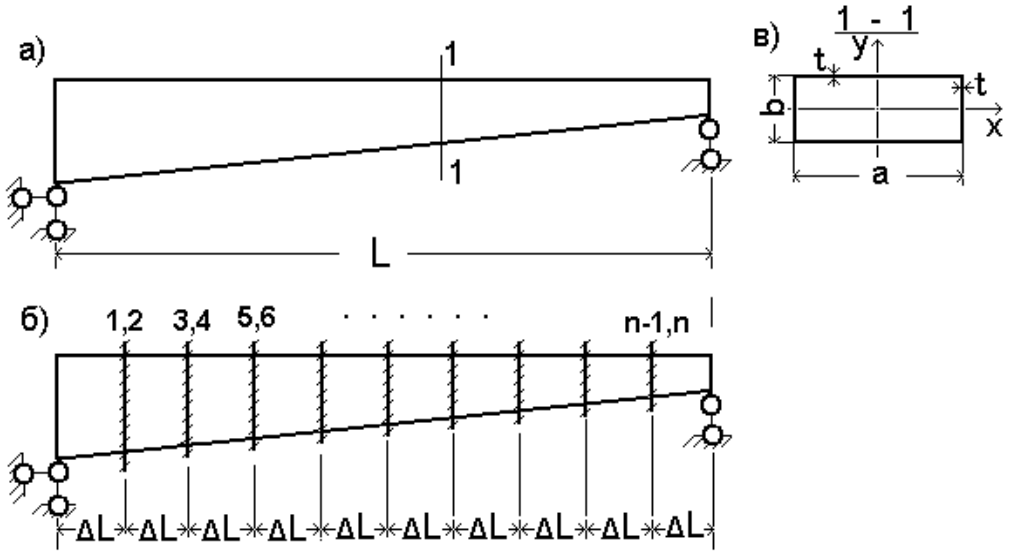


Рис. 2. К выбору основной системы метода

Связь, препятствующую депланации сечения обозначим буквой i, а связь, препятствующую углу закручивания через j.

В состав основной системы будут входить стандартные элементы, зависящие от условий закрепления стержня. Это:

1) элемент, защемлённый с двух концов;

2) элемент, защемлённый на одном конце, и со связью, препятствующей только углу закручивания на другом;

3) элемент, защемлённый на одном конце, и со связью, препятствующей только депланации сечения на другом;

Все эти случаи решены заранее методом сил на единичные воздействия и сведены в таблицы, которые можно использовать в методе перемещений.

В отношении выбора размеров элементов-полос можно утверждать лишь то, что уменьшение ширины полосы ΔL элемента и связанного с этим увеличение числа намечаемых сечений, приводит к повышению точности.

При одном и том же числе намечаемых сечений возможны различные схемы основной системы. Например, ширину элементов можно принимать различной, конические элементы заменять призматическими, а размеры поперечного сечения призматических элементов принимать либо: осреднёнными, по наименьшему или по наибольшему размеру. В работе предлагается конический стержень аппроксимировать ступенчато-переменным. Тогда основная система – это совокупность последовательно соединённых призматических элементов с одним или двумя защемлёнными концами.

Различные основные системы дают различные результаты в окончательных расчётах. Расчёт по наименьшему размеру даёт приближение сверху, по наибольшему – снизу, а усредненному – близко к среднему.

Пусть стержень будет разбит на k участков. Количество неизвестных в этом случае будет n =2(k – 1), если иметь в виду, что в каждом сечении буде введено две дополнительные связи. Следовательно, замена заданной системы основной сводит решение задачи к составлению и решению однородной системы уравнений 2(k – 1) порядка. В канонической форме метода перемещений в общем виде уравнения имеют следующий вид:

$$\ldots r_{i-2,j-2}Z_{n-2} + r_{i-1,j-1}Z_{n-1} + r_{i,j}Z_n + r_{i+1,j+1}Z_{n+1} + r_{i+2,j+2}Z_{n+2} \ldots = 0;$$

Поскольку основная система будет состоять из стандартных призматических элементов, то при наличии табличных данных вычисление опорных реакций от единичных смещений дополнительных связей не будет вызывать больших затруднений. К сожалению, из-за ограничения, наложенного на размеры статьи, табличные данные в работе не приводятся.

В общем случае Z_1, Z_2, . . . Z_n во время свободных колебаний не равны нулю. Поэтому, для получения решения определитель, составленный из коэффициентов при неизвестных, должен равняться нулю:

$$\mathrm{Det} = \begin{vmatrix} \ldots & r_{i-2,j-2} & r_{i-1,j-1} & r_{i,j} & r_{i+1,j+1} & r_{i+2,j+2} & \ldots \end{vmatrix} = 0; \qquad (1.2)$$

Получаемая матрица квадратная порядка **n**, ленточная, в общем случае, имеющая в одной строке не более 6-ти членов.

Развёрнутый определитель даёт сложное трансцендентное уравнение, имеющее бесконечное число корней. Эти корни позволяют определяют множество частот свободных колебаний ω_K. ЭВМ – лучший способ решения трансцендентного уравнения, используя специальные программы.

В данной работе основными расчётными являются параметры:

$$\alpha^2 = GJ_\alpha/EJ_\omega;\ k^4 = J_O\omega_i^2/EJ_\omega;\ \lambda = [\alpha^2/2 + \sqrt{\alpha^4/4 + k^4}]^{1/2};\ \mu = [-\alpha^2/2 + \sqrt{\alpha^4/4 + k^4}]^{1/2}.$$

Так как элементы основной системы будут иметь разные значения λ и μ, то их следует привести к одному, выбранному за главный элемент.

Основную систему можно выбрать и другим образом. А именно, ввести дополнительные связи, недостающие до абсолютной заделки, и в торцевые сечения. В этом случае количество намечаемых неизвестных увеличится

(максимум на две единицы), порядок матрицы жёсткости повышается. Но выбор такой основной системы оправдан тем, что сводит табличные данные всего к одному элементу: это стержень, защемлённый на обоих торцах.

Теоретические соображения проиллюстрируем на тестовом примере. Арифметические выкладки при решении задачи приведены не полностью.

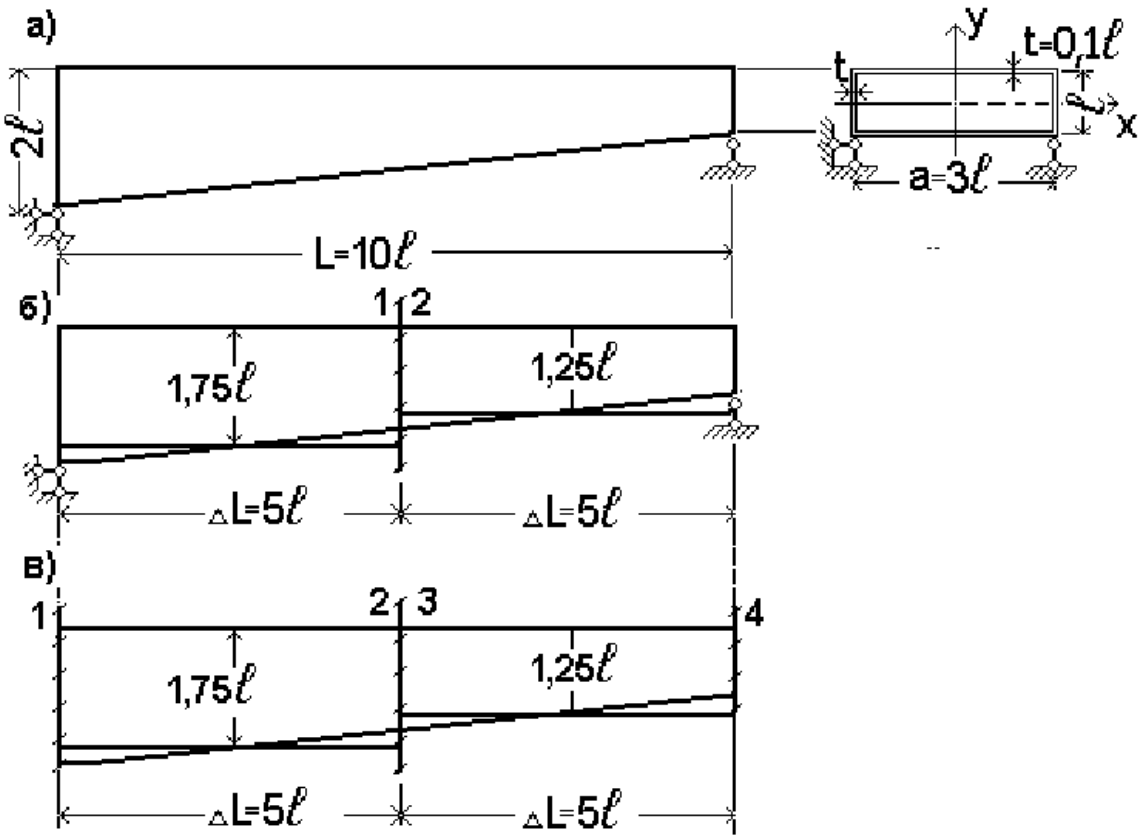


Рис. 3. Тестовый пример расчёта сдабоконического стержня

В качестве расчётной схемы принят тонкостенный стержень переменного сечения, «шарнирно» опертый по торцам (рис. 3). Так как целью примера является не расчёт стержня, а существо подхода к расчёту, то арифметические выкладки при решении задачи приведены не полностью. В качестве расчётной схемы принят тонкостенный стержень переменного сечения, «шарнирно» опертый по торцам (рис. 3). Так как целью примера является не расчёт стержня, а существо подхода к расчёту, то арифметические выкладки при решении задачи приведены не полностью.

Разбиваем стержень на два элемента длиной по 5***l***. Пусть высота левого элемента $b_Л = 1{,}75\boldsymbol{l}$, а правого $b_П = 1{,}25\boldsymbol{l}$. Стержень стальной. Принимаем $E = 2\cdot10^5$ МПа, $G = 8\cdot10^4$ МПа, $\gamma = 7{,}854$ кН/м^3, $g = 9{,}8156$ м/сек^2, $\boldsymbol{l} = 1{,}0$ м. Параметры левого элемента $\alpha_Л = \alpha_O$, $k_Л = k_O$ и $J_{\omega Л} = J_{\omega O}$ примем за главные. Выраженные через них параметры правого элемента: $\alpha_П^2 = 1{,}2491\alpha_O^2$, $k_Л^2 = 1{,}40k_O^2$, $J_{\omega П} = 0{,}4565J_{\omega O}$.

Исследуем два случая выбора основной системы:

1) первый, когда вводятся только две дополнительные связи (рис.3 б);

2) второй - вводятся дополнительные связи в торцах стержня (рис.3 в).

Первый вариант. В этом случае табличным элементом будет стержень, защемлённый на одном конце, а на другом «шарнирный». Основная система будет дважды кинематически неопределимой. Составлялся и раскрывался определитель 2-го порядка. Полученное трансцендентное уравнение решалось с применением функции root(f(z),z) в системе MATHRAD.

В уравнение входили гиперболо-тригонометрические функции A, B, C, D, E, F, G, взяты из [3]. Подставив их в уравнение и обозначив:

$$\varphi_1 = (AF - \lambda^2\mu^2C^2)/(AD - BC), \quad \varphi_2 = (BE - \lambda^2\mu^2D^2)/(AD - BC),$$
$$\psi_1 = (AE - \lambda^2\mu^2CD)/(AD - BC), \quad \psi_2 = (BF - \lambda^2\mu^2CD)/(AD - BC),$$

получаем следующее однородное уравнение:

$$(\varphi_1 + 0{,}4565\varphi_{1Л})(\psi_1 + 0{,}4565\psi_{1П}) - (\psi_2 - \varphi_{2П})^2 = 0.$$

Функции задавали $\omega_1^2 = 980$ 1/сек^2. Она возвратила значение переменной, которое обращает выражение в нуль $\omega_1^2 = 951$ 1/сек^2. Это главная частота.

Второй вариант. Дополнительные связи, препятствующие депланации вводились и на торцах стержня. Здесь табличным элементом стал стержень, защемлённый на обоих торцах. Искомых неизвестны теперь будет четыре. Составлялся и раскрывался определитель 4-го порядка. Полученное уравнение решалось по той же программе, которая возвратила $\omega_1^2 = 969$ 1/сек^2.

Интересно сравнить полученные результаты с другими. Для этого были вычислены первые частоты свободных колебаний в призматических стержнях с различными высотами. Приняв высоту стержня равной b = 1,0***l***, имеем $\omega_1^2 = 894$ 1/сек^2; при b = 1,5***l*** $\omega_1^2 = 983$ 1/сек^2; при b = 2,0***l*** $\omega_1^2 = 1033$ 1/сек^2.

Теперь сравним первые частоты, полученные по предлагаемой методике, и призматического стержня с усреднённой высотой. Имеем: $\omega_1^2 = 969$ 1/сек^2 по методике и $\omega_1^2 = 983$ 1/сек^2. Они расходятся лишь на 1,5%.

Библиографический список

1. Власов, В.З. Строительная механика тонкостенных пространственных систем / В.З. Власов. – М.: Стройиздат, 1949. – 427 с.

2. Карякин, Н.И. Основы расчёта тонкостенных конструкций / Н.И. Карякин. – Высшая школа, 1960. – 239 с.

3. Безухов, Н.И. К расчёту тонкостенных стержней на вынужденные колебания / Н.И. Безухов, О.В. Лужин // Исследования по теории сооружений. – М.: Стройиздат, 1957. – С. 7–41.

4. Сбитнев, В.Ф. Примененииe метода перемещений к расчёту на стеснённое кручение тонкостенных стержней с замкнутым контуром / В.Ф. Сбитнев // Сб. науч. тр. Исследования по строительной механике и механике трудов. – Челябинск: ЧПИ. – 1979. – № 225. – С. 89–96.

К содержанию

УДК 697.94 + 617.089.16:697.94 +628.8

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВОЗДУХА ДЛЯ ЧИСТЫХ ПОМЕЩЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ МЕДИЦИНСКИХ ОПЕРАЦИОННЫХ

Л.Г. Старкова

Система вентиляции и воздухоподготовки является основным и наиболее действенным инструментом достижения оптимальных параметров стерильности в операционных. В ее основу положены подходы и принципы, традиционно применяемые для чистых помещений.

Ключевые слова: чистые помещения, операционная; вентиляция, ламинарный воздушный поток, рециркуляция, перепад давлений.

Во всех медицинских учреждениях чистые помещения необходимы в операционном блоке, палате реанимации и родильном отделении. Основной задачей чистого помещения является снижение риска развития постоперационных инфекционных осложнений, профилактика развития внутрибольничной инфекции.

Чистое помещение – помещение, где в воздухе поддерживаются в определённом заданном диапазоне размер и число на кубический метр таких частиц, как пыль, микроорганизмы, аэрозольные частицы и химические пары. При необходимости в них также могут контролироваться и другие параметры, например влажность, давление и температура. Такие помещения как правило строятся и используются так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление таких частиц внутри помещения.

Основные понятия и принципы строительства чистых помещений изложены в [1]. Текст этого документа представляет собой аутентичный текст международного стандарта ИСО 14644-4-2001 «Cleanrooms and associated controlled environments».

С введением данного документа в РФ изменился подход к проектированию чистых помещений, что в частности, привело к пересмотру норм проектирования операционных и других чистых помещений для медицинских учреждений.

Основные принципы защиты чистых помещений от загрязнений

Система вентиляции и воздухоподготовки является основным и наиболее действенным инструментом достижения оптимальных параметров стерильности в операционных. В ее основу положены подходы и принципы, традиционно применяемые для чистых помещений и позволяющие минимизировать риск инфицирования пациента во время проведения операции.

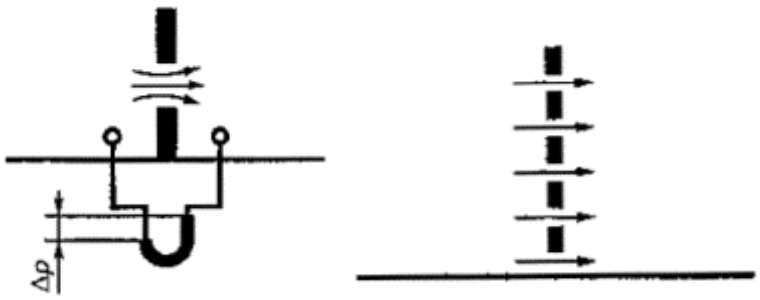
Организация защиты чистых помещений от загрязнений, вносимых из менее чистых зон, согласно [1], возможна двумя способами:

– поддержание в чистых помещениях более высокого статического давления по сравнению с соседними зонами;

– поддержание достаточной скорости потока воздуха в месте разграничения чистой и менее чистой зоны.

В обоих случаях обратное движение воздуха может представлять риск загрязнений.

Для реализации первого способа используется *принцип перепада давления* (рис.1а)**:** между зонами с различными классами чистоты поддерживается перепад давлений от 5 до 20 Па, за счет создания турбулентной (перемешивающей) вентиляции помещений.



а) б)

Рис. 1. Принципы защиты чистых помещений от загрязнений:
а) принцип перепада давления;
б) принцип однонаправленного вытесняющего потока

Для реализации второго способа используется *принцип однонаправленного вытесняющего потока* (рис.1б)**:** разделение чистой и менее чистой соседних зон может быть получено, например, за счет низкотурбулентного (ламинарного) вытесняющего потока воздуха. Скорость вытесняющего потока должна быть, как правило, около 0,2 м/с в направлении от более чистой зоны к менее чистой

При этом, следует обеспечить поступление достаточного количества наружного воздуха для вентиляции в соответствии с санитарными требованиями, компенсации утечек воздуха на границах чистых помещений или чистых зон и компенсации вытяжек воздуха.

Оба принципа защиты от загрязнений могут применяться в медицинской, микроэлектронной, пищевой и других отраслях промышленности.

Нормативные документы ЕС и РФ в отношении вентиляции операционных

Наиболее квалифицированным действующим на сегодняшний день нормативным документом ЕС, регламентирующим вопросы вентиляции и

кондиционирования в медучреждениях, является немецкий стандарт [2]. Упомянутый стандарт классифицирует операционные следующим образом:

Класс Ia

Проводимые операции: ортопедическая и травма хирургия; нейрохирургия, ассоциируемая с особенно высоким риском ифицирования; гинекологическая хирургия (напр. протезирование груди); общая хирургия (например внедрение имплантантов для лечения грыжи); кардиососудистая хирургия; трансплантация органов; операции, длящиеся более нескольких часов (например операции по удалению крупных опухолей).

Требования к системе вентиляции: 3-х ступенчатая степень очистки воздуха. Вертикальный ниспадающий низкотурбулентный (ламинарный) поток. Принимая во внимание разнообразие типов операций, площадь защищенного операционного поля может отличаться, однако должна включать в себя зону операционного стола, весь персонал оперирующей бригады, а также столики с инструментами и стерильными материалами. Рекомендованная площадь защищенного операционного поля – 3 х 3 м

Класс Ib

Проводимые операции: Внедрение малых имплантантов; инвазивная ангиография; катетеризация сердца; эндоскопические обследования стерильных полостей тела.

Требования к системе вентиляции: 3-х ступенчатая степень очистки воздуха. Турбулентно-вентилируемые помещения, низкотурбулентный (ламинарный) поток не требуется. Помещения данного класса должны находиться под избыточным давлением. Минимальный приток свежего воздуха – 1200 м3/ч. Наличие воздушных шлюзов является обязательным (такими шлюзами могут быть помещения подготовки пациента, моечные и пр.). Эффект воздушного замка может быть достигнут посредством прямой подачи в шлюз приточного воздуха, либо посредством перетока избыточного воздуха из операционной в шлюз.

Класс HIa

Проводимые операции: ортопедическая и травма хирургия (напр. операции на костях, крупных суставах с имплантацией инородного материала, политравма); нейрохирургия (напр. на позвоночном столбе); торакальная хирургия (напр. открытие грудины); трансплантации органов; операции с контролируемым временем процедур и низким уровнем подверженности воздействию бактерий; междисциплинарное использование операционной; кардио-сосудистая хирургия; гинекология (напр. протезирование груди); общая хирургия (напр. брюшная грыжа).

Требования к системе вентиляции: 3-х ступенчатая степень очистки воздуха. Вертикальный низпадающий низкотурбулентный (ламинарный) поток площадью не менее 9 м.кв. Площадь защищенного операционного поля должна включать в себя зону операционного стола, весь персонал оперирующей бригады, а также столики с инструментами и стерильными материалами.

Класс HIb

Проводимые операции: операции с малым хирургическим вмешательством (хирургия глаза, урология и пр.).

Требования к системе вентиляции: 3-х ступенчатая степень очистки воздуха. Вертикальный низпадающий низкотурбулентный (ламинарный) поток площадью до 9 м.кв.

Класс HIc

Проводимые операции: внедрение малых имплантантов; инвазивная ангиография; катетеризация сердца; эндоскопические обследования стерильных полостей тела.

Требования к системе вентиляции: 3-х ступенчатая степень очистки воздуха. Турбулентно-вентилируемые помещения, низкотурбулентный (ламинарный) поток не требуется. Помещения данного класса должны находиться под избыточным давлением не менее 6 Па. Наличие воздушных шлюзов является обязательным Эффект воздушного замка может быть достигнут посредством прямой подачи в шлюз приточного воздуха, либо посредством перетока избыточного воздуха из операционной в шлюз.

В настоящее время упомянутый стандарт пересматривается с целью введения еще более дробной классификации помещений медицинского назначения, в частности операционных.

В Российской Федерации, в настоящее время введен в действие документ обязательный к исполнению во всех медицинских учреждениях [3]**.** Согласно этого документа, все операционные делятся на категории «Операционные» и «Малые операционные» без четкого определения рода и степени хирургического вмешательства, соответствующего каждой категории, при этом класс чистоты указанных помещений обозначен категориями «А» и «Б», что не соответствует требованиям [1], где все чистые помещения должны быть классифицированы по категориям «1–9 ИСО».

В отличие от немецкого стандарта [2], в котором четко даны рекомендации по выбору решения системы вентиляции и воздухоподготовки для каждого типа помещений, как в зависимости от вида хирургического вмешательства, так и от класса чистоты помещений, в российском нормативном документе в п.6.13. указана следующая рекомендация:

«Во все помещения воздух подается в верхнюю зону. По *медицинскому заданию* на проектирование в операционных, палатах для ожоговых и других иммунокомпрометированных пациентов строящихся и реконструируемых медицинских организаций *рекомендуется* воздух подавать сверху однонаправленным воздушным потоком в зону операционного стола (кровати)».

Отсюда следует что, выбор способа вентиляции помещений возложен на медицинский персонал, при каждом конкретном случае. На практике (особенно в небольших медицинских учреждениях), медицинский персо-

нал не имеет достаточной компетенции, чтобы составить обоснованное медицинское задание и отказывается от возложенной ответственности. В такой ситуации, у проектировщиков в РФ нет нормативных обоснований по выбору концепции системы вентиляции. Данное обстоятельство весьма затрудняет согласование проектов, финансируемых из государственного бюджета, к каким относится большинство медицинских учреждений.

Пока четкая нормативной база не будет разработана, выбор концепции вентиляции операционных должен выполняться проектировщиком, на основе тщательного сопоставлении всех преимуществ и недостатков каждого способа, с учетом рекомендаций зарубежных стандартов. Основные факторы для проведения проведения такого анализа приведены ниже.

Общепринятые концепции вентиляции операционных

1. Операционные с однонаправленным потоком воздуха

Общие принципы

Современные тенденции мировой хирургической практики все больше склоняются к использованию в операционных однонаправленного низкотурбулентного (ламинарного) воздушного потока, который создается специальной системой распределения, встраимовой в потолок – ламинаром. Данное техническое решение позволяет достичь в зоне проведения операции качество воздуха класса ISO 5 согласно стандарта ISO 14644.

В отличии от турбулентно-вентилируемых операционных, где контаминация воздуха в операционной постепенно уменьшается, посредством его разбавления со стерильным приточным воздухом, концепция, основанная на ламинарном потоке, представляет собой динамическую защиту операционного поля.

Для наибольшего эффекта необходимо, чтобы зона ламинарного потока полностью накрывала операционный стол, персонал оперирующей бригады, а также столики с инструментами и стерильными материалами. Таким образом, создается «стерильная зона», накрываемая воздухом, прошедшим абсолютную фильтрацию, что крайне необходимо при проведении *полостных* операций. Создаваемая таким образом динамическая защита операционого поля, значительно в меньшей степени подвержена влиянию открытия или закрытия дверей в операционной.

Скорость воздушного потока в зоне ламинара должна составлять от 0,2 до 0,45 м/с. Это объясняется тем, что при меньшей скорости воздуха будет невозможно добиться стабильного ламинарного потока – слабые воздушные струи под воздействием сопротивления будут образовывать турбулентные завихрения в зоне воздушного пленума.

Вопросы рециркуляции и экономии энергетических ресурсов

Чем больше площадь ламинарного поля, тем больше энергетических ресурсов потребуется для воздухоподготовки требуемого объема воздуха.

В частности, при ламинаре площадью 10 м. кв. расход воздуха составит 9200 м3/ч. Подготовить такой огромный объем наружного воздуха, доведя его до требуемых параметров температуры и влажности, было бы крайне расточительно. При этом, требуемый минимальный объем добавляемого наружного воздуха, необходимого для разбавления концентрации анестизиологических газов в операционной, как правило состаляет 1500–2000 м3/ч. Возникает необходимость активного использования частичной локальной рециркуляции.

Европейские и российские нормы допускают рециркуляцию при условии соблюдения следующих требований:

1) рециркуляция осуществляется в пределах одного и того же помещения;

2) рециркуляционный воздух, равно как и наружный, должен быть подвержен очистке 2-й и 3-й ступени фильтрации;

3) уровень шума в центре операционного помещения на уровне 1,7 м от пола не должен превышать 48 Дб.

При использовании ламинаров с рециркуляцией воздуха и центрального кондиционера, возможна реализация классических схем как «с первой» так и «со второй» рециркуляцией.

Схема с «первой рециркуляцией» является простейшим решением организации вентиляции операционной с ламинаром, т.к. не предполагает специальных рециркуляционных модулей, установленных внутри помещений. Смешение воздуха производится до обработки воздуха в кондиционере, с помощью обычных воздуховодов.

Вытяжной воздух из операционной возвращается в центральный кондиционер и частично удаляется. Добавляемый объем наружного воздуха смешивается с оставшимся объемом вытяжного воздуха и подается в операционную через ламинарный потолок.

Такое решения является наиболее рациональным при новом строительстве и имеющейся возможности предусмотреть значительные высоты потолков и пространства для прокладки воздуховодов большого сечения.

Схема со «второй рециркуляцией» предполагает смешение потоков воздуха внутри обслуживаемого помещения, т.е. после обработки только наружного воздуха в центральном кондиционере. Для чего в помещении дополнительно устанавливаются рециркуляционные модули (рис. 2).

Данная система специально разработана для решения вопроса рециркуляции и подачи воздуха в ламинар в условиях ограниченного пространства для прокладки воздуховодов большого сечения.

Большая часть воздуха, забираемого из операционной рециркуляционными модулями, возвращается в ламинар, остальная часть возвращается в кондиционер и выбрасывается наружу. В отличии от систем с забо-

ром воздуха на уровне потолка, забор воздуха осуществляемый рециркуляционными модулями, не приводит к нарушению направлению движения воздуха в зоне ламинара.

Рис. 2. Устройство ламинарной системы
со «второй» рециркуляцией

Использование этой схемы дает очень высокий энергосберегающий эффект, т.к.:

– требуется охлаждение и увлажнение только минимально необходимой части наружного воздуха (экономия холодопроизводительности и электроэнергии);

– точка смеси попадает в точку параметров приточного воздуха (точка П), что позволяет избавиться от калорифера второго подогрева (экономия тепловой энергии);

– не требуется прокладка воздуховодов из нержавеющей стали, т.к. фильтр высокотонкой очистки (HEPA) расположен в ламинаре непосредственно перед выпуском воздуха в рабочую зону.

Основной недостаток ламинарных систем и рециркуляционных модулей – высокая стоимость и длительный, свыше 5 лет, срок окупаемости

К сожалению из-за высоких капитальных затрат, применение концепции ламинаров большой площади далеко не всегда представляется возможным.

Для операционных, оснащаемых ламинарами малой площади, вопросы энергосбережения стоят не так остро. В этих случаях возможно применение систем вентиляции без рециркуляции.

2. Турбулентно-вентилируемые операционные

Система вентиляции в операционных, не оснащенных ламинаром, должна быть спроектирована на базе принципа контроля перепадов давления в операционном блоке (отделении) в целом.

Приточный воздух подается в операционную через фильтровальные блоки, оснащенные HEPA-фильтрами и турбулентными диффузорами. Расход приточного воздуха принимается как константа, при этом система автоматического контроля перепадов давления управляет вытяжками.

Основные преимущества системы :

1) возможность обслуживания нескольких операционных;
2) более низкая стоимость;
3) малый шум;
4) доступность оборудования.

Основные недостатки:

1) меньшая степень защиты от загрязнений;
2) более высокое энергопотребление;
3) повышенный расход воздуховодов из нержавеющей стали.

Заключение

Система вентиляции и кондиционирования операционной, равно как и стерильного медицинского блока в целом, представляет собой сложный инженерный комплекс, от работоспособности которого напрямую зависят человеческие жизни. Необходимо понимать, что проектирование и сооружение такого комплекса является сложной задачей, решение которой несомненно требует высококвалифицированного подхода как от технических разработчиков систем, так и от лиц отвечающих за финансирование объекта. Для оптимального решения поставленной задачи, необходима тщательная проработка нормативной документации на государственном уровне с использованием данных новейших исследований.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО 14644-4-2002. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды

2. DIN 1946 Часть 4: Системы вентиляции и кондиционирования в зданиях и помещениях, используемых в сфере здравоохранения.

3. СанПиН 2.1.3.2630 – 10. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность.

К содержанию

УДК 666.914

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ГИПСОВОЛОКНИСТЫХ ЛИСТОВ

Б.Я. Трофимов

Существующие технологии гипсовых листов не обеспечивают некоторые эксплуатационные характеристики этих изделий, что ограничивает область их применения. Для повышения их стойкости и прочности были проведены настоящие исследования.

Ключевые слова: гипсоволокнистые листы; прочность; огнестойкость; водостойкость; морозостойкость.

В настоящее время во всем мире отмечается значительный рост производства гипсовых материалов. Доля гипсовых материалов в технически развитых странах достигает 20…27 % от общего объема изделий на минеральных вяжущих. Высокий потенциал роста имеется, прежде всего, в сегменте листовых гипсовых материалов, таких как гипсокартонные (ГКЛ) и гипсоволокнистые листы (ГВЛ).

Наряду с необходимостью увеличения объема выпуска этих изделий, основной задачей является повышение качества гипсовой продукции, ее прочности, огнестойкости, водостойкости, что позволит расширить область применения листовых гипсовых материалов в строительной отрасли.

Целью проводимых на кафедре «Строительные материалы» ЮУрГУ исследований являлось выявление способов повышения эксплуатационных характеристик ГВЛ.

Гипсовое вяжущее, марки не ниже Г-3, тонина помола, характеризуемая остатком на сите с размером ячеек в свету 0,063 мм, не более 31,7 %; 0,09 мм – 18,8 %; 0,2 мм – 2,4 %; 1 мм – 1 %. Армирующий компонент – волокно из бумажной макулатуры марки МС-10, показатель сорности не более 1 % и показатель влажности не более 12 %.

Для придания листам противопыльных и водоотталкивающих свойств применяется поверхностная обработка раствором латекса СКС-65 ГП или его зарубежными аналогами. Для формования образцов ГВЛ размером 21,4х21,4 см использовали устройство, представляющее металлическую плиту-основание, с подвижными бортами высотой 6 см, способными перемещаться перпендикулярно плоскости основания.

При изготовлении образцов на основание устройства засыпали предварительно перемешанные сухие материалы в четыре слоя, каждый слой с помощью пульверизатора смачивали водой с растворенной в ней лимонной кислотой и при необходимости другими добавками. Затем проводили прессование до нагрузки 229 кН со скоростью 3–4 кН/с. В процессе нагрузки верхняя плита пресса опускает подвижные борта и спрессовывает

материал, формируя плитку. Затем устройство разгружали, борта опускали в крайнее нижнее положение, извлекали образец, который подвергали сушке по режиму предприятия или тепло-влажностной обработке.

Для повышения прочности ГВЛ исследовали влияния искусственного «старения» (выдержка в воздушно-влажных условиях) гипса на его физико-механические характеристики. При «старении» гипса происходит снижение его водопотребности, ускорение сроков схватывания, и повышение прочности на одну-две марки (рис. 1).

Искусственное «старение» эффективно в условиях относительной влажности воздуха 80–100 % в течение 3 суток, при дальнейшем хранении во влажных условиях свойства гипса остаются практически на одном уровне. Причиной улучшения свойств гипса при «старении» является образование двуводного гипса (до 3 %), который служит кристаллической затравкой и вызывает ускоренное образование и рост более совершенных кристаллов двугидрата сульфата кальция. Эффекта, подобного «старению», можно добиться путем введения в вяжущее добавки двуводного гипса той же тонкости помола, что и вяжущее в количестве 1–3 % от массы вяжущего.

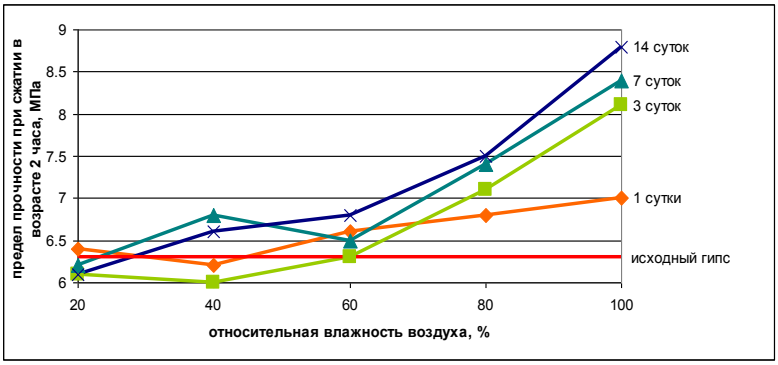


Рис.1. Влияние условий старения гипса
на его прочность при сжатии через 2 часа

Использование «постаревшего» вяжущего для производства ГВЛ способствует повышению предела прочности при изгибе, снижению поверхностного водопоглощения, однако приводит к повышению плотности и теплопроводности (табл.).

Одним из самых эффективных направлений повышения водостойкости гипсовых вяжущих является введение активных минеральных добавок (АМД) и получение композиционных вяжущих на гипсовой основе (КГВ).

Влияние добавки шлака на водостойкость композиционного цементно-гипсового вяжущего водного и воздушного твердения приведено на рис. 2, 3.

Таблица

Свойства ГВЛ

Маркировка состава	Плотность, кг/м^2 при толщине 10 мм	Прочность при изгибе, МПа	Поверхностное водопоглощение, кг/м^2	Коэффициент теплопроводности	Состав
На «постаревшем» вяжущем	14,49	12,85	10,4	0,215	гипс – 9,8 кг; волокно – 1,96 кг; лим.к-та – 0,587 г; вода – 2,93 кг
Базовый состав	13,17	8,34	12,5	0,174	гипс – 8,8 кг; волокно – 1,76 кг; лим.к-та – 0,528 г; вода – 2,64 кг

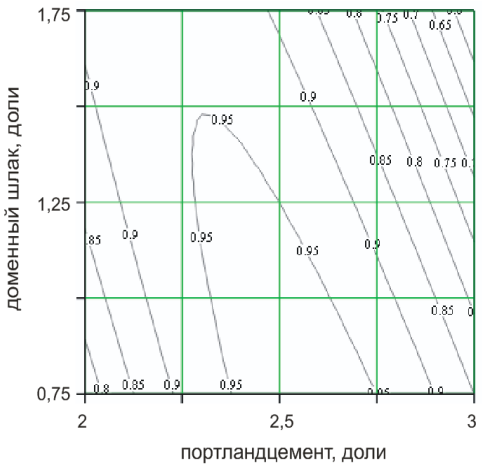


Рис.2 Коэффициент размягчения в возрасте 28 сут. (твердение в воде) (F_o=3,19<$F_{табл.}$=4,3)
$Кр^{водн.}$=0,95-0,07x-0,04y-0,16x^2-0,02y^2-0,11xy*

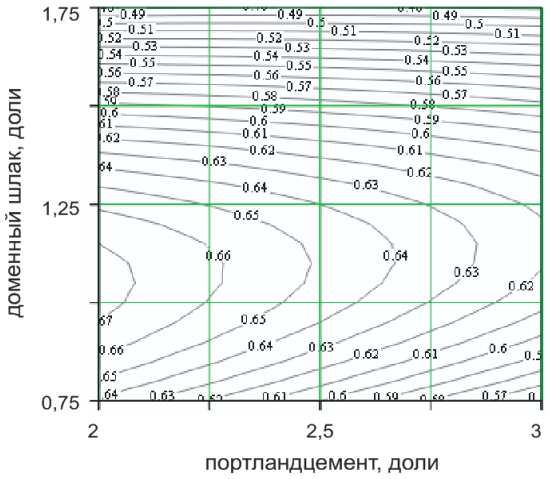


Рис. 3. Коэффициент размягчения в возрасте 28 сут. (твердение на воздухе) (F_o=0,006<$F_{табл.}$=4,3)
$Кр^{возд.}$=0,64-0,02x-0,06y-0,002x^2--0,1y^2+0,02xy*

* значения в кодовых единицах (от -1 до +1)

Условия твердения оказывают решающее влияние на водостойкость композиции. При твердении в воде, камень вяжущего достигает коэффициента размягчения 0,95, в то время как при твердении на воздухе максимальный коэффициент размягчения составляет 0,67. Различен также и характер зависимостей: при твердении в воде наиболее значимым фактором является содержание портландцемента, в связи с более полной гидратацией клинкерных минералов и формированием более прочной и водостойкой структуры. При твердении на воздухе содержание портландцемента практически не оказывает влияния на водостойкость камня вяжущего, а при повышении содержания шлака более 1 доли, водостойкость заметно снижается, что также связано с отсутствием условий для его гидратации, высокое содержание непрореагировавших частиц шлака приводит к «разбавлению» вяжущего и, соответственно, к снижению прочности и водостойкости.

Условия твердения также оказывают значительное влияние на предел прочности при изгибе. В воздушных условиях формируется структура с бóльшей прочностью, так как это благоприятная среда для твердения полуводного гипса и неблагоприятная для гидратации цемента, шлака и формирования комплексных гидратов. Призматические вытянутые кристаллы двуводного гипса выполняют роль микроарматуры, что значительно повышает прочность материала при изгибе. При твердении в воде преимущественно формируются комплексные гидраты, которые имеют меньшую прочность при изгибе, вследствие морфологии своих кристаллов.

Исследование композиции гипс-портландцемент-метакаолин показало, что при твердении образцов в воде избыточное содержание метакаолина приводит к уменьшению водостойкости, это вероятно связано с образованием большого количества гексагональных гидроалюминатов с низкой водостойкостью. При твердении на воздухе, наоборот, водостойкость повышается при высоком содержании метакаолина, так как на воздухе реакции гидратации протекают в начальные сроки с формированием структуры предпочтительно из эттрингита, а затем практически прекращаются и резервы пуццолановой активности метакаолина используются не полностью.

Предел прочности при изгибе в любых условиях снижается при повышении количества метакаолина, это можно объяснить увеличением нормальной густоты теста вяжущего. На некоторых образцах при высоком содержании активной минеральной добавки, особенно при твердении в воде, были отмечены деструктивные явления, такие как образование продольных трещин, возможно связанных с деформациями расширения или деструкцией при перекристаллизации гидратных фаз. Коэффициент размягчения не превышал 0,85 при водном твердении и 0,62 при воздушном.

Для подбора оптимального состава композиции «гипс+цемент +микрокремнезем+водоредуцирующая добавка» спланировали двухфакторый эксперимент, переменными факторами в котором являлись количество цемента и микрокремнезема. Количество водоредуцирующей добавки было фиксированным во всех составах и составляло 0,8 % от массы вяжущего.

По результатам испытаний построены графические зависимости, основные из которых представлены на рис. 4, 5.

Как в водных, так и в воздушных условиях твердения получен наиболее водостойкий материал при низком количестве цемента, близком к 2 долям, при этом количество микрокремнезема должно составлять 0,2–0,3 или 0,7–0,8 долей. В водных условиях коэффициент размягчения закономерно выше, что связано с более полной гидратацией цементных минералов и большим использованием пуццолановой активности микрокремнезема.

Предел прочности при изгибе значительно снижается при повышении количества активной минеральной добавки в любых условиях твердения.

Используя водостойкие композиции взамен гипсового вяжущего можно значительно снизить поверхностное водопоглощение волокнистых листов. Также установлено, что условия тепло-влажностной обработки предпочтительнее для формирования повышенной прочности при изгибе. Наибольшей прочностью и плотностью обладают листы, полученные на основе композиций «гипс + цемент + шлак» и «гипс + цемент + микрокремнезем + водоредуцирующая добавка». Эти листы при тепловлажностном твердении обладают меньшей теплопроводностью и сниженным поверхностным водопоглощением.

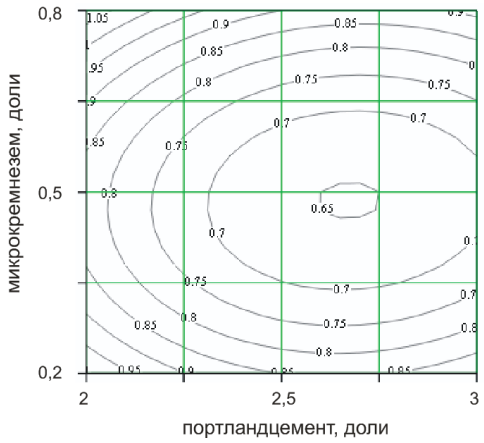


Рис. 4. Коэффициент размягчения в возрасте 28 сут. (твердение в воде) (F_o=0,25<$F_{табл.}$=4,3)

$Кр^{водн.}$=0,66-0,07x+0,025y+0,1x^2+0,215y^2-0,015xy*

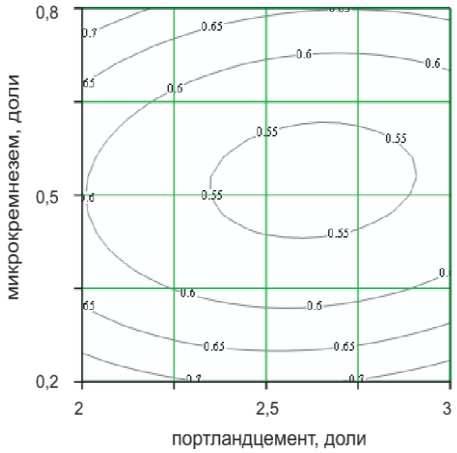


Рис. 5. Коэффициент размягчения в возрасте 28 сут.
(твердение на воздухе) (F_o=2,45<$F_{табл.}$=4,3)
$Кр^{возд.}$=0,54-0,02x-0,017y+0,042x^2+0,137y^2-0,018xy*

* значения в кодовых единицах (от -1 до +1)

Для дальнейших исследований использовались оптимальные составы смесей со шлаком для водных условий твердения и с микрокремнеземом при твердении в воздушно влажной среде. Снижение плотности и теплопроводности ГВЛ достигалось введением пористых заполнителей: вспученного перлита (п) с насыпной плотностью 52 кг/м^3, вспученного вермикулита (в) 110 кг/м^3, керамзита (к) 480 кг/м^3, микросфер (м) 50 кг/м^3 , вспученного стекла (ст) 115 кг/м^3.

Теплопроводность ГВЛ при увеличении количества наполнителей снижается (рис.6), это связано со снижением плотности и формированием структуры материала, включающей высокопористые частицы, поры которых заполнены самым низкотеплопроводным материалом – воздухом.

Теплопроводность ГВЛ при увеличении количества наполнителей снижается (рис.6), это связано со снижением плотности и формированием структуры материала, включающей высокопористые частицы, поры которых заполнены самым низкотеплопроводным материалом – воздухом. Наибольший эффект достигается при введении микросфер, вспученного стекла и керамзита.

Для эффективного снижения плотности без ухудшения прочности при изгибе, поверхностного водопоглощения, теплопроводности и внешнего вида листов можно рекомендовать введение перлита в количестве до 25% в объеме «бумажное волокно + наполнитель».

С целью выявления влияния на физико-механические характеристики ГВЛ минеральной и полимерной фибры провели серию экспериментов с использованием стекловолокна, базальтовой и полимерной фибры, асбестовое волокно было решено использовать в связи с негорючестью и характеристиками, сходными с бумажным волокном.

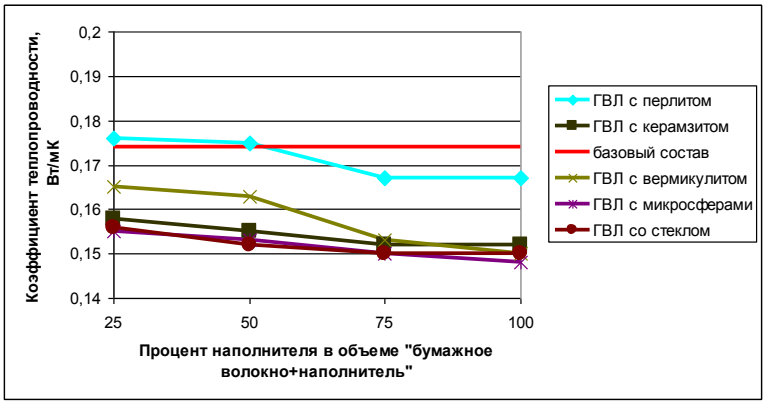


Рис. 6. Изменение коэффициента теплопроводности ГВЛ

В результате проведенных экспериментов было установлено, что при принятом способе подготовки смеси сырьевых компонентов (предварительное перемешивание всухую) и дальнейшем ее прессовании базальтовое и полимерное волокно невозможно равномерно распределить по объему смеси, т.к. исходные волокна образуют пучки или закручиваются. Введение этих волокон с водой затворения не представляется возможным, т.к. сырьевая смесь увлажняется в процессе прессования путем распыления четко заданного количества воды. Стекловолокно при перемешивании всухую скатывается, что снижает эффективность его работы в качестве фибры.

Плотность ГВЛ закономерно повышается с ростом количества асбестового волокна, что объясняется большей плотностью этого волокна по сравнению с бумажным; и понижается при увеличении дозировки стекловолокна.

Предел прочности листов при изгибе с использованием асбестового волокна значительно увеличивается, при этом максимум прочности достигается при соотношении «бумажное волокно/асбестовое волокно», равном 1:1 по объему. При использовании стеклянного волокна прочность образцов ГВЛ по сравнению с листами на основе гипса практически не изменяется.

Уменьшение поверхностного водопоглощения с повышением количества асбестового и стекловолокна связано со структурой используемых волокон: асбестовые волокна имеют вид закрытых трубочек, стекловолокно обладает плотной стекловидной структурой, эти волокна удерживают значительно меньшее количество воды по сравнению с бумажным волокном.

Теплопроводность всех образцов с использованием асбестового волокна значительно выше, чем у образцов на основе бумажного волокна, что связано с высокой плотностью получающегося материала. При использовании стеклянного волокна теплопроводность по сравнению с бумажным волокном почти не изменяется.

Таким образом, при выбранном способе получения ГВЛ целесообразно применять асбестовое волокно в количестве до 100 % для повышения пре-

дела прочности при изгибе и снижения поверхностного водопоглощения. Кроме того, хризотил-асбест обладает высокой огнеупорностью, и, как и стекловолокно, является негорючим, поэтому замена части горючего бумажного волокна на асбестовое или стекловолокно должна положительно сказаться на огнестойкости ГВЛ. Но при этом использование стекловолокна может привести к технологическим проблемам при транспортировке отформованного листа при перемещении его с одного конвейера на другой.

Из результатов проведенных испытаний определили технологии, материалы на основе которых обладают улучшенными свойствами по сравнению с основным (базовым) составом, используемом на производстве, по двум основным направлениям улучшения свойств ГВЛ:

– повышение водо- и морозостойкости (листы для наружной отделки с коэффициентом размягчения не менее 0,8 и морозостойкостью не менее F25);

– повышение огнестойкости – состав со стекловолокном.

Выводы

1. В результате работы предложены решения для совершенствования ГВЛ, разработаны составы водо- и морозостойких листов, которые применимы для наружной отделки и для помещений с повышенной влажностью воздуха, а также огнестойких листов для огнезащиты внутри помещений.

2. Доработка существующей технологической линии для производства листов на основе полученных результатов не является дорогостоящей инвестицией и с учетом возможного объема производства окупится менее чем за год, поскольку часть новшеств не требует специального технологического оборудования.

3. Водо- и морозостойкие листы, кроме использования в помещениях с повышенной влажностью и для наружной отделки, можно использовать как несъемную опалубку. Составы для огнестойких листов можно использовать в качестве элементов подвесных потолков. В этих случаях перспективной является разработка отделочных покрытий (окрасочных, рельефных и т.д.), эффективно работающих с такими листами.

4. Для негорючих ГВЛ дополнительно нужно провести огневые испытания при различном содержании органического и неорганического заполнителя.

К содержанию

УДК 666.972.53

АКТИВНОСТЬ ШЛАКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА НА ЦЕМЕНТАХ С ДОБАВКОЙ ДОМЕННОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ШЛАКА

Б.Я. Трофимов, П.Н. Киль, К.В. Шулдяков

Доменный гранулированный шлак (ДГШ) является одним из основных компонентов при производстве цементов, обеспечивает целый ряд технических и социальных достоинств. Замедление схватывания и твердения вызывает снижение прочности и стойкости бетона на смешанном вяжущем, что ограничивает его применении.

Ключевые слова: Активность шлака; гидросиликатный гель; морозостойкость бетона; стабильность гидратных фаз.

Применение вяжущих с ДГШ позволяет решить некоторые социальные проблемы: утилизировать отходы, сократить объёмы производства клинкера, что, в свою очередь, сокращает энергоёмкость производства цемента и выбросы углекислого газа в атмосферу, снизить стоимость бетона и железобетона. Введение ДГШ в состава цемента приводит к следующим изменениям свойств вяжущего по сравнению с ЦЕМ 1 [1]:

Повышает водопотребность с увеличением дисперсности шлака, удлиняет сроки начала и конца схватывания, что способствует увеличению сохраняемости удобоукладываемости бетонной смеси.

Замедляет набор прочности цемента в ранние сроки при естественном твердении.

Уменьшает теплоту гидратации, поэтому такие цементы рекомендуются при строительстве массивных сооружений, но для зимних условий твердения или для изготовления сборного железобетона на таких цементах желательно применение прогревных методов твердения.

Повышается стойкость цементного камня к воздействию агрессивных сред: сульфатостойкость, кислотостойкость, щёлочестойкость, стойкость к морской воде, карбонизации и др. вследствие уменьшения в цементном камне $Ca(OH)_2$ и продуктов гидратации алюминатных фаз.

За счет снижения объёма капиллярных пор и увеличения содержания низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H (1) бетоны на таких цементах при сопоставимой степени гидратации вяжущего характеризуются повышенной морозостойкостью, водостойкостью и водонепроницаемостью.

Железобетонные изделия на смешанных вяжущих менее склонны к высолообразованию вследствие меньшего содержания свободного $Ca(OH)_2$ в цементном камне и повышенной плотности.

Для расширения области применения бетонов на шлакопортландцементах необходимо выяснить возможность применения таких бетонов для из-

делий с нормируемыми требованиями по морозостойкости. Имеются сведения о возможности получения бетонов на таких цементах с маркой по морозостойкости F 500 и более [2]. С.В. Шестопёров показал [3], что нормальные условия твердения бетонов на шлакопортландцементах в течение 28 суток не обеспечивают формирование морозостойких структур цементного камня, если удельная поверхность ($S_{уд}$) шлаковой составляющей вяжущего ниже 500м^2/кг или её содержание более 70 % от массы вяжущего.

Замедление гидратации и твердения бетонов на шлакопортландцементах особенно характерное в ранние сроки твердения, приводит к тому, что в марочном возрасте, когда обычно испытывают морозостойкость, бетоны на таких цементах характеризуются повышенной открытой капиллярной пористостью из-за меньшего (по сравнению с бетонами на портландцементах) объёма продуктов гидратации цемента. Кроме того, уменьшение объёма гелевой структурной составляющей цементного камня снижает роль адсорбционной контракции, увеличивает проницаемость и степень насыщения бетона водой, что отрицательно сказывается на морозостойкости. Для получения сопоставимых с бетоном на портландцементах данных по морозостойкости необходимо обеспечить одинаковую степень гидратации цементов, то есть одинаковую степень заполнения первоначальных капиллярных объёмов продуктами гидратации. Технологически повышение плотности бетонов на шлакопортландцементах достигается либо увеличением гидравлической активности шлаков, либо уменьшением объёма капиллярных пор снижением количества воды затворения.

Условия твердения бетонов на шлакопортландцементах оказывают существенное влияние на его морозостойкость: применение шлакопортландцемента позволяет получать бетон после тепловлажностной обработки с большей морозостойкостью, несмотря на меньшую начальную прочность, чем бетон на портландцементе, твердевший в тех же условиях. Гидратационные и вяжущие свойства шлаков зависят от химико-минералогического состава, наличия и вида микропримесей, режима охлаждения шлакового расплава, вида активатора, скорости гидратации стеклообразной и кристаллической фаз и свойств гидратных новообразований.

Наибольшее влияние на свойства доменных шлаков оказывает различие в содержании Al_2O_3, которое для шлаков металлургических заводов России, стран СНГ и других находится в пределах 5…21 % по массе. Степень гидратации кислого шлака в составе шлакопортландцемента при пропаривании бетонных и железобетонных изделий в 2,5…3 раза ниже, чем основного, что ухудшает физико-механические свойства бетона.

По содержанию оксида магния установлено, что верхняя граница допустимого содержания MgO примерно соответствует количеству Al_2O_3 в шлаке ЧМЗ Al_2O_3=11,66 %, MgO=10,28 %. Увеличение содержания MnO в шлаке до 10 % не ухудшает его гидравлические свойства.

Активность шлака зависит от содержания и структуры шлакового стекла, которое интенсивней взаимодействует с водой, чем кристаллическая фаза того же химического состава. Исследованиями выявлено, что максимальная гидравлическая активность шлака обеспечивается при содержании кристаллической фазы до 5 %. Увеличение степени закристаллизованности шлака до 15…20 % не повышает активность ДГШ, а при количестве стеклофазы менее 80 % качество шлака как компонента шлакопортландцемента начинает снижаться. Кристаллическая фаза шлака чаще всего представлена: белитом β C_2S, анортитом CAS_2, окерманитом C_2MS_2, геденбергитом CFS_2, геленитом C_2AS, мервинитом C_3MS_2 и др., из них только белит обладает вяжущими свойствами, геленит практически не гидратируется, тепловая обработка значительно активизирует его. Шлаковое стекло характеризуется ближним порядком расположения атомов, микроучастки с упорядоченной структурой создаются основными стеклообразующими катионами Si^{4+}, Al^{3+}, которые с кислородом образуют пространственные структуры. Кремний образует тетраэдры $(SiO_4)^{4-}$, цепочки и другие полимеры, отрицательные валентности в которых нейтрализуются катионами-модификаторами. Типичным модификатором является ион Ca^{2+} – чем его больше, тем меньше степень полимеризации стекла, меньше его стабильность и больше химическая активность. Амфотерные ионы магния и алюминия могут выступать как структурообразующие элементы или как модификаторы. Вхождением оксида магния в структуру стекла объясняется отсутствием свободного MgO в шлаке, даже при содержании MgO до 20 % по массе, благодаря чему предотвращается неравномерность изменения объёма при твердении шлакопортландцемента.

Одной из причин различия гидравлических свойств шлаков является изменение координации ионов, входящих в пространственную структуру стекла. Основная роль в изменении свойств гранулированных шлаков отводится ионам алюминия, которые легко принимают четвертную и шестерную координации. Согласно С.М. Рояку гидратация шлака проходит по следующей схеме: под воздействием иона гидроксония H_3O^+ ион Ca^{2+} шлакового стекла вовлекается в жидкую фазу, а амфотерные ионы переходят из четвёртой в шестерную координации. Структурные связи поверхностного слоя шлака ослабляются, что способствует растворению тетраэдров $(SiO_4)^{4-}$. Из-за малой подвижности тетраэдры кремнезёма реагируют с известью вблизи от поверхности шлакового зерна с постепенным образованием оболочки из гидратированного геля вокруг этого зерна, в результате чего скорость гидратации лимитируется диффузионной проницаемостью образовавшейся гидратной оболочки.

При гидратации шлакопортландцемента гидратирующиеся первыми клинкерные частицы образуют гидросиликатный гель, обволакивающий зёрна шлака и клинкера. Образующийся гипсо-известковый водный рас-

твор способствует возбуждению гидравлической активности шлака. Из высокоосновного гидросиликата, образующего оболочку вокруг зёрен шлака, растворяется известь и на месте первичного гидрата остаётся аморфизированная плёнка, обогащённая глинозёмом и кремнезёмом. Образовавшийся гидратный гель весьма устойчив во времени и при благоприятных условиях очень медленно кристаллизуется. В структуре геля при температуре до минус 40 ^{o}C изменений не наблюдается, после оттаивания могут из аморфной массы выкристаллизоваться новообразования с разрывом гелевых оболочек вокруг негидратированных зёрен. После образования плотной оболочки гидратация осуществляется с диффузионным контролем по мере проникания влаги через оболочку новообразований и разрывы в ней к негидратированным клинкерным остаткам. Постепенно зёрна шлакового стекла замещаются продуктами гидратации шлака: основными – «нестехиометрическими аморфизированными гидросиликатами с большой поверхностной энергией» [4], и кристаллическими – эттрингитоподобной (AF_t) фазой, представленной игольчатыми или призматическими кристаллами, и алюмоферритной (AF_m) фазой.

По данным [5] микроструктура камня из шлакоцементного вяжущего аналогична микроструктуре камня из чистого портландцемента за исключением меньшего содержания $Ca(OH)_2$. Слои продуктов гидратации клинкерных фаз образуются на границах шлаковых зёрен и постепенно распространяются вширь. Формирующиеся низкоосновные гидросиликаты кальция типа C-S-H имеют значения отношения Ca/Si в интервале 1,55–1,79, что ниже, чем значения этого отношения 1,7–2,0, характерные для чистого портландцемента. Продукты гидратации шлака содержат значительно меньше CaO и больше оксидов алюминия и магния. Предполагается, что гидрат, описанный как C-S-H, в действительности представляет собой однородную смесь последнего с AFm-фазой и, в меньшей степени, со структурой гидротальцитового типа, имеющей отношение A1/Mg=0,38. В ходе гидратации шлака имеет место небольшое перемещение ионов магния или кислорода внутрь или наружу шлаковой матрицы. При этом высвобождается значительная часть ионов алюминия, кремния и кальция и забирается эквивалентное количество водорода. Освобождённые ионы вносят вклад в состав продуктов гидратации, образующихся в первоначально наполненном водой пространстве. Содержание связанной воды в двухлетнем камне из теста с В/Т=0,5 обычно уменьшается с 0,23 % для чистого портландцементного камня, до 10–13 % для смешанных цементов, содержащих 90% шлака.

Кристаллические фазы более разбросаны в шлакопортландцементном камне, чем эттрингит портландцемента, локализованный вокруг зёрен C_3A. Глинозём, содержащийся в шлаковом стекле, встречается в гидратированном камне в виде твёрдого раствора в гидросиликатном геле. При повы-

шенном содержании шлака в результате твердения шлакопортландцемента образуется камень, в котором уменьшается содержание свободного гидроксида кальция, взаимодействующего со шлаковым стеклом.

Гидросиликатный гель со временем постепенно уплотняется за счёт поглощения извести, что приводит к росту плотности и прочности цементного камня. Из-за меньшего содержания извести в шлакопортландцементном камне этот процесс идёт медленнее, чем для портландцементного камня.

При использовании особенно малоалюминатного шлака, шлакопортландцемент при гидратации образует более плотную гидросиликатную гелевую структуру с меньшим содержанием кристаллической извести по сравнению с портландцементным камнем. Эти особенности структуры шлакопортландцементного камня обусловливают его высокие прочностные и эксплуатационные свойства. Тепловлажностная обработка является благоприятным режимом твердения шлакопортландцемента, при котором, благодаря активизации шлака, образуется дополнительное количество продуктов гидратации, повышается плотность гелевидной структурной составляющей типа C-S-H (1), формируется мелкодисперсная структура цементного камня. Связывание извести шлаком в гелевидные гидросиликаты обеспечивает их высокую стабильность и придаёт бетону способность релаксировать напряжения при фазовых переходах поровой жидкости в процессе замораживания. Применение шлакопортландцементов с предварительно тонко измельчённым шлаком повышает трещиностойкость бетона при нормальном твердении за счёт уменьшения концентрации напряжений при увеличении количества гелевидных гидросиликатов кальция. Это создаёт предпосылки для получения бетона на шлакопортландцементе высокой морозостойкости и, что особенно важно, прошедшего тепловлажностную обработку, которая снижает морозостойкость бетона на портландцементе примерно в два раза, по сравнению с образцами бетона нормального твердения.

Из практики известно, что наивысшую морозостойкость бетона удаётся получить при использовании сульфатостойкого портландцемента. Пуццолановые добавки, связывающие известь и повышающие стабильность цементного геля, вводимые в больших количествах (до 30…40 % мо массе), понижают морозостойкость бетона из-за резкого увеличения водопотребности такого вяжущего. Небольшая добавка природной пуццоланы (до 5 % от массы цемента) повышает морозостойкость бетона благодаря образованию дополнительного количества гидросиликатного геля, уплотняющего бетон.

Следовательно, проблема повышения морозостойкости бетона с применением шлакопортландцементов сводится с одной стороны к увеличению гидравлической активности шлаков (тонкий помол, грануляция для

получения шлака с минимальным содержанием кристаллической фазы, термическое, сульфатное, щелочное или комплексное возбуждение), а с другой – к регулированию пористости бетона. Для морозостойких бетонов объём резервных пор должен превышать возможное приращение объёма вследствие перехода воды в лёд в капиллярных порах.

Бетоны будут в том случае высокой морозостойкости, когда при замораживании жидкая фаза в них не переходит в лёд или часть её может многократно превращаться в лед и вновь переходить в жидкое состояние без деструкции материала.

Исходя из этих представлений о способах создания бетонов высокой морозостойкости можно наметить следующие направления регулирования пористости:

– создание бетонов с тонкопористой структурой, вода в которой не замерзает при эксплуатационных температурах;

– уменьшение до технически возможного минимума объёма открытых пор ($П_к$);

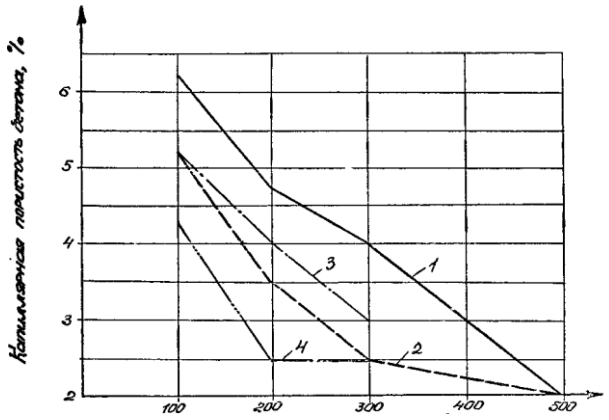
– увеличение до требуемого объёма условно замкнутых пор ($П_{уз}$);

– наличие в структуре цементного камня пластической составляющей (цементного геля), обеспечивающей релаксацию напряжений.

Наиболее широко применяется для повышения морозостойкости бетона уменьшение количества воды затворения (В/Ц), приводящее при постоянной степени уплотнения бетонной смеси и степени гидратации цемента к понижению открытой капиллярной пористости. Понижение водопотребности бетонной смеси достигается также использованием цемента с минимальной водопотребностью, применением чистых фракционированных заполнителей, обеспечивающих оптимальный зерновой состав их смеси и минимальный расход цемента, формование изделий из жёстких бетонных смесей или с водоредуцирующими добавками и др. Предельно допустимая капиллярная пористость бетона требуемой морозостойкости зависит от вида используемого цемента (рис.). Сульфатостойкий белитовый цемент с пониженным содержанием C_3S и C_3A при твердении создаёт тонкодисперсную структуру с повышенной релаксационной способностью, что позволяет получать требуемую морозостойкость бетона при большем объёме капиллярных пор. При одинаковой капиллярной пористости морозостойкость может изменяться в 2…3 раза – таково влияние структурных особенностей цементного камня, которые можно формировать введением активных минеральных и поверхностно-активных добавок, способствующих получению коллоидно-дисперсной структуры цементного камня.

Классическим и универсальным приёмом повышения морозостойкости бетона, широко применяемым на практике, является увеличение объёма резервной пористости за счёт воздухововлечения, впервые предложенное Т.К. Пауэрсом [7]. Оптимальное количество воздухововлекающих или

газообразующих добавок, создающих в бетоне равномерно-распределённые газонаполненные пузырьки диаметром 100…500 мкм, позволяет в 1,5…4,5 раза повысить морозостойкость бетона. Скорость деструктивного процесса при циклическом замораживании аэрированного бетона лимитируется временем заполнения резервных пор жидкой фазой.



Морозостойкость бетона в циклах

Капиллярная пористость тяжелого бетона различной морозостойкости по [6] 1, 2 – на сульфатостойком портландцементе, 3, 4 – на быстротвердеющем портландцементе, 1, 3 – воздушно-влажное твердение, 2, 4 – тепловлажностная обработка

Время заполнения резервных пор жидкой фазой велико и может исчисляться годами вследствие пониженной проницаемости гелевых пор, через которые резервные полости сообщаются с капиллярными порами или поверхностью бетона. Из экспериментальных данных О.В. Кунцевича следует, что обводнение условно замкнутых пор происходит только при замораживании цементного камня в воде под влиянием гидравлического давления. Очевидно, и в случае воздухововлечения тонкодисперсная гелевая структурная составляющая цементного камня будет снижать проницаемость, и следовательно, увеличивать время обводнения резервных пор, а также способствовать уменьшению концентрации напряжения при возникновении давления.

Таким образом, при обоих способах регулирования пористости (снижение В/Ц и воздухововлечение) важнейшим моментом в создании морозостойких структур цементного камня остаётся повышение объёма продуктов гидратации, степени дисперсности гидратных фаз и их стабильности при циклических воздействиях.

Библиографический список

1. Гергичны, З.С. Европейский опыт успешного использования в строительстве цементов с добавкой доменного шлака / З.С. Гергичны // ALITinform, международное аналитическое обозрение Цемент. Бетон. Сухие смеси. – 2013. – № 4–5. – С. 36–41.
2. Трофимов, Б.Я. Влияние количества шлака в цементе на морозостойкость тяжелого бетона / Б.Я. Трофимов, Л.Я. Крамар, К.В. Шулдяков // Строительные материалы. – 2013. – С. 96–101.
3. Шестопёров, С.В. Контроль качества бетона / С.В. Шестоперов. – М.:Высшая школа, 1981. – 247 с.
4. Сатарин, В.И. Шлакопортландцемент / В.И. Сатарин // Шестой межд. конгресс по химии цемента: сб. науч. тр. – М.:Стройиздат, 1976. – С. 45–56.
5. Тейлор, Х. Химия цемента / Х.Тейлор; пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 560 с.
6. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков, Л.П. Орентлихер, В.И. Савин и др. – М.:Стройиздат, 1970. – 144 с.
7. Powers, T.C. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete / T.C. Power // Proc. ACI – 1945. – № 41. – Pp. 245–272.

К содержанию

УДК 628.3

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИТОРЕМЕДИАЦИОННЫХ СООРУЖЕНИЙ В ОЧИСТКЕ СТОЧНЫХ ВОД

Д.В. Ульрих, М.Н. Брюхов

В работе изложена классификация фиторемедиационных сооружений с выявлением преимуществ и недостатков того или иного вида сооружения для очистки сточных вод. Обозначена роль макрофитов в очистке металлсодержащих сточных вод.

Ключевые слова: биоплато, сточные воды, инфильтрация, биоаккумуляция, микроэлементы.

Сооружения фиторемедиации – искусственные или природные заболоченные участки, ботанические площадки, фильтрационные устройства, пруды с посадками водных растений (биоплато) – используются в схемах очистки загрязненных вод и грунтов. В англоязычных странах такие сооружения имеют название Constructed Wetlands (искусственные болота) и нашли широкое применение для очистки бытовых, ливневых, шахтных, карьерных и других сточных вод.

Данные сооружения необходимы, так как на сегодняшний день катастрофически увеличивается количество различных водоемов, основных и малых рек, где качество воды оценивается как неудовлетворительное практически для всех видов пользования. Наибольший вред приносят реками природным водоемам различного рода стоки, так как в них попадают как отходы производств, так и недоочищенные, хлорированные стоки, из-за чего происходит эвтрофирование этих рек и водоемов. Такие бассейны практически становятся мертвыми. Проблема обработки стоков актуальна во многих местах, где на относительно малых площадях сконцентрировано большое количество требуемых очистки вод различного происхождения.

Использование традиционных технологий биологической очистки стоков является ограниченным из-за относительно высоких финансовых затрат на возведение сооружений и большого потребления энергии. Но применение естественного биологического способа очищения сточных вод позволяет получить качественно очищенную воду, а также имеет широкие возможности для удаления тяжелых металлов и таких биогенных элементов как азот и фосфор, небольшими капиталовложениями на строительство и эксплуатацию, а также маленькими концентрациями активного ила и другими преимуществами.

Такие инженерные конструкции как биоплато являются наиболее прогрессивными способами естественной биологической очистки стоков, которые широко используются в мире.

Биоплато – это созданная человеком система очистки стоков, которая напоминает биопруды (рис. 1, 2). Располагается она каскадом, и возводится с учетом химических и биологических способов очистки.

Если классифицировать биоплато с точки зрения инженерного проектирования, и при этом учитывать гидравлические распределения потоков воды то получим следующие категории: поверхностные, горизонтальные и вертикальные инфильтрационные, а также биоплато смешанного типа. Каждый вид имеет свои особенности и может очищать разные категории сточных вод.

Поверхностные биоплато – похожи на естественный «заболоченный ландшафт», когда сточные воды поступают на поверхность сооружения, с тем отличием, что это искусственное сооружение, имеющее системы управления, в результате чего достигается высокая эффективность очистки. К достоинствам сооружения следует отнести: низкие экономические затраты при строительстве, удобство в управлении и низкие энергетические затраты при эксплуатации.

У поверхностных биоплато есть такие преимущества: небольшие финансовые затраты на возведение очистителя; легкость в управлении и низкое энергопотребление.

Кислород в поверхностные биополя подается за счет диффузных процессов (через корневые системы растений). Но такой способ подачи кислорода не может в полной мере обеспечить им нужды биоплато. Кроме этого на качество очистки сточных вод влияет изменения климата. В летний период требуется проведение санитарных мероприятий по уничтожению комаров.

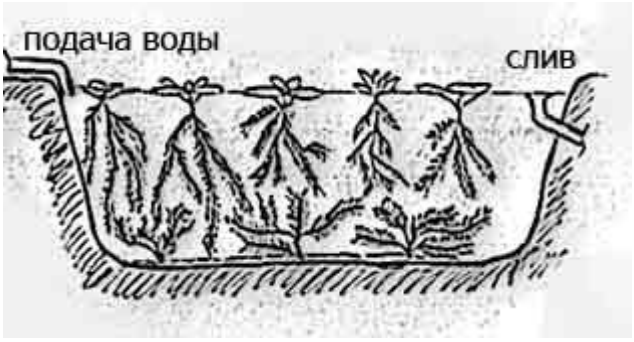


Рис. 1. Биоплато с *плавающими растениями*

Горизонтальные инфильтрационные биоплато – такое название биоплато связано с тем, что сточные воды в сооружение движутся через слои загрузки из одного конца к другому почти горизонтально. Сооружение состоит от одной или нескольких секций, в состав которых входят водонепроницаемое покрытие, слои загрузки и растения. По сравнению с поверхностными биоплато, в данных сооружениях достигаются большие гидравлические нагрузки и высокая эффективность очистки сточных вод по БПК, ХПК, взвешенным веществам, тяжелым металлам, а на территории очистных сооружений практически отсутствует неприятный запах и наличие насекомых. Горизонтальные инфильтрационные биоплато особенно широко применяются в США, Японии, Австралии и Европе. Недостаток данного типа сооружений состоит лишь в том, что способность удаления азота несколько ниже, чем у биоплато вертикального типа.

Преимущества горизонтальных инфильтрационных биоплато: в них создаются высокие гидравлические нагрузки; большая эффективность очистки сточных вод по БПК и ХПК, взвешенным веществам, а также тяжелым металлам; отсутствие неприятного запаха на территории биоплато; отсутствие насекомых.

В вертикальных инфильтрационных биоплато сточные воды подают с поверхности биоплато на дно вертикально, а кислород в систему поступает за счет диффузии воздуха из атмосферы и через корневые органы растений. Процессы нитрификации в сооружениях данного типа биоплато происходят интенсивнее, чем в горизонтальных, именно поэтому возможна очистка сточных вод, содержащих азот в высоких концентрациях. Недостатками данного типа биоплато являются сложные системы управления процессом очистки, а также создание благоприятных условий для развития насекомых.

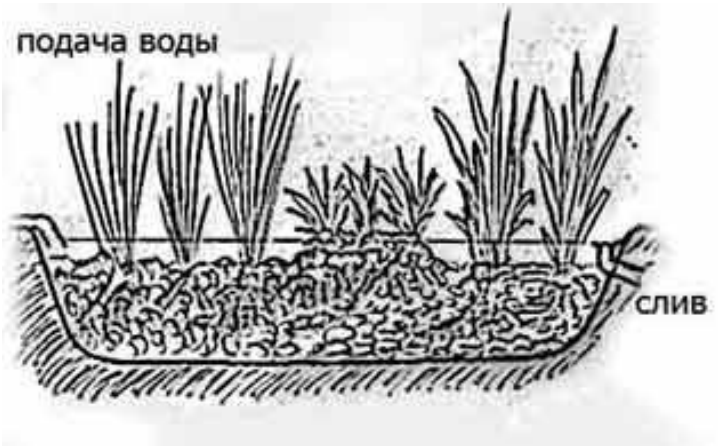


Рис. 2. Биоплато с засыпкой и водными растениями

Для достижения максимальной эффективности на практике часто комбинируют различные типы биоплато. При этом в одном сооружении комбинируются разные потоки сточных вод.

Совместными усилиями китайских и европейских ученых была разработана смешанная система, в которой стоки сначала поступают сверху вниз, а затем движутся снизу наверх. Такие сооружения применяются в южных регионах Китая.

А на севере этой страны популярным является другой вид смешанного биоплато, в котором сочетаются горизонтальные и вертикальные направления движения сточных вод, за счет чего повышается эффективность очистки.

Основной составляющей всех биоплато являются водные растения (макрофиты). Высшая водная растительность играет важную роль в биотическом балансе, процессах формирования качества воды и биологического режима водохранилища. Макрофиты изменяют физико-химические параметры среды в процессе фотосинтеза, поглощают и выделяют биогенные элементы и растворенные органические вещества из воды, выносят их из донных отложений в водную толщу, концентрируют микроэлементы в тканях и клетках [1, 2]. Результаты определения микроэлементного состава водных растений целесообразно использовать для обнаружения как начальных этапов поступления загрязнителей в водоемы, так и длительных систематических антропогенных воздействий.

Водная растительность извлекает химические элементы, как из донных отложений, так и водной толщи. Причем макрофиты способны извлекать и накапливать металлы, не только растворенные в воде, но и присутствующие во взвешенно-коллоидном материале водной массы и на поверхности листьев. В ряде работ было отмечено, что погруженные растения накапливают большие количества микроэлементов, нежели полупогруженные [3].

Процесс биоаккумуляции металлов водорослями достаточно сложен и специфичен: наряду с накоплением клетки способы выделять накопленные токсичные металлы в виде метаболитов или связывать металлы в комплексы.

Библиографический список

1. Бурдин, К.С. Тяжелые металлы в водных растениях (аккумуляция и токсичность) / К.С. Бурдин, Е.Ю. Золотухина. – М.: Диалог-МГУ, 1998. – 202 с.

2. Куриленко, В.В. Основы экогеологии, биоиндикации и биотестирования водных экосистем / В.В. Куриленко, О.В. Зайцева, Е.А. Новикова и др.; под ред. В.В. Куриленко. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 448 с.

3. Янин, Е.П. Техногенные речные илы в зоне влияния промышленного города / Е.П. Янин. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 100 с.

К содержанию

УДК 628.3 + 628.16.067

РОЛЬ СОРБЦИОННО-ФИЛЬТРУЮЩИХ СООРУЖЕНИЙ В ОЧИСТКЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА

Д.В. Ульрих, Г.О. Жбанков

Рассмотрены вопросы влияния поверхностных сточных вод на водные объекты. Изучены характеристики некоторых природных сорбентов для сорбционной очистки металлсодержащих поверхностных стоков.

Ключевые слова: тяжелые металлы, площадь водосбора, сорбция, природные сорбенты, осадочные опал-кристобалитовые породы.

По оценке специалистов Росгидромета, в настоящее время основная масса загрязняющих веществ поступает в поверхностные воды от рассредоточенных источников, транспорта и лесосплава. Для крупных городов с населением более 1 млн жителей поступление загрязняющих веществ с поверхностным стоком с их территорий составляет до 50 % общего загрязнения. Ежегодно в стране происходит более 30 тыс. прорывов нефте- и газопроводов. Это приводит к загрязнению огромных площадей водосбора и хроническому загрязнению водных объектов.

Источниками тяжелых металлов являются горно-перерабатывающая, машиностроительная, металлургическая, металлообрабатывающая и другие виды промышленности.

Сточные воды химических и других предприятий содержат значительное количество сложных органических веществ, ранее не существовавших в природе. Особенно распространены детергенты (СПАВ), они входят в состав моющих, чистящих средств, их применяют при производстве полимеров, пестицидов, обогащении руд. Они содержат в своем составе фосфор, азот – питательные вещества для растительных организмов. Поступление их в водные объекты приводит интенсивному росту фитопланктона, «цветению», истощению кислорода.

Основными глобальными функциями почв в отношении гидросферы являются трансформация поверхностных вод в грунтовые; участие в формировании биопродуктивности водоема посредством привнесения почвенных соединений; выполнение роли сорбционного барьера, защищающего акватории от загрязнения. Определение содержания органических экотоксикантов фиксирует состояние почвы.

Многие тяжелые металлы образуют с органическими веществами довольно стабильные комплексы. Эти комплексы входят в механизм миграции этих элементов в прудах. Почти все хелатные комплексы тяжелых металлов устойчивы в растворе. Также, комплексы почвенных кислот с солями разных металлов (молибден, медь, уран, алюминий, железо, титан, ванадий) имеют хорошую растворимость в нейтральной, слабощелочной и слабокислой среды. Это факт очень важен, потому что такие комплексы могут продвигаться в растворенном состоянии на большие расстояния. Самые подверженные водные ресурсы – это маломинерализованные и поверхностные водоёмы, где не происходит образование других таких комплексов. Для понимания факторов, которые регулируют уровень химического элемента в реках и озерах, их химическую реакционную способность, биологическую доступность и токсичность, необходимо знать не только валовое содержание, но и долю свободных и связанных форм металла.

В результате миграции тяжелых металлов в металлокомплексы в растворе могут произойти следующие последствия: во первых, увеличивается кумуляция ионов химического элемента за счёт перехода этих из донных отложений в природные растворы; во вторых, возникает возможность изменения мембранной проницаемости полученных комплексов в отличие от обычных ионов; также, токсичность элемента в комплексной форме может отличаться от обычной ионной формы.

Наиболее опасные загрязнители водоемов – растворенные в воде металлы – свинец, ртуть, кадмий и прочие.

Для решения проблем по защите водных объектов от стока с техногенных территорий, чаще всего применяют реагентные методы очистки: обработка известковым молоком; обработка гидросульфатом натрия (по сульфидной технологии) [1], цементация. Однако все эти методы имеют ряд

недостатков: низкая степень очистки, проблематичность переработки полученных осадков, для нейтрализации сероводорода (сульфидная технология) – сложное оборудование.

Одним из наиболее рациональных методов глубокой очистки поверхностного стока от ионов металлов может быть сорбционный метод. При этом сорбенты должны отвечать следующим требованиям: эффективно сорбировать металлы в кислой или слабокислой среде, характерной для стоков горных выработок, иметь хорошие фильтрационные характеристики и быть достаточно дешёвыми.

Сорбция – процесс обратимый, то есть адсорбированное вещество может переходить с сорбента обратно в раствор. В первые моменты сорбции, то есть при максимальной концентрации вещества в растворе, скорость сорбции также максимальна. По мере увеличения числа сорбированных молекул увеличивается и число молекул, переходящих обратно в раствор, начиная с момента, когда число сорбированных молекул становиться равным количеству молекул, переходящих в раствор, концентрация раствора становиться постоянной – или равновесной.

В настоящее время все большее внимание уделяется природным сорбентам, практически неограниченные запасы которых, их дешевизна, повсеместное нахождение, довольно высокие адсорбционные свойства делают экономически целесообразным использование их в процессах очистки воды.

Природные сорбенты – это горные породы и минералы, обладающие высокими адсорбционными и (или) ионнообменными свойствами. К ним относятся природные цеолиты, глины, диатомиты, опоки и другие. По характеру проявления сорбционных свойств и строению природные сорбенты делятся на 2 большие группы: кристаллические и аморфные. К кристаллическим сорбентам, прежде всего, относятся природные цеолиты – группа минералов, представляющих собой по составу водные алюмосиликаты щелочных и щелочноземельных металлов. Их кристаллическая решетка построена кремнекислородными тетраэдрами, объединенными вершинами в общий каркас, пронизанный полостями и каналами. В последних находятся молекулы воды и обменные катионы. Для цеолитов характерны высокая молекулярная адсорбция и катионный обмен. В настоящее время выделено более 30 минеральных видов природных цеолитов.

Для решения проблемы по очистке техногенно нагруженных поверхностных стоков достаточно эффективным методом может стать сорбционный метод с использованием сорбционно-фильтрующего устройства из дешевого сорбционного материала природного происхождения или сорбционно-фильтрующей площадки с горизонтальной или вертикальной подачей стока.

Для рекомендаций того или иного сорбента в качестве сорбционно-фильтрующего материала необходимо знать сорбционные характеристики сорбента, в частности: оптимальную величину pH сорбции металлов; сорбционную емкость сорбента в статических и динамических условиях; оптимальный фракционный состав сорбента; его фильтрационные свойства; возможности регенерации сорбента.

В настоящее время в качестве сорбентов природного происхождения нашли циолиты, опоки и такие сорбенты как глауконит. Цеолиты обладают наибольшей адсорбционной способностью, так как относятся к микропористым адсорбентам (размеры пор 0,3–0,6 нм). В свою очередь, микропористость зависит от структуры и геометрии кристаллической решетки цеолита. Наибольший объем микропор составляет более 40 %. Клиноптилолит [2] характеризуется несколько меньшим их объемом – 30–40 %, а катионообменная способность его может достигать 80–90 мг-экв/100 г.

К группе аморфных природных сорбентов относятся силикатные сорбенты опалового типа, представляющие собой осадочные опал-кристобалитовые породы. Одним из самых распространенных видов их являются опоки – микропористые породы, сложенные аморфным кремнеземом (опалом) с примесью глинистого вещества, скелетных частей организмов, минеральных зерен (кварца, полевых шпатов, глауконита). Содержание SiO_2 составляет 92–98 %. В опоках месторождений Свердловской области содержится 71,9–89 % SiO_2. Сорбционная способность опок обусловлена преобладающим присутствием аморфного кремнезема с гидратированной поверхностью. Для этого типа сорбентов характерна, в основном, поверхностная сорбция. Однако благодаря значительной удельной поверхности (50–63 $м^2$/г для фракций 2–6 мм) сорбционная емкость опоки может быть значительной, сопоставимой с таковой у активированных углей. Сорбционная емкость опоки по истинно растворенным компонентам может достигать 0,1–0,5 мг-экв/г сорбента. Также слой сорбента может поглощать коллоиды и взвеси до величины 0,1–1,7 г/г сорбента.

В настоящее время природные сорбенты – цеолиты и опоки – находят широкое применение во многих отраслях хозяйственного комплекса, а также в области охраны окружающей среды [3]. Использование их для очистки поверхностного стока с техногенных территорий обусловлено следующим: они обладают химической стойкостью и механической прочностью, удовлетворяют требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам; значительной пористостью; высокой грязеемкостью, обеспечивая очистку не только от взвешенных частиц, но и от коллоидных веществ минерального и органического происхождения; высокой емкостью по отношению к аммонийному азоту и ряду ионов тяжелых металлов, таких как свинец, цинк, медь; не требуют дополнительной обработки и имеют низкую стоимость (20–30 раз) в отличие от искусственных сорбентов.

Библиографический список

1. Павличенко Г.А., Рогов Б.М., Пирмагомедов Д.А. Возможности геотехнологий в переработке медьсодержащих окисленных руд // Цветные металлы. – 1992. №4 – С. 17-20.

2. Reid-Soukup D. A., Ulery A. L. Smectites. In: Dixon J. B., Schulze D. G. (Ed.) Soil Mineralogy with Enviromental Application. Madison, Wicconsin, USA, 2002, p. 467—499.

3. Цицишвили Г.В. Адсорбционные, хроматографические и спектральные свойства высококремноземных молекулярных сит. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – 46 с.

К содержанию

УДК 624.07:534

ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ФЕРМЫ С УЧЁТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ И КОНСТРУКТИВНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРИ ЗАПРОЕКТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Е.М. Уфимцев

Показано приложение метода временного анализа к задачам динамщики стержневых систем с учётом упругопластической работы материала. Приведены примеры динамического расчёта плоской 3-х-стержневой ферменной конструкции как физически и конструктивно нелинейной системы при действии синусоидального импульса.

Ключевые слова: временной анализ, метод, математическая модель, билинейная диаграмма, перемещения, нелинейная восстанавливающая сила, физическая нелинейность, конструктивная нелинейность, гистерезис.

Введение. Современные конструкции работают в условиях сверхнормативных нагружений, обусловленных различными запроектными воздействиями (импульс, удар, взрыв), в результате чего напряжения в сечениях несущих элементов нередко превышают предел упругости. В связи с этим, одной из актуальных проблем расчёта конструкций, является проблема учёта работы материала с учётом его пластических свойств. Экспериментальные исследования в этом направлении показывают, что поведение материалов в этом случае может быть довольно сложным [1] и связано с накоплением необратимых остаточных деформаций. В несущих элементах конструкций могут протекать процессы нелинейного деформирования, имеющего гистерезисный характер. При этом форма и размеры петель будут зависеть от величин и знаков пластических деформаций, которые, в свою очередь, определяются конструктивной схемой сооружения, физико-механическими свойствами материала и нагрузкой.

На сегодняшний день разработаны и внедрены в практику вычислительные методы, позволяющие проводить расчёты в такой постановке [2, 3], однако большинство из них построено на численных подходах. С одной стороны, это делает возможным решение широкого спектра задач, а с другой – остаётся открытым вопрос адекватности результатов расчётов и оценки действительного состояния конструкций. Развитие же аналитических подходов, о важности которых отмечено в работе [4], позволило бы строго оценивать точность полученного решения. Одним из таких подходов является метод временного анализа, основанный на исследовании характеристического матричного квадратного уравнения [5].

В данной статье рассматривается проблема расчёта конструкций указанным методом с учётом упругопластической работы материала при действии динамических нагрузок. Приводятся примеры расчёта статически нагруженной плоской стальной фермы как системы с физической и конструктивной нелинейностью при действии импульсной нагрузки.

Математическая модель упругопластического расчёта. Уравнение движения дискретной диссипативной системы (*ДДС*) и начальные условия имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} M\ddot{Y}(t) + CY(t) + R(t) = Q + P(t), \\ Y(t_0) = Y_0,\ \dot{Y}(t_0) = \dot{Y}_0, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где M = diag (m_1, ... , m_n), $C = C^{\mathrm{T}}$ – матрицы масс и демпфирования; $Y(t)$, $R(t)$ – векторы перемещений и динамических восстанавливающих сил (*ДВС*); Q, $P(t)$ – векторы статической (собственный вес) и динамической нагрузок.

Для системы с физической нелинейностью вектор ДВС состоит из следующих слагаемых (рис. 1):

– для упругой системы (участок диаграммы *OA*):

$$R(t) = KY(t),$$

– для упругопластической системы (участки *AB, BC*):

$$R(t) = R_{ke}(t) + R_u(t_j) - R_p(t_j). \quad (2)$$

Составляющая $R_{ke}(t) = K_j \cdot Y(t)$ – вектор квазиупругих усилий, где K_j – матрица жёсткости системы в момент t_j (точка A на диаграмме), t_j – время перехода квазиупругой

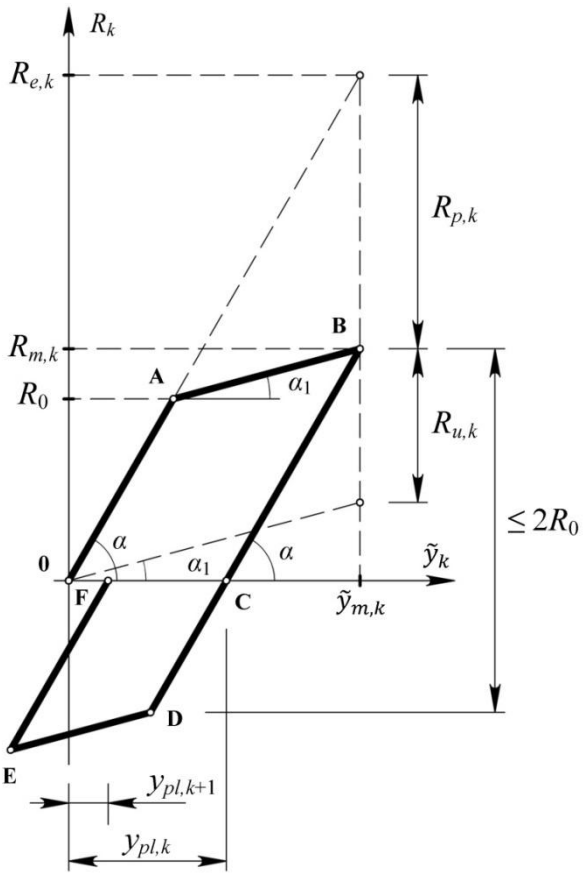


Рис. 1. Билинейная диаграмма жёсткости системы

системы из одного промежуточного состояния в другое (начало текучести в некотором несущем элементе). Здесь $\mathrm{tg}\alpha$, $\mathrm{tg}\alpha_1$ – жёсткости некоторого несущего элемента, соответственно, на участках *OA* и *AB*.

Составляющая $R_u(t_j) = \Delta K_j \cdot Y(t_j)$ – есть вектор предельных значений (на рис. 1 приведена *k*-я компонента этого вектора), где $\Delta K_j = K_{j-1} - K_j$ – разность матриц жёсткости, соответствующих предыдущему (участок *OA*) и текущему (участок *AB*) состояниям системы.

Составляющая $R_p(t_j) = K_j \cdot Y_{pl}(t_j)$ – суть вектор остаточных усилий. При достижении экстремальных деформаций (в момент времени t_j) в несущем элементе начинается разгрузка (участок *BC*). В результате этого он приобретает необратимые остаточные напряжения и деформации, что в координатах $R \sim \tilde{y}$ выражается векторами $R_p(t_j)$ и $Y_{pl}(t_j)$, постоянными на интервале $[t_j, t_{j+1}]$, где $Y_{pl}(t_j)$ – вектор пластических перемещений.

На участках 2-го полуцикла диаграммы компоненты ДВС вычисляются согласно (2) с учётом накопленных остаточных перемещений:

– участок *CD:*

$$R(t) = K_j \cdot [Y(t) - Y_{pl,k}],$$

– участок *DE:*

$$R_u(t_j) = K_j \cdot [Y(t) - Y_{pl,k}] + \Delta K_j \cdot [Y(t_j) - Y_{pl,k}],$$

– участок *EF:*

$$R(t) = K_j \cdot [Y(t) - Y_{pl,k+1}].$$

Согласно (2), система (1) на квазиупругом интервале $[t_j, t_{j+1}]$ имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} M_j \ddot{Y}(t) + C_j Y(t) + K_j Y(t) = P(t) + Q - R_u(t_j) + R_p(t_j), \\ Y(t_j) = Y_0,\ \dot{Y}(t_j) = \dot{Y}_0. \end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

На этом же интервале характеристическое матричное квадратное уравнение (для однородного ОДУ в (3)) представляется в следующем виде: $M_j S^2 + C_j S + K_j = 0$.

Матричные корни S_k $(k = 1, 2)$ этого уравнения позволяют построить фундаментальные решения для однородной задачи с помощью фундаментальной матрицы $\Phi(t) = \mathrm{e}^{St}$. Система разрешающих уравнений динамической задачи (3) для случая действия синусоидального импульса $P(t) = P_0 \cdot \sin(\theta t)$ $(t \in [t_j, t_{j+1}])$ имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} Y(t) = 2\mathrm{Re}\,\{Z(t)\},\ \dot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\,\{S_j \cdot Z(t)\}, \\ \ddot{Y}(t) = 2\mathrm{Re}\,\{S_j^2 \cdot Z(t)\} + M_j^{-1}[Q + P(t) - R_u(t_j) + R_p(t_j)], \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где:

$$\left.\begin{aligned} Z(t) = Z_0(t-t_j) + Z^{QR}(t-t_j) + Z^P(t-t_j), \\ Z_0(t-t_j) = \Phi(t-t_j) U_j^{-1} M_j [-\bar{S}_j Y_0 + \dot{Y}_0], \\ Z^{QR}(t-t_j) = [\Phi(t-t_j) - E](U_j S_j)^{-1}[Q - R_u(t_j) + R_p(t_j)], \\ Z^P(t-t_j) = \{S[\Phi(t-t_j)\sin(\theta t_j) - \sin(\theta t)] + \\ \quad + [\Phi(t-t_j)\cos(\theta t_j) - \cos(\theta t)]\theta\}[U_j (S_j^2 + E\theta^2)]^{-1} P_0. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Здесь: $U_j = M_j S_j + S_j^{\mathrm{T}} M_j + C_j$; Q – вектор статической нагрузки от собственного веса конструкции; P_0 – вектор амплитуд импульсной нагрузки; $\theta = \pi / t_a$; t_a – длина импульса.

Соотношения (4) представляют собой кинематические параметры реакции упругопластической системы (перемещения, скорости и ускорения), с помощью которых можно получить силовые параметры реакции (векторы восстанавливающих (2), диссипативных и инерционных сил):

$$F(t) = C_j \dot{Y}(t),\ I(t) = -M_j \ddot{Y}(t). \qquad (6)$$

Появление нелинейных составляющих вектора восстанавливающих сил (2) в выражении вектора ускорений в (4) связано с тем, что в квазиупругих состояниях системы эти составляющие входят в выражение правой части уравнения (3).

По характеру кинематических параметров реакции (4) вектор-функции перемещений и скоростей – непрерывны, что обеспечивается постановкой начальных условий Y_0, $\dot{Y}_0$ на границах квазиупругих интервалов. Для вектор-функции ускорений в силу дискретного изменения величин S, R_u и R_p величина $\ddot{Y}(t)$ во временных точках $t_j, t_{j+1}, \ldots$ будет иметь разрывы.

Непрерывность силового параметра $R(t)$ для физически нелинейной задачи обеспечивается принятой математической моделью (2); для случая конструктивно нелинейной задачи $R(t)$ будет иметь разрывы, связанные с внезапным изменением жесткостных параметров системы вследствие выключения несущего элемента в момент времени t_j. Другие два силовых параметра (диссипативные $F(t)$ и инерционные $I(t)$ силы) представляют собой разрывные функции в точках перехода квазиупругой системы из одного состояния в другое (6). В работе [6] получены аналитические выражения скачков для параметров реакции $\ddot{Y}(t), F(t), I(t)$, которые зависят от жесткостных, демпфирующих и инерционных характеристик системы.

Пример. В качестве примера рассмотрена задача колебаний плоской ферменной конструкции как системы с двумя степенями свободы (рис. 2). Элементы системы имеют квадратные поперечные сечение со сторонами: *1*–2,6 см, *2*–1,0 см, *3*–2,5 см – и выполнены из стали 09Г2 с начальным модулем упругости E = 210060 МПа. Узловая масса m = 10 т. Векторы перемещений и статической нагрузки, а также матрица масс имеют вид:

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix},\ Q = \begin{bmatrix} 0 \\ mg \end{bmatrix},\ M = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}.$$

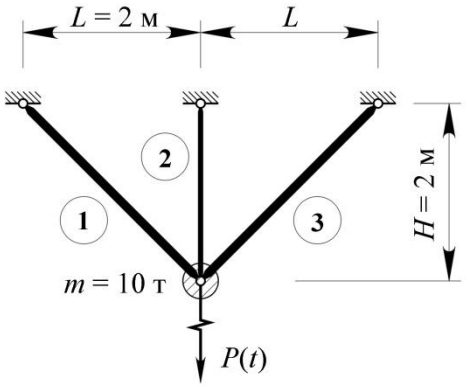


Рис. 2. Расчётная динамическая модель ферменной конструкции

Элементы матриц жёсткости K_j и демпфирования C_j вычисляются в процессе временного анализа. Матрица C_j строится по модели непропорционального демпфирования [5].

Решение задачи проводилось в 2-х вариантах: без учёта и с учётом потери устойчивости центрального стержня при его упругопластическом деформировании.

Вектор амплитуд внешней нагрузки для 1-го варианта составляет – $P_0 = [0, 425]^T$ кН; для 2-го – $P_0 = [0, 250]^T$ кН. Продолжительность импульсов в обоих вариантах – $t_a = 0{,}01$ с.

Анализ результатов. При рассмотрении 1-го варианта задачи на стадии нелинейной работы система находится в состоянии циклического упругопластического деформирования 2-го стержня. За наступившими пластическими деформациями следует разгрузка. Этот процесс имеет гистерезисный характер (рис. 3). Согласно представленной математической модели расчёта (2), характерные точки диаграммы находятся в соответствии с временными точками t_j, разделяющими процесс упругопластической реакции системы на квазиупругие интервалы. По окончании нелинейного процесса система переходит в стадию упругого деформирования с учётом накопленных остаточных деформаций в центральном стержне.

При реализации разрешающих уравнений (4)–(6) положения характерных точек (рис. 3) находятся следующим образом. Точка *A* определяется из условия достижения нормальными напряжениями в стержне предела текучести σ_T, а положение точки *B* – из условия достижения в элементе экстремальных деформаций. Нахождение точки *D* связано с использованием принципа Мазинга [1], согласно которому переход к неупругому деформированию во втором полуцикле происходит после упругого деформирования на величину, равную двум пределам текучести. Расстояния между соответствующими точками в последующих гистерезисных петлях уменьшалось в среднем на 4 %. Положение точек *E*, *F*, … в этих петлях определялось аналогично предыдущим точкам.

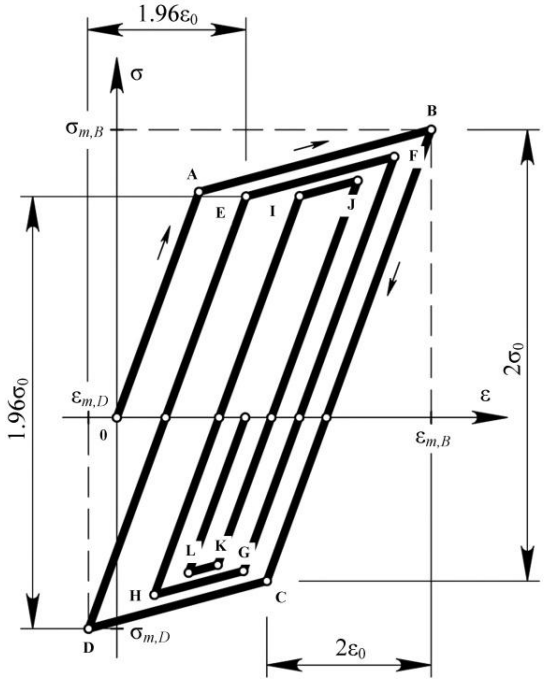


Рис. 3. Диаграмма циклического продольного деформирования материала стержня № 2

Во 2-м варианте задачи центральный стержень после упругопластического деформирования и разгрузки (1-й полуцикл диаграммы) выключился из работы вследствие потери устойчивости при критическом сжимающем напряжении σ_{cr} = 4,11 МПа. После этого работа системы происходила в упругой стадии без накопленных остаточных деформаций.

В табл. 1 приведены параметры собственных колебаний фермы для 3-х состояний: упругого (столбец 1) и упругопластического (столбец 2) и при выключении центрального стержня (столбец 3).

Таблица 1

Параметр собственных колебаний	Состояния системы		
	Упругое (начальное)	Упругопластическое	Упругое при выключении элемента
Частоты ω, $с^{-1}$	69,26 76.90	68,14 70,86	68,12 70,85
Коэффициенты демпфирования ε, $с^{-1}$	0,739 0,834	0.725 0,780	0.905 0,975

На рис. 4, *а*, *б*, для 2-х вариантов решения, показаны осциллограммы кинематических параметров реакции системы – горизонтальных и вертикальных перемещений массы *m*. Вертикальные перемещения совершаются относительно ненулевой асимптоты, высота которой меняется в моменты перехода системы в новое состояние, а для перемещений массы в горизонтальном направлении характерны те же эффекты, что и для вертикальных колебаний, но они выражены значительно слабее.

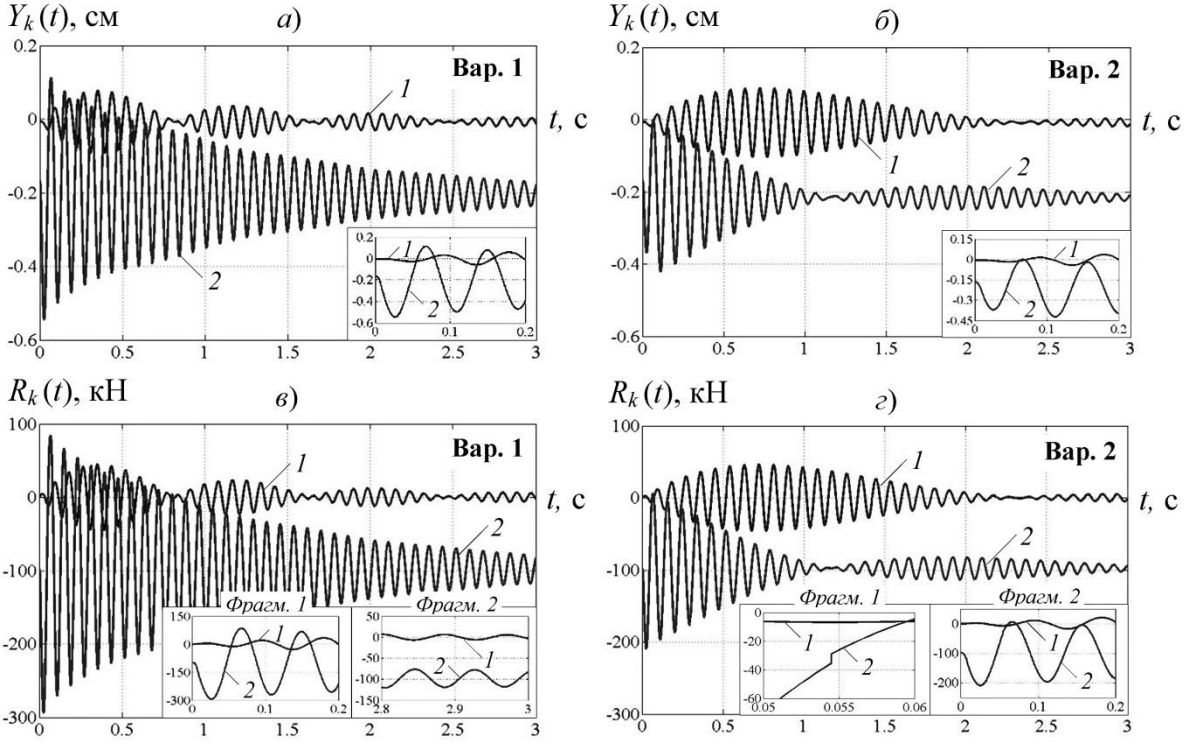


Рис. 4. Осциллограммы параметров реакции системы:
а), *б*) перемещения; *в*), *г*) восстанавливающие силы
(*1* – по горизонтали, *2* – по вертикали)

На рис. 4, *в*, *г* представлены осциллограммы силовых параметров реакции – восстанавливающих сил. Для 1-го варианта решения (*в*) графики непрерывны, а для 2-го (*г*) – на осциллограмме восстанавливающих сил в вертикальном направлении в момент выключения центрального стержня возникает разрыв (фрагм. 1). Вертикальная восстанавливающая сила, как следует из графика, имеет асимптоту, высота которой численно равна значению статического усилия *Q*.

На рис. 5 приведены осциллограммы нормальных напряжений в стержнях. Из графиков видно, что пластические деформации имеют место только в среднем стержне (рис. 2), о чём свидетельствуют пологие участки. В 1-м варианте решения на осциллограмме появляются 6 пологих участков, но явно заметны только три из них; во 2-м варианте – на графике появляется только один такой участок.

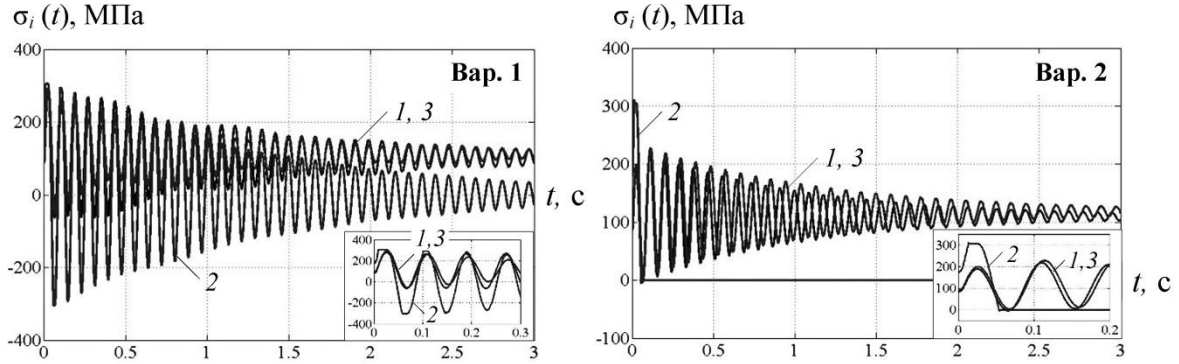


Рис. 5. Осциллограммы нормальных напряжений
в элементах стрежневой системы

Для проверки условия динамического равновесия системы полученное решение (4) было подставлено в левую часть уравнения (3). В результате обе части уравнения полностью совпадают между собой на всём интервале интегрирования. На рис. 6 показаны все вертикальные силы расчётной модели согласно (3), обеспечивающие её динамическое равновесие во временной области.

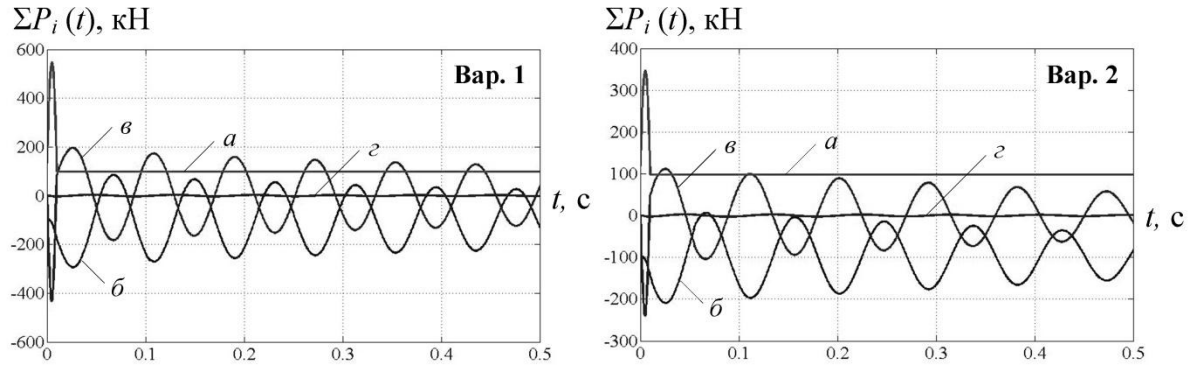


Рис. 6. Вертикальные силы уравнения движения (3):
а – внешняя нагрузка (*P*(*t*) и *Q*); *б* – восстанавливающая;
в – инерционная; *г* – диссипативная

Выводы. Представленный временной анализ позволяет получать в рамках принятых математических моделей точное решение задачи в аналитическом виде. Для динамической задачи в замкнутой форме построены кинематические и силовые параметры реакции системы с физической и конструктивной нелинейностью.

Библиографический список

1. Москвитин, В.В. Пластичность при переменных нагружениях / В.В. Москвитин – М.: Изд-во МГУ, 1965 – 264 с.

2. Трушин, С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи: Учеб. пособие / С.И. Трушин. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008. – 256 с.

3. Белостоцкий, А.М. Расчёты зданий на устойчивость против прогрессирующего обрушения с учётом физической и геометрической нелинейностей / А.М. Белостоцкий, А.А. Аул, О.А. Козырев, А.С. Павлов // Международная научно-практическая конференция «Теория и практика расчёта зданий, конструкций и элементов конструкций. Аналитические и численные методы». Сборник трудов. – М.: Изд-во МГСУ, 2008. – С. 183–193.

4. Еремеев, П.Г. Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях / П.Г. Еремеев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2006. – № 2. – С. 65–72.

5. Потапов, А.Н. Динамический анализ дискретных диссипативных систем при нестационарных воздействиях: монография / А.Н. Потапов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. – 167 с.

6. Потапов, А.Н. Анализ колебаний конструкций с выключающимися связями / А.Н. Потапов // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. – № 3. – С. 45–48.

К содержанию

УДК 696.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДОВ НА ВОДОСНАБЖЕНИЕ ЖИЛОГО ДОМА МЕТОДОМ АГЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Февралев

Разработана программа для имитационного моделирования неравномерности водоразбора жилым зданием, на основании которой получены данные по секундному расходу в течение суток. Произведен анализ и сравнение с результатами реальных экспериментов.

Ключевые слова: Имитационное моделирование, агентное моделирование, неравномерность водоразбора.

Введение

Использование методики агентного моделирования для определения расхода и имитации неравномерности водоразбора, является весьма интересным и новым подходом для решения данной задачи. Большинство исследовательских работ по этой проблематике направленно на определение максимального краткосрочного пика водозабора и вероятность его возникновения [2]. В данном же исследовании ставится цель определения распределения секундного расхода для любого жилого здания в любой момент времени.

Принципиально, неравномерность забора воды человеком можно рассмотреть в разрезе теории массового обслуживания, особенно применив различные методики имитационного моделирования, а агентный метод является одним из подвидов. Данный метод используется для исследования децентрализованных систем, динамика функционирования которых определяется не глобальными правилами и законами, а наоборот, когда эти глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей – получить представление об этих глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении её отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе. Агент – это некая сущность, обладающая активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, взаимодействовать с окружением, а также самостоятельно изменяться [3].

Для задания всех характеристик модели агента, используются статистические данные, взятые из открытых источников [4, 5, 6]. Исходные данные по потреблению берутся на основании американского исследования, этого вполне достаточно для первоначального описания модели и проверки зависимостей. На основании эксперимента весьма просто произвести подстройку модели к конкретному решению (любому жилому дому).

1. Предлагаемое решение. Описание модели

Алгоритм для данной модели можно разделить на три основных этапа:

Первый этап – это задание количества жильцов и их статуса на основании количества квартир [4]. Выделены основные следующие роли для человека (агента) – взрослый работающий, взрослый не работающий, малыш или школьник.

Во втором этапе производится планирование распорядка дня для каждого жильца время: начала и окончания сна, начала и окончания работы или школы. Считается, что рабочий или школьник уходят на работу или в школу, причем школьные занятия длятся меньше рабочих часов. Также считается, что малыш и неработающий всегда находятся дома. Также определяются дневные и недельные потребности в количестве водозаборов на основании [5]. Здесь можно остановится подробнее, разделяют личные потребности человека и общие потребности на квартиру. Считается, что основные потребности человека в воде следующие: поход в туалет, использование душа, принятие ванны, использование умывальника (мытье рук и прочее), говоря об общих (квартирных) потребностях, выделяют мытье посуды и стирку.

На третьем этапе посекундно моделируется день, если человек в настоящий момент находится дома, то определяется вероятность осуществления им водозабора. Каждую секунду определяется значение случайной переменной, имеющей равномерный закон распределения. Вероятность определяется, исходя из отношения суммарного времени необходимого на данную потребность, к количеству времени нахождения дома. Возможно было использовать более сложную программную конструкцию и использовать случайную переменную с нормальным распределением, но вспомнив теорему вероятностей, где X1, X2, X3… X_n – независимые случайные величины, имеющие один и тот же закон распределения с математическим ожиданием m_x и дисперсией σ_x^2, то при неограниченном увеличении N закон распределения суммы $\sum X_k$ неограниченно приближается к нормальному. Соответственно, используя стандартную переменную с равномерным распределением, в итоге вычисления стремятся к нормальному распределению, т.е. получаются достаточно верные значения [3].

2. Исходные данные. Описание взятых параметров

Для описания модели неравномерности водопотребления, можно укрупненно применить следующие вероятности и зависимости:

Первая часть, заключается в наполнении здания, вероятности определяем на основании [4]:

a. вероятность нахождения в квартире семейной пары или одного взрослого принято 74,5 %;

b. вероятность количества детей в каждой семье, принято: для 1 ребенка равно 21,5 %; 2 ребенка – 31,2 %; 3 ребенка – 12,9 %;

c. вероятность, что взрослый является работающим, принята 75 %;

d. вероятность, что ребенок является школьником, принята 70 %.

Вторая часть, определение водоразборов каждым человеком. На основании исследования [5], задаются следующими значениями:

a. использование туалета в день человеком – от 2 раз до 8 раз, при условии, что необходимо 7 литров на один спуск, 90 секунд набирается бачок;

b. принятие душа в неделю человеком – от 3 раз до 9 раз, при условии, что расход душем 10 литров в минуту, продолжительность принятия душа от 3 минут до 12 минут;

c. принятие ванны в неделю человеком – от 1 до 3 раз, при условии, что необходимо от 100 литров до 140 литров за один раз;

d. использование умывальника в день человеком – от 10 до 15 раз, при условии, что средний расход 1,2 литра в минуту, продолжительность использования от 1 до 2 минут за один раз;

e. использование посудомоечной машины (или ручное мытье посуды) в неделю одной квартирой – от 1 до 7 раз, при условии, что необходимо от 20 до 50 литров за один раз;

f. использования стиральной машины (или ручная стирка) в неделю одной квартирой – от 2 до 6 раз, при условии, что необходимо от 60 до 140 литров за один раз.

3. Результаты, получаемые с помощью модели

В итоге была разработана прикладная программа, которая реализует выше описанную модель. Результатом вычислений программы является txt-файл со значениями секундного суммарного расхода моделируемого здания на протяжении суток. Для создания программы использован язык программирования JavaScript, отличительной способностью является, возможность применения программы в среде Internet, что позволит результаты использовать в свободном массовом доступе. Ниже представлены получаемые данные.

Для сравнения на рисунках 1-2-5 изображены данные получаемые с помощью математической модели, на рисунках 3-4-6 результаты экспериментов. Из приведенных диаграмм видно, что данные полученные с помощью математической модели, отлично коррелируются с результатами реальных экспериментальных данных. Соответственно можно сделать вывод о практической применимости данного исследования.

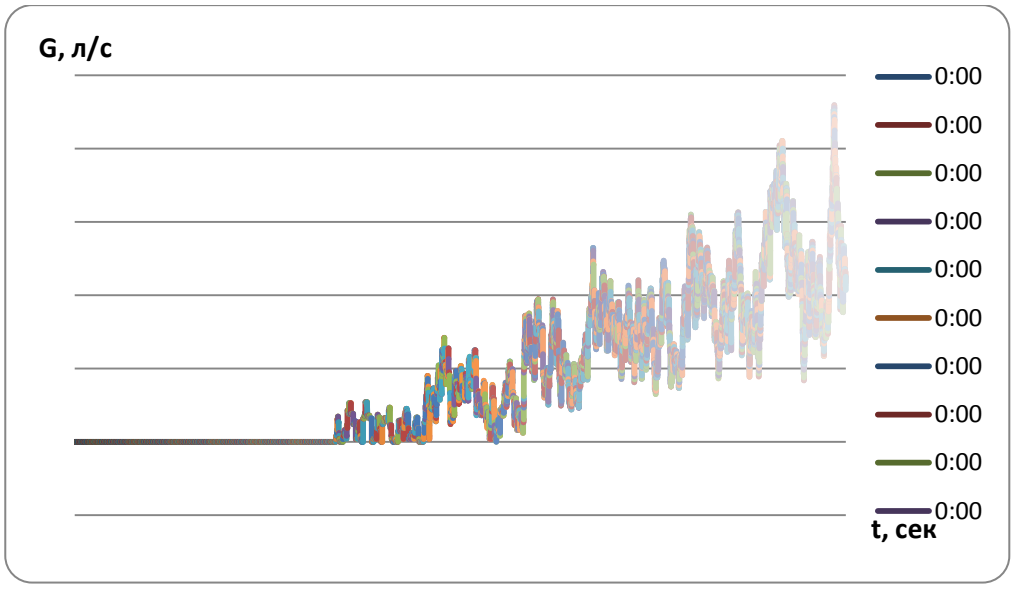


Рис. 1. Секундное потребление воды в будний день жилым зданием (данные полученные с помощью модели)

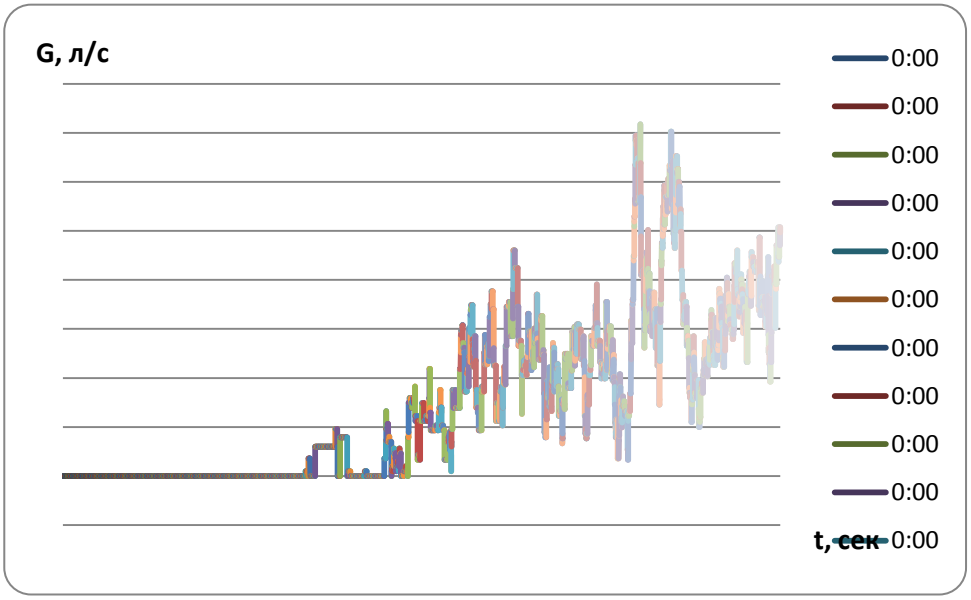


Рис. 2. Секундное потребление воды в выходной день жилым зданием (данные полученные с помощью модели)

Рис. 3. Секундное потребление воды в будний день жилым зданием, данные полученные на основании эксперимента [2]

Рис. 4. Секундное потребление воды в выходной день жилым зданием, данные полученные на основании эксперимента [2]

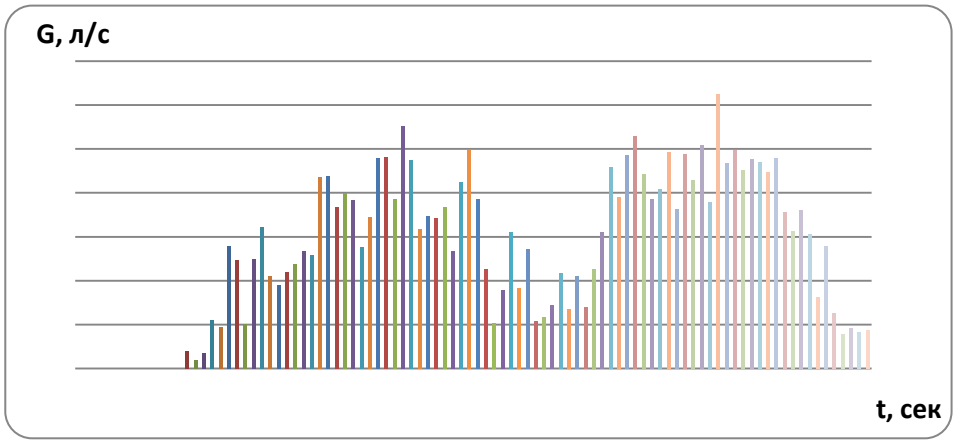


Рис. 5. Гистограмма среднего 15-минутного потребления воды в будний день жилым зданием (данные полученные с помощью модели)

Рис. 6. Гистограмма среднего 15-минутного потребления воды в будний день жилым зданием, данные полученные на основании эксперимента [2]

4. Возможности применения модели. Заключение

Использование метода агентного моделирования для описания и исследования неравномерности водоразбора является весьма необычным для решения подобной задачи. В большинстве других исследований, данная задача решалась наоборот, исследователи описывали итоговый (суммарный) расход зданием, отталкиваясь от вероятности работы того или иного прибора. В данном случае, основное внимание было уделено агентам, точнее людям, для которых задавались основными закономерностями, а конкретно время нахождения дома и основные потребности в жидкости. Описывая законы для частного, но большого количества агентов, в итоге мы получаем суммарный расход жилым зданием на протяжении суток, или месяца, или года.

Данная модель позволяет более полно описывать водоразбор зданием. Её легко можно использовать в более крупных моделях, рассматривающих жизнедеятельность дома или микрорайона в целом. Дополнительным плюсом данной модели является возможность определения ещё более точных характеристик, например, расход воды различными этажами, или расход горячей/холодной воды.

В любом случае, данные наработки можно использовать для решения конкретных прикладных задач современных систем жизнеобеспечения зданий.

В заключении, необходимо отметить, что описанная разработка, получена в ходе создания комплексной модели индивидуального теплового пункта [8]. Данная программа необходима для качественного формирования нагрузки на горячее водоснабжение жилого здания.

Библиографический список.

1. Чистяков, Н.Н. Повышение эффективности работы систем горячего водоснабжение / Н.Н. Чистяков, М.М. Грудзинский, В.И. Ливчак. – М.: Стройиздат, 1988. – 314 с.

2. Шафлик, В. Современные системы горячего водоснабжения / В. Шафлик. – К.: ДП ИПЦ «Такі справи», 2010. – 316 с.

3. Петухов, О.А. Моделирование системное, имитационное, аналитическое: учебное пособие / О.А. Петухов, Е.О. Морозов, Е.О. Петухова. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2008. – 288 с.

4. Социально-демографический портрет России: По итогам Всероссийской переписи населения 2010 года / Федер. служба гос. статистики. – М.: ИИЦ «Статистика России», 2012. – 183 с.

5. Shirley Gato, Forecasting Urban Residential Water Demand, 2006. – 298 с.

6. СНиП 2.04.01-85* «Внутренний водопровод и канализация зданий».

7. Февралев, А.А. Принципы формирования математической модели индивидуального теплового пункта. Проведение качественного анализа и сравнение схем ИТП / А.А. Февралев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Строительство и архитектура». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 96–99.

К содержанию

УДК 514.144.24 + 004.92

КОНСТРУКЦИЯ ДАНДЕЛЕНА ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНЫХ КВАДРИК ВРАЩЕНИЯ В AUTOCAD

А.Л. Хейфец, В.Н. Васильева

Предложен метод построения сфер Данделена для произвольных поверхностей вращения второго порядка, основанный на параметризации в пакете AutoCAD. Приведены примеры. Дана оценка точности определения точек фокуса и директрис предложенным методом. Показано, что погрешность находится в пределах 10^{-3}…10^{-8}. Сделан вывод о высокой эффективности параметризации как инструмента геометрического моделирования.

Ключевые слова: сферы Данделена; шары Данделена; конические сечения; коники; кривые второго порядка; квадрики; поверхности второго порядка; директриса; параметризация; AutoCAD.

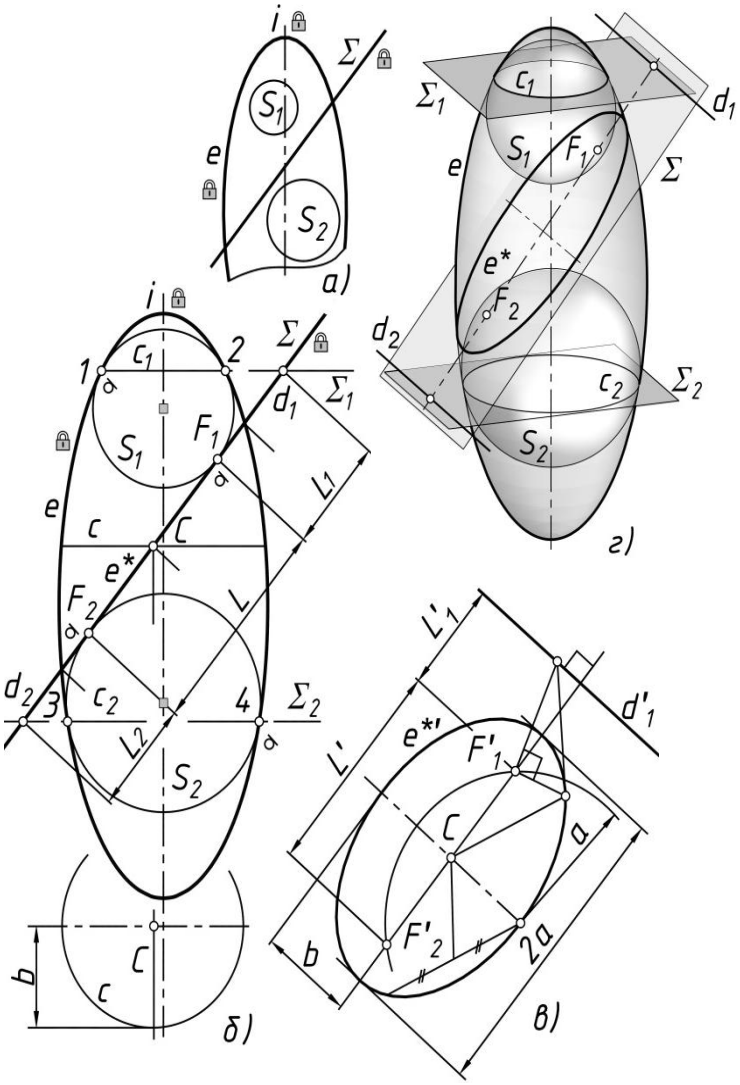


Рис. 1. Сферы Данделена для эллипсоида

При изучении сечений кругового конуса (коник) и цилиндра используют [1, 2] теорему Ж. Данделена о том, что сферы, вписанные в конус, пересеченный плоскостью, в точках касания с плоскостью определяют фокусы конических сечений. Конструкция Данделена, наглядно демонстрирует в пространстве положение фокусов и директрис коник. О сферах Данделена для других поверхностей вращения второго порядка (далее произвольных квадрик вращения, ПКВ) найдено упоминание лишь в работе М. Шаля [3]. Доказательное рассуждение существования сфер Данделена для ПКВ найдено в работе [4].

Цель работы – показать возможность построения сфер Данделена для ПКВ средствами параметризации AutoCAD.

Квадрики получали как тела вращения коник. Коники (гиперболу и параболу) получали как сечения кругового конуса, эллипс является «штатным» примитивом пакета.

Учитывая, что задача Данделена планиметрическая, построения выполняли в плоскости симметрии квадрик, где они представляются своими сечениями – гиперболой, параболой, эллипсом, сферы Данделена – окружностями S_1 и S_2, секущая плоскость – отрезком Σ.

Сложность построения сфер Данделена для ПКВ заключается в реализации касания окружности и очерковой коники. Технология параметризации позволяет решить эту задачу присвоением геометрических зависимостей, отвечающих свойствам коник и условиям касания [5, 6]. Под воздействием этих зависимостей окружность автоматически приводится в положение касания конике и секущей плоскости.

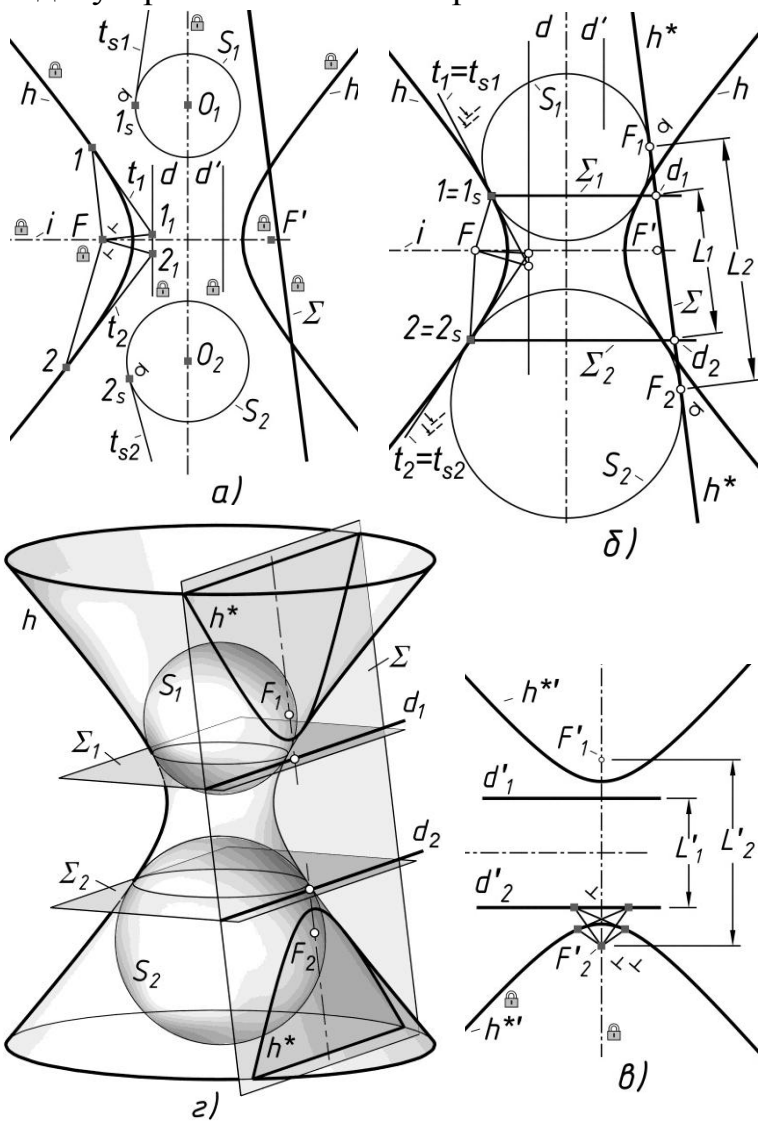


Рис. 2. Сферы Данделена для однополостного гиперболоида, рассеченного по гиперболе

Построение сфер Данделена S_1 и S_2 для эллипсоида вращения e, рассеченного плоскостью Σ (рис. 1) является наиболее простым примером, т.к. для эллипса распространяется геометрическая зависимость касания.

Вычерчиваем очерковый эллипс e, его ось вращения i и отрезок Σ (рис. 1, *а*), накладывая на них зависимость фиксации. На произвольно вычерченные окружности S_1 и S_2 налагаем геометрические зависимости (рис. 1, *б*): совпадение их центров с осью эллипсоида; касание окружностей S_1 и S_2 очеркового эллипса e и отрезка секущей плоскости Σ. Под действием зависимостей окружности автоматически занимают положение очерков сфер Данделена S_1, S_2.

Определяются фокальные точки сечения F_1 и F_2 и окружности c_1, c_2 касания сфер и эллипсоида. На пересечении плоскостей Σ_1, Σ_2 этих окружностей и Σ найдены точки d_1, d_2 как проекции директрис эллипса сечения e^*.

Для проверки точности решения строили «контрольный» эллипс $e^{*\prime}$ как истинный вид эллипса e^* сечения (рис. 1, *в*). Для него методами [1, 2] находили точки фокуса F'_1, F'_2 и одну из директрис d'_1. Простановкой размеров определили значения L, L_1, L_2 и сравнили их с соответствующими контрольными значениями L', L'_1. Погрешность не превысила до 10^{-8} (это соответствует предельной точности построений и измерений AutoCAD'а). Для наглядности простроена геометрически точная 3d модель (рис. 1, *г*).

В качестве второго примера рассмотрим построение сфер S_1, S_2 для однополостного гиперболоида, рассеченного по гиперболе h^*(рис. 2).

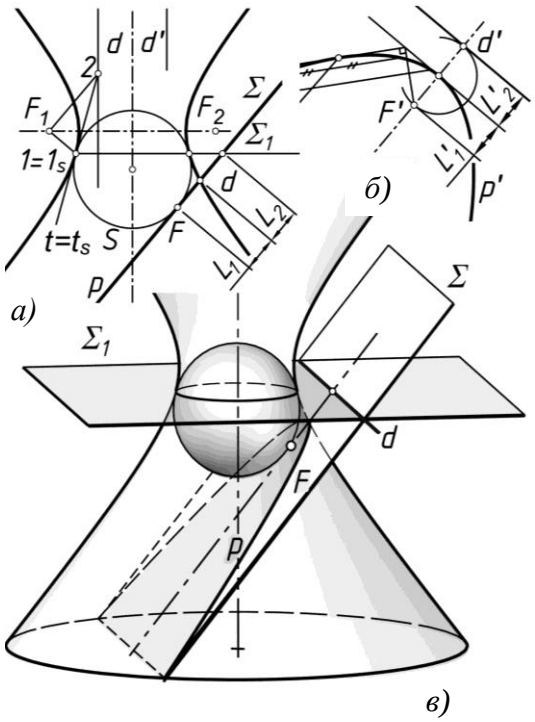


Рис. 3. Сфера Данделена для однополостного гиперболоида, рассеченного по параболе

Исходными данными является секущая плоскость Σ и очерковая гипербола h, которая строится как сечение кругового конуса. Оси гиперболы определяются при ее построении. Точки фокусов F, F' и директрисы d, d' гиперболы h находятся по методике [2, 5]. Фиксируем (рис. 2, *а*) положение ветвей гиперболы h, ее осей, директрис, маркеров точек фокусов и плоскость Σ. Вычерчиваем окружности S_1, S_2 в предварительном произвольном положении.

Геометрическая зависимость касания на гиперболу (параболу) не распространяется. Поэтому для построения окружности, касательной к гиперболе предложен алгоритм параметризации [5], приведенный для окружности S_1.

Задаем зависимость совпадения центра окружности с осью гиперболы. Строим отрезок t_{s1}, присваиваем ему зависимость касания к S_1 и совпадение с ней в конечной точке 1_s. После этого перемещение отрезка t_{s1} приводит к его скольжению вокруг S_1 с точкой касания 1_s и перемещению центра окружности по мнимой оси гиперболы.

Реализуем свойство коник [2]: «отрезок касательной от точки касания до директрисы виден под прямым углом». Строим треугольник (см. рис. 2, *а*) (F,1,1_1). Связываем его вершины зависимостью совпадения между собой и с объектами: в т. 1 с гиперболой h, в точке F с маркером точки фокуса, в точке 1_1 с директрисой d. Задаем зависимость перпендикулярности катетов в вершине F. При наложенных зависимостях отрезок t_1 становится касательным к гиперболе h и при перемещении скользит по гиперболе с точкой касания 1.

Чтобы S_1 стала очерком сферы Данделена, осталось задать геометрические зависимости (рис. 2, *б*): коллинеарность отрезков t_{s1} и t_1, совпадение точек 1 и 1_s, касание окружности S_1 и отрезка Σ.

Такие же построения выполняем и для второй сферы S_2.

В результате решения найдены точки F_1, F_2 и директрисы d_1, d_2 гиперболы сечения h^*. Для оценки точности решения строили (рис. 2, *в*) контрольную гиперболу $h^{*\prime}$ как сечение гиперболоида, определяли ее фокусы и директрисы [5]. Расхождение значений L_1, L_2 со значениями L'_1, L'_2 находится на уровне 10^{-4}. Снижение точности связано с тем, что очерковая и контрольная гиперболы являются сплайн-кривыми. Конструкция Данделена наглядно с высокой точностью воспроизведена на 3d модели (рис. 2, *г*).

На рис. 3 приведено построение сферы для однополостного гиперболоида, рассеченного по параболе.

По приведенному алгоритму параметризации конструкция Данделена была построена для всех ПКВ (параболоида, одно- и двуполостного гиперболоидов) и типов их сечений (эллипс, парабола, гипербола). Имея параметризированную геометрическую модель можно исследовать конструкцию Данделена. Так, перемещая и вращая отрезок Σ, можно наблюдать как окружности S_1, S_2 «подстраиваются к новым условиям», изменяясь в размере, но оставаясь касательными к ПКВ и Σ.

Полученные результаты показывают эффективность параметризации как инструментального средства современных графических пакетов САПР, его доступность для решения сложных инженерных прикладных задач.

Библиографический список

1. Четверухин, Н.Ф. Начертательная геометрия / Н.Ф. Четвертушин и др. – М.: «Высшая школа», 1963. – 420 с.

2. Пеклич, В.А. Начертательная геометрия / В.А. Пеклич. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 272 с.

3. Шаль, М. Исторический обзор происхождения и развития геометрических методов: Т. 2: Примечание IV. О способе построения фокусов и доказательства их свойств на косом конусе / М. Шаль. – М.: Моск. мат. о-во, 1883. – 748 с.

4. Нилов, Ф.К. Сферы Данделена. Лекция на Малом мехмате МГУ, 2011 г. / Ф.К. Нилов. – URL: http://www.geometry.ru/video.html.

5. Хейфец, А.Л. Алгоритмы моделирования коник в пакете AutoCAD / А.Л. Хейфец // Совершенствование подготовки учащихся и студентов в области графики, конструирования и стандартизации. Межвузовский научно-методический сборник. – Саратов. СГТУ, 2013. – С. 34–39.

6. Логиновский, А.Н. Решение задач на основе параметризации в пакете AutoCAD / А.Н. Логиновский, А.Л. Хейфец // Геометрия и графика. – М.: ИНФРА-М. – V. 1. I. 2. – С. 58–62.

К содержанию

УДК 514.18 + 76:72

ГРАФИКА ДЛЯ АБИТУРИЕНТОВ: АКТУАЛЬНО, НЕОБХОДИМО, ДОСТУПНО

Л.И. Хмарова, Ж.В. Путина, Т.В. Колобаева

В условиях бурного развития современного строительства возрастает потребность в квалифицированных специалистах, в компетенцию которых входит знание графического языка. Необходимость подготовительных курсов по черчению для абитуриентов, поступающих по направлению «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды» обусловлена отсутствием базовой графической подготовки школьников, вследствие чего возникают проблемы в процессе освоения университетских программ по графическим дисциплинам. Программа курсов подготовки абитуриентов к вступительному экзамену по черчению в ЮУрГУ совершенствуется в методическом и учебном направлениях. Это способствует повышению качества обучения, приобретению базовых знаний и умений для изучения графических курсов по программам обучающих кафедр «Графика» и «Архитектура».

Ключевые слова: архитектурная графика, абитуриент, базовая графическая подготовка, учебно-методический обучающий комплекс.

Графика (*graphikë*, греч.) – искусство черчения, письма и рисования, в котором преобладает линейная передача формы [1].

Архитектурная графика – совокупность изобразительных средств, служащих для выражения архитектурного замысла на различных стадиях архитектурного проектирования [1].

Инженерная графика – общеинженерная учебная дисциплина, дающая техническому специалисту необходимые знания для выполнения и чтения чертежей изделий.

Начертательная геометрия – раздел геометрии, который изучает методы построения изображений пространственных форм на плоскости и способы решения различных геометрических задач на этих изображениях.

Компьютерная графика (машинная графика) область деятельности, в которой компьютеры используются в качестве инструмента, как для синтеза (создания) изображений, так и для обработки визуальной информации, полученной из реального мира.

Все эти понятия, определения и смысловые трактовки отражают суть, назначение, цели и способы применения графических дисциплин в учебных курсах для формирования профессиональных компетенций бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 270100 «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды».

Архитектура – это не только творческая специальность, но и техническая. В комплекс профессиональных компетенций специалиста архитектора входит составление проектов и смет по заданным условиям, то есть изготовление чертежей и рисунков будущих сооружений и определение стоимости; руководство производством работ и практическим осуществлением проекта. В современном мире, и ранее, справедливы достаточно жёсткие требования к квалификации архитектора, которые указал ещё древнеримский архитектор Марк Витрувий Поллион в I веке до н.э.: «… Архитектор должен быть человеком грамотным, умелым рисовальщиком, изучить геометрию, всесторонне знать историю, внимательно слушать философов, быть знакомым с музыкой, иметь понятие о медицине, знать решения юристов и обладать сведениями в астрономии и в небесных законах …». Работа архитектора невозможна без чертежа. Чертёж – основной язык архитектора и владеть им архитектор должен также свободно, как родной речью. Эта бесспорная истина даёт основание считать вступительный экзамен по черчению одним из профилирующих для абитуриентов, поступающих на первый курс архитектурных направлений.

На кафедре «Архитектура» дисциплина «Основы архитектурного проектирования» преподаётся в течение первого и второго семестров по направлению подготовки 270100 – «Архитектура», степень бакалавр. Данный курс представляет собой начальную часть предмета «Архитектурное проектирование». Курс методически взаимосвязан с базовыми графическими дисциплинами: черчением и начертательной геометрией. В соответствии с утверждённой рабочей программой архитектурного факультета студенты в первом семестре выполняют шесть курсовых работ, для успешной сдачи и защиты которых необходимы знания по черчению и графическим дисциплинам [2]. В настоящее время в учебные программы средних школ, как правило, не входит черчение. На первом курсе университета студентам, обучающимся по программе архитектурных направлений, преподаётся только курс «начертательная геометрия». Поэтому в связи с высокими требованиями, которые предъявляются к профессии архитектора, на архитектурные специальности должны поступать только хорошо подготовленные абитуриенты, способные на бумаге отразить свои творческие замыслы, умеющие хорошо рисовать и грамотно чертить.

Традиционно в Российских высших учебных заведениях набор вступительных экзаменов на творческие специальности, к которым относятся архитектурные, определяется и утверждается руководством вузов. Анализ информации в интернете показал, что из 63 вузов России, в которых ежегодно идёт набор абитуриентов по направлению архитектура, вступительные экзамены по черчению проводятся в 57 вузах. В остальных проводится экзамен по архитектурной композиции, включающей основы черчения. Вступительный экзамен по черчению наряду с другими профилирующими

предметами выявляет уровень пространственного мышления и графические навыки будущих студентов. Цель экзамена: определить уровень подготовленности абитуриентов необходимый для успешного овладения сложнейшей программой обучения в многопрофильном ВУЗе, имеющем специфические черты художественного и технического учебного заведения.

В Южно-Уральском государственном университете при поступлении по направлениям подготовки «Архитектура» и «Дизайн архитектурной среды» необходимо сдать три творческих экзамена: рисунок гипсовой головы, композицию геометрических тел и черчение. Для успешной сдачи творческих экзаменов при открытии архитектурных специальностей в 1990 году на кафедре графики были организованы подготовительные курсы по рисунку и черчению. Приобретённые на курсах знания и опыт являются необходимой базой и условием, от которых в немалой степени зависит успех дальнейшей учебной деятельности, а следовательно, и профессионального мастерства в области архитектурной графики.

Экзамен по черчению на архитектурные направления позволяет выявить при отборе абитуриентов наиболее достойных для поступления; внести весомый вклад в решении задачи повышения качества графического образования будущих дипломированных специалистов-архитекторов, а следовательно, и качества окружающего нас жизненного пространства. Кроме того, как известно, чтобы стать квалифицированным специалистом в той или иной сфере человеческой деятельности, для успешного развития профессиональных компетенций необходимы соответствующие способности и призвание. Подготовительные курсы являются учебным и одновременно тестирующим процессом в данном выбранном направлении.

Экзаменационные задания по черчению разработаны специально для абитуриентов, поступающих на архитектурный факультет. На экзамене проверяются не только некоторые аспекты пространственного представления, но и умение владеть чертёжными инструментами, а также знания элементарных правил оформления чертежа. В процессе обучения на подготовительном отделении абитуриенты должны ознакомиться с основными положениями стандартов ЕСКД, приобрести практические навыки в пользовании чертёжными инструментами и принадлежностями, научиться построению сопряжений и наиболее часто встречающихся кривых линий, архитектурных обломов. Необходимо научиться выполнению ортогональных и аксонометрических проекций различных геометрических фигур и архитектурных стилизованных объектов, нанесению размеров на чертежах. Базируясь на теории начертательной геометрии, являющейся основой архитектурного проектирования, учебный графический курс подготовительного отделения ставит цели: формирование высокой графической культуры, развитие пространственного представления и логического мышления, точ-

ность и аккуратность графических построений. Учебный курс подготовительного отделения делится на два раздела: геометрическое черчение; теоретические и практические основы проекционного черчения. Организация проведения занятий предусматривает лекции и практические занятия, выполнение самостоятельных графических работ, решение задач по начертательной геометрии. При подготовке к экзамену проводятся контрольные и зачётные работы. Необходимая информация для абитуриентов подробно и доступно изложена в учебно-методическом комплексе, в состав которого входят разработанные учебные пособия:

1. Графика. Часть I. Программа, теория и практика для учащихся подготовительных курсов.

2. Основы архитектурного черчения. Часть II.

3. Теоретические основы проекционного черчения. Сборник упражнений для подготовительных курсов.

Существующие требования, предъявляемые к графическим знаниям и умениям, которыми должны обладать студенты, поступившие на первый курс архитектурного факультета, учтены в критериях оценок графических работ по черчению, выполняемых на вступительных экзаменах. Экзаменационные билеты разрабатываются по аналогам главных ведущих вузов России. Принята специальная схема оценки экзаменационных работ, по которой каждый из видов входящих в неё заданий оценивается в зависимости от сложности и трудоёмкости. Информация об экзамене доводится до обучаемого контингента не только теоретически. Ведётся пошаговая, методически отработанная системная подготовка к выполнению предстоящей экзаменационной работы. Примеры и содержание экзаменационных билетов размещены в соответствующих учебных пособиях для учащихся подготовительных курсов, проводимых на кафедре графики.

Библиографический список

1. Большая советская энциклопедия. – М.: Большая российская энциклопедия: Гласнет: Новый диск – 2002, 3 диска.

2. Чудинова, В.Г. Основы архитектурного проектирования. Учебное пособие для студентов архитекторов первого курса / В.Г. Чудинова, М.Ю. Тюрин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 35 с.

3. Хмарова, Л.И. Профессиональная подготовка и отбор абитуриентов на архитектурные и дизайнерские специальности / Л.И. Хмарова, Ж.В. Путина // С 86 Строительство и образование № 11: сборник научных трудов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С. 225–228.

К содержанию

УДК 666.941.2.022.6 + 666.9.022.6

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДОБАВОК-ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

Т.Н. Черных, А.В. Носов, А.А. Орлов

В статье рассматривается вопрос эффективности действия добавок-интенсификаторов обжига на процесс термообработки магнезиальных пород, таких как магнезитовая, бруситовая и доломитовая. Показано, что при использовании добавок значительно повышается энергоэффективность производства магнезиальных вяжущих, а также снижается эмиссия углекислого газа в атмосферу.

Ключевые слова: магнезит; брусит; добомит; обжиг; добавки-интенсификаторы.

Введение

В последние десятилетия вопросы повышения энергоэффективности производства вяжущих материалов являются одними из самых актуальных. Довольно широко эти вопросы проработаны для наиболее энергоемкого производства портландцемента. Для других видов вяжущих в частности, для магнезиальных, проблема экономии топлива и электроэнергии остается нерешенной, что в значительной мере тормозит их развитие. Низкая энергоэффективность тем более ограничивает производство магнезиальных вяжущих, чем выше цены на энергоресурсы. Немаловажную роль играет также ужесточение требований к выбросу парниковых газов, в частности к эмиссии углекислого газа в атмосферу.

В то же самое время все производства магнезиальных вяжущих из любого сырья: магнезита, брусита или доломита, имеют значительный резерв для снижения энергозатрат. Наиболее эффективным способом уменьшения расхода топлива на самой энергоемкой стадии производства является применение добавок-интенсификаторов обжига. Стоит отметить, что это влечет за собой дополнение технологических линий оборудованием для грануляции, однако не требующее коренной их модернизации.

Основным условием получения качественного магнезиального вяжущего является достижение основным минералом – периклазом оптимальных размеров. Это условие в наибольшей степени определяет температурный режим обжига. Понижение температуры и времени обжига ниже оптимальных ведет к формированию высокоактивного «недожога» оксида магния, а превышение к образованию «пережога». Обжиг за рамками диапазона оптимальных температурных режимов ведет к получению продукта с неравномерным изменением объема при твердении и растрескиванию материалов на его основе [1].

Применение интенсификаторов обжига способствует получению качественных магнезиальных вяжущих при пониженных температурах обжига из любого природного сырья. Однако для каждой породы характерны свои особенности.

Таким образом, оценка эффективности действия добавок-интенсификаторов на обжиг магнезиальных пород: магнезита, брусита и доломита является актуальной и своевременной задачей.

Материалы

Для проведения исследований использовали магнезитовую и доломитовую породы Саткинского месторождения, а также бруситовую породу Кульдурского месторождения. Минералогический состав пород представлен в табл. 1.

Таблица 1

Минералогический состав магнезиальных пород

Порода	$MgCO_3$, %	$CaMg(CO_3)_2$, %	$Mg(OH)_2$, %	Примеси
Магнезитовая	60,0…80,1	14,5…35,9	–	4,6…8,8 (кварц, углисто-хлоритовое вещество)
Доломитовая	1,5…5,1	85,1…93,2	–	5,0…9,1 (кварц, углисто-хлоритовое вещество)
Бруситовая	–	–	65,8…92,4	7,5…35,0 (серпентины и продукты серпентинизации брусита)

Методы

Для выявления особенностей действия добавок-интенсификаторов на разложение пород был проведен анализ процессов разложения породы без добавок и в присутствии различных добавок-интенсификаторов. Интенсифицирующее действие добавок исследовали с помощью термогравиметрического метода анализа на дериватографе системы «Luxx STA 409» фирмы «Netsch». Породы предварительно измельчали в лабораторной мельнице до тонкости помола, характеризующейся остатком на сите № 008 не более 15 %, полученный порошок смешивали с водными растворами добавок-интенсификаторов в количестве 2 % сухой добавки от массы, влажность шихты составляла 15 %. Количество добавки было выбрано исходя из литературных данных и предварительно проведенных исследований. Полученную смесь высушивали при температуре 60±5 °С и помещали в печь дериватографа.

Результаты исследований

Магнезитовая порода

Добавки-интенсификатры при обжиге магнезитовых пород значительно снижают температуру разложения основного минерала магнезита и способствуют значительной экономии топливных ресурсов. Так при обжиге

бездобавочной породы, температура получения вяжущего составляет 750…800 ºС, а при использовании интенсификаторов основной пик разложения магнезита сдвигается на 100…150 ºС в низкотемпературную область. На дериватограммах (рис.1) видно, что введение добавки-интенсификатора значительно снижает температуру разложения основного минерала – магнезита.

Экономия топлива при понижении температуры с 800 до 650 ºС составляет не менее 20 %, с соответствующим снижением эмиссии углекислого газа в атмосферу.

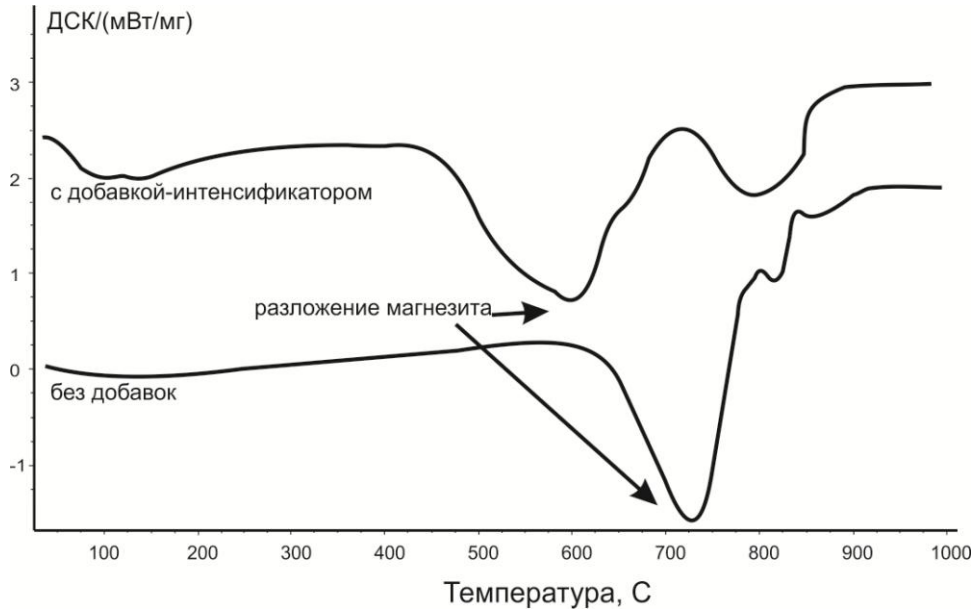


Рис. 1. Дериватограммы разложения магнезитовой породы

Бруситовая порода

Известно, что минерал брусит при обжиге разлагается при температуре 400–550 °С. Однако чистые бруситы используют в более рентабельном производстве огнеупоров, а те породы, что идут на вяжущие, содержат серпентины и серпентиноподобные минералы (продукты неполной серпентинизации), разлагающиеся с потерей воды при 560 до 900 °С. В процессе обжига пары воды, удаляющиеся из серпентинов и им подобных минералов, сдерживают полную дегидратацию брусита и замедляют кристаллизацию периклаза до того момента, пока не удалится вся гидратная вода из примесей [1]. В результате для получения магнезиального вяжущего из бруситовой породы 3–4 сортов необходим обжиг при температурах 1100–1200 °С, что повышает себестоимость вяжущего и делает его производство нерентабельным [1, 2]. Понижение температуры разложения возможно с помощью интенсификаторов обжига, на рис. 2 видно, что эндоэффект от реакции дегидратации серпентинов снижается с 900 до 700 ºС.

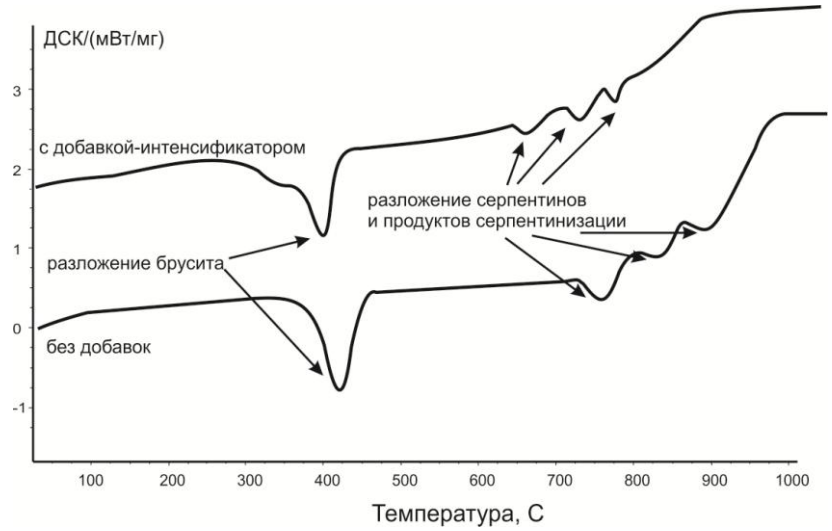


Рис. 2. Дериватограммы разложения бруситовой породы

Т.е. введение добавок-интенсификаторов снижает температуру разложения серпентинов на 150–200 ºС, что способствует получению качественного продукта при более низкой температуре.

Доломитовая порода

Несмотря на значительно меньшее содержание MgO в доломитовом вяжущем по сравнению с вяжущими из магнезита и брусита, из доломита при условии строгого соблюдения режима обжига с выдержкой температуры с точностью до 5 ^{o}C возможно получить высокопрочное вяжущего [3, 4, 5]. Необходимым условием для получения качественного вяжущего из доломитов является разложение при нагревании только магниевой составляющей породы. Это связано с тем, что образующаяся при термическом разложении кальциевой составляющей известь в дальнейшем приводит к разрушению получаемого при гидратации камня. Однако такой узкий температурный интервал делает практически невозможным промышленное производство качественного вяжущего на основе доломитов. Введение добавок-интенсификаторов для этой породы не только понижает температуру получения вяжущего, но и делает возможным производство вяжущего в промышленных масштабах. Эффект от введения добавки заключается в максимально возможном (150…200 ^{o}C) расширении интервала разложения $MgCO_3$ и $CaCO_3$, что хорошо видно на дериватограммах, представленных на рис.3. При использовании добавок-интенсификаторов при обжиге доломитовой породы решается сразу несколько значимых проблем. Помимо снижения температуры обжига и экономии топлива, можно утилизировать породу, попутно добытую при разработке магнезитов, что дополнительно существенно снизит антропогенную нагрузку на окружающую среду в районах размещения этих отходов и себестоимость строительных материалов.

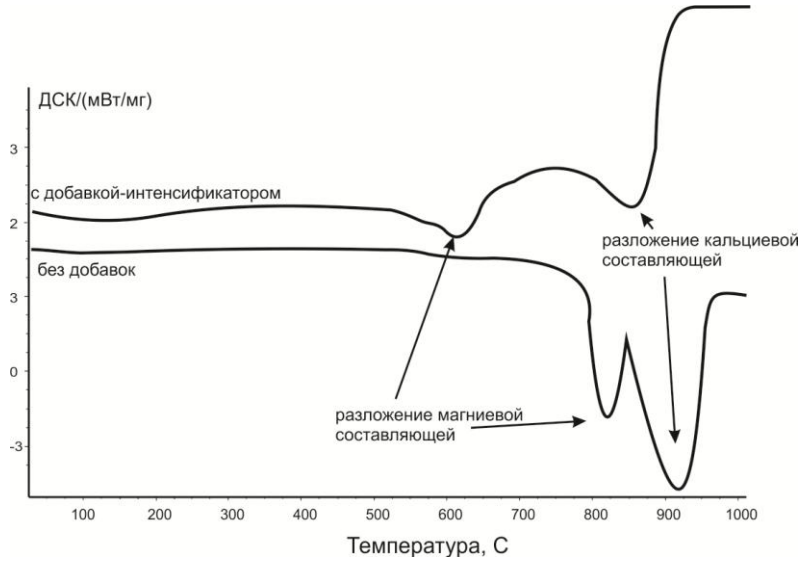


Рис. 3 Дериватограммы разложения доломитовой породы

Заключение

Т.о., использование добавок-интенсификаторов обжига повышает энергоэффективность производства вяжущего из всех магнезиальных пород. Их введение в шихту перед обжигом позволяет не менее чем на 20 % снизить расход топлива и уменьшить количество выбрасываемых в атмосферу парниковых газов при незначительном изменении технологической линии. Кроме этого решается вопрос о получении вяжущих более стабильного качества.

Библиографический список

1. Крамар, Л.Я. Обжиг бруситовой породы для получения магнезиального вяжущего строительного назначения / Л.Я. Крамар, Т.Н. Черных // Популярное бетоноведение. – 2009. – № 5. – С. 47–53.

2. Бирюлева, Д.К. Влияние продолжительности обжига доломита и структурных особенностей MgO и $MgCl_2 \cdot 3Mg(OH)_2 \cdot 8H_2O$ на прочность и водостойкость доломитового цемента / Д.К. Бирюлева, Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов. – Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 4. – С. 32–37.

3. Бутт, Ю.М. Высокопрочный магнезиально-доломитовый цемент / Ю.М. Бутт, Б.Н. Богомолов, Л.И. Дворкин // Вяжущие материалы Сибири и Дальнего востока. – Новосибирск: Академия наук СССР, Сибирское отделение, изд-во Наука, 1970. – 179 с.

4. Шелихов, Н.С. Особенности формирования активной фазы MgO в доломитовом цементе / Н.С. Шелихов, Р.З. Рахимов // Строительные материалы. – 2008. – Вып. 10. – С. 32–33.

5. Черных, Т.Н. Свойства магнезиального вяжущего из бруситовой породы и их взаимосвязь с размерами кристаллов периклаза / Т.Н. Черных, Л.Я. Крамар, Б.Я. Трофимов // Строительные материалы. – 2006. – № 1. – С. 52–53.

К содержанию

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УДК 536.2.01.001.57 + 621.1.002.5

К ВОПРОСУ МИНИМИЗАЦИИ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПО МЕТОДУ БАЛАНСОВ ЭНЕРГИИ

В.И. Горбенко, А.И. Грибанов, М.А. Юртаев

Рассматриваются способы повышения точности численного расчета задач теплопроводности, приводится оценка погрешности решения и пути ее минимизации.

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, погрешность решения, уравнения теплопроводности.

Введение

Вопрос о точности компьютерных расчетов имеет большое значение, поскольку объем вычислений для получения достоверных результатов приближенными методами велик. Оценка точности численного метода важна и потому, что в некоторых пределах повысить точность можно за счет увеличения количества вычислений, а уменьшить временные затраты при решении задачи – за счет снижения точности получаемого решения.

Постановка задачи

Для оценки погрешности при переходе к дискретной модели процесса теплопроводности можно воспользоваться разложением зависимости температуры от пространственно-временных координат в ряд Тейлора относительно температуры T_i в i-той расчетной точке [1]. По разности температур между приближённым решением и решением при разложении в ряд Тейлора оценивается порядок погрешности.

Обобщенное уравнение теплообмена движущегося потока вещества в интегральной форме имеет вид [2]:

$$\int_F \left(q_n(A)+q_{pn}(A)\right)dF+\int_F \rho\omega_n(A)i(A)dF+\int_V q_V dV=\int_V \rho c_p\frac{\partial T}{\partial \tau}dV. \qquad (1)$$

Первое слагаемое характеризует сумму тепловых потоков за счет теплопроводности и лучеиспускания в рассматриваемой области. Второе слагаемое учитывает конвективную составляющую потока вещества. Третье слагаемое определяет внутренние источники теплоты. Правая часть уравнения характеризует изменение энтальпии потока в области объемом V.

Решения уравнения (1) могут содержать погрешности трех видов. Первая из них обусловлена заменой интегралов в уравнении конечными суммами и относится к пространственной составляющей погрешности. Вторая

вызвана аппроксимацией временной производной $\partial T/\partial\tau$ конечно-разностным соотношением $\Delta T/\Delta\tau$. Третья возникает ввиду того, что систему алгебраических уравнений в общем случае приходится решать приближенно. Значение этих ошибок на любом этапе расчета не поддаются точному определению, однако существуют способы оценки и повышения точности решения, которые приводятся ниже.

Точность решения задач теплопроводности по методу балансов энергии и вещества (МБЭ), как и по методу конечных разностей (МКР), зависит от размеров ячеек, на которые условно разбивается изучаемая конструкция, и величины временного шага. При прочих равных условиях равномерное разбиение благоприятно сказывается на сходимости и точности решения. Чем меньше размеры ячеек и значение временного шага, тем в большей степени полученные результаты решения приближаются к точным, но при этом увеличивается время решения задачи.

Способы оценки погрешности

Первый способ оценки погрешности основан на аналогии систем алгебраических уравнений МБЭ и МКР. Известно [3, 4], что разностные схемы МКР, аналогичные расчетным схемам МБЭ, имеют порядок сеточной погрешности æ = 2, то есть с уменьшением шага h сетки при равномерном разбиении погрешность снижается по квадратичному закону: $c\cdot h^2$, где c – некоторая постоянная. Для явной и неявной схем временная погрешность аппроксимации пропорциональна $\Delta\tau$, для комбинированной – $\Delta\tau^2$.

Если порядок погрешности метода равен æ, то локальная ошибка расчета определяется выражением $c\cdot h^{æ+1}$. Для оценки этой ошибки воспользуемся первой формулой Рунге [3]. Если для вычисления искомых значений T_i' в i-й точке используется шаг h, то разность между истинным и вычисленным значением равна $T_i^* - T_i' = c\cdot h^{æ+1}$. Если шаг уменьшить вдвое и вычислить $(T_i')_{1/2}$ в той же i-той точке, то получится

$$T_i^* - (T_i')_{1/2} = c\cdot(h/2)^{æ+1}, \qquad (2)$$

Вычитая это выражение из предыдущего:

$$(T_i')_{1/2} - T_i' = c\cdot h^{æ+1}\cdot(1\text{-}0{,}5^{æ+1}), \qquad (3)$$

можно найти локальную погрешность:

$$c\cdot h^{æ+1} = \frac{(T_i')_{1/2} - T_i'}{1\text{-}0{,}5^{æ+1}}. \qquad (4)$$

Недостатком этого способа является то, что значение T_i' приходится вычислять дважды.

Для вычисления $(T_i')_{1/2}$ в i-той точке приходится делать два шага, каждый из которых равен половине исходного, что увеличивает объем вычислений более, чем вдвое. Тем не менее, процедура оценки локальной погрешности часто включается в вычислительный алгоритм для автоматического изменения шага в процессе счета.

Значение порядка погрешности æ позволяет установить скорость сходимости приближенного решения к точному с уменьшением временного шага $\Delta\tau$ [5, 6]. При этом, чем больше æ, тем выше скорость сходимости. Пусть для одинаковых моментов времени имеются две пары значений $(T_i')_1$ и $(T_i')_2$, полученные из одной и той же расчетной схемы МБЭ, но для различных интервалов времени $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2=k_\tau\Delta\tau_1$. По этим данным согласно формуле Рунге можно найти уточненное значение T для тех же моментов времени, если в разложении погрешности в ряд учесть лишь первый член. Тогда получим:

$$\frac{(T_i')_2-T}{(T_i')_1-T}=\left(\frac{\Delta\tau_2}{\Delta\tau_1}\right)^{æ}=k_\tau^{æ}, \qquad (5)$$

Откуда:

$$T=\frac{(T_i')_1 k_\tau^{æ}-(T_i')_2}{k_\tau^{æ}-1}. \qquad (6)$$

Сопоставлением уточненного значения T, имеющего порядок погрешности æ+1, со значениями $(T_i')_1$ и $(T_i')_2$ устанавливаются количественные оценки погрешности:

$$\Delta T_1=(T_i')_1-T=\frac{(T_i')_2-(T_i')_1}{k_\tau^{æ}-1}, \qquad (7)$$

и

$$\Delta T_2=(T_i')_2-T=k_\tau^{æ}\cdot\frac{\left((T_i')_2-(T_i')_1\right)}{k_\tau^{æ}-1}=k_\tau^{æ}\cdot\Delta T_1. \qquad (8)$$

Используя правило Рунге, можно оценить пространственно-временную погрешность МБЭ. Если получить два численных решения $(T_i')_1$ и $(T_i')_2$, одной и той же задачи с разными сочетаниями h_1, $\Delta\tau_1$ и $h_2=k_h h_1$, $\Delta\tau_2=k_\tau\Delta\tau_1$ причем $k_h=k_\tau$, то по формуле (6) можно перейти к уточненному решению T, а по формулам (7), (8) оценить абсолютное значение погрешности, связанной с пространственно-временной дискретизацией задачи.

Ограничения на величину временного шага в явной схеме формально связаны с требованием устойчивости решения и не позволяют оценить неизбежные погрешности, которые возникают в процессе счета. Для неус-

тойчивых схем малые погрешности могут привести к большим отклонениям от точного решения и результаты расчета становятся непригодными для практического использования. Устойчивая схема подавляет возникающие погрешности, они уменьшаются, затухают от одного временного шага к другому. Поэтому необходимо отметить особенность явной схемы. Пусть при вычислениях на k-м временном интервале допущена погрешность, которую примем за единицу. Если дальнейшие вычисления ведутся без нарушения условия устойчивости, то погрешность затухает при $\Delta\tau<\min[\Delta\tau]_i$ и неограниченно возрастает при $\Delta\tau>\min[\Delta\tau]_i$. Если положить $\Delta\tau=\min[\Delta\tau]_i$, то значение погрешности в каждой узловой точке от интервала к интервалу будет совершать незатухающие колебания, а расчетная схема окажется на границе устойчивости. Физически оправданные результаты с монотонным затуханием погрешности дает явная схема при $\Delta\tau=0{,}5\min[\Delta\tau]_i$.

Другой способ оценки общей погрешности основан на сопоставлении результатов приближенного решения с точным. Этот способ нашел ограниченное применение, так как точное решение известно лишь для сравнительно небольшого круга задач. Часто это задачи с простой конфигурацией тел и линейными характеристиками процесса. Тем не менее, такой способ в ряде случаев оказывается эффективнее других, когда имеющееся точное решение удается «подстроить» под реальные условия процесса. Сюда же следует отнести способ оценки погрешности, основанный на сравнении потока энергии, определенного из интегрального соотношения (1) и его дискретного аналога. Количество тепла, передаваемое в реальных условиях, определяется более точным расчетом участка конструкции, имеющего распределенные параметры [7].

Практика расчётов температурных полей конструкций показала, что точность решения задачи, кроме степени пространственно-временной дискретизации, зависит ещё и от выбора расчётных точек внутри ячеек разбиения [4]. Например, с приближением точки к адиабатной грани ячейки или к оси симметрии цилиндра погрешность расчётов начинает резко возрастать. Особенно заметно расхождение в начальной стадии процесса – при малых числах Фурье. Это говорит о необходимости изучения закономерности изменения погрешности и её минимизации при миграции расчетных точек внутри ячеек.

Расчетные точки

Выбор местоположения расчётных точек осуществляется, исходя из следующих соображений. Перемещение точки в пределах ячейки ведёт к изменению термических сопротивлений с соседними точками в направлении перемещения, что сказывается на величине расчётной температуры данной ячейки. Следовательно, за оптимальное положение расчетных точек следует считать такое, которое приводит к минимизации погрешности $\varepsilon_{р.т}$:

$$\varepsilon_{р.т}=\left|T^{*}-\overline{T}\right|, \quad (9)$$

где T^{*} и $\overline{T}$– функции, описывающие истинное и приближенное распределение температуры. Нахождение вектора координат расчетных точек $X_i^{опт}$(i=1,2,…,M) рассмотрим на примере нагрева бесконечной многослойной пластины в граничных условиях 3-го рода.

На рисунке 1 показано распределение температуры в произвольный момент времени по толщине пластины, условно расчленённой на достаточно малые слои $\delta_1, \delta_2,\ldots, \delta_M$. При переменных характеристиках процесса точное решение $T^{*} = f(x,\tau)$ может быть найдено только для немногих частных случаев. Чаще оно аппроксимируется системой линейно независимых функций или полиномом второго или третьего порядка. Представим функцию T* в виде кусочно-линейной зависимости. Критерием оценки погрешности может служить разность тепловых потоков через границы разбиения рассматриваемого i-го слоя при T^{*} и $\overline{T}$ распределении:

$$\varepsilon_i=\left|\sum_{j=1}^{2} q_j-\sum_{j=1}^{2} q_j^{*}\right|, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{2} q_j=\frac{T_{i-1}-T_i}{R_{i-1,i}}+\frac{T_{i+1}-T_i}{R_{i+1,i}}, \sum_{j=1}^{2} q_j^{*}=\frac{T_{i-1}^{*}-T_i^{*}}{R_{i-1,i}}+\frac{T_{i+1}-T_i^{*}}{R_{i+1,i}}.$$

Термические сопротивления в обозначениях рисунка 1:

– для первого слоя:

$$R_{f\text{-}1}=\frac{1}{\alpha}+\frac{h_1}{\lambda_1}, R_{f\text{-}1}^{*}=\frac{1}{\alpha}+\frac{h_1}{\lambda_{a\text{-}1}^{cp}}, R_{1\text{-}2}=\frac{\delta_1-h_1}{\lambda_1}+\frac{h_2}{\lambda_2}, R_{1\text{-}2}^{*}=\frac{\delta_1-h_1}{\lambda_{1\text{-}b}^{cp}}+\frac{h_2}{\lambda_{b\text{-}2}^{cp}};$$

– для второго слоя:

$$R_{2\text{-}3}^{*}=\frac{\delta_2-h_2}{\lambda_{2\text{-}c}^{cp}}+\frac{h_3}{\lambda_{c\text{-}3}^{cp}}, \quad R_{2\text{-}3}=\frac{\delta_2-h_2}{\lambda_2}+\frac{h_3}{\lambda_3}$$

и так далее.

Решая совместно систему из M уравнений вида:

$$\partial\varepsilon_i/\partial h_i=0, \; i=1,2,\ldots,M \quad (11)$$

определяется оптимальное местоположение расчетных точек для известного распределения температуры на текущем временном шаге. Значения температуры в искомых точках определяются интерполяцией.

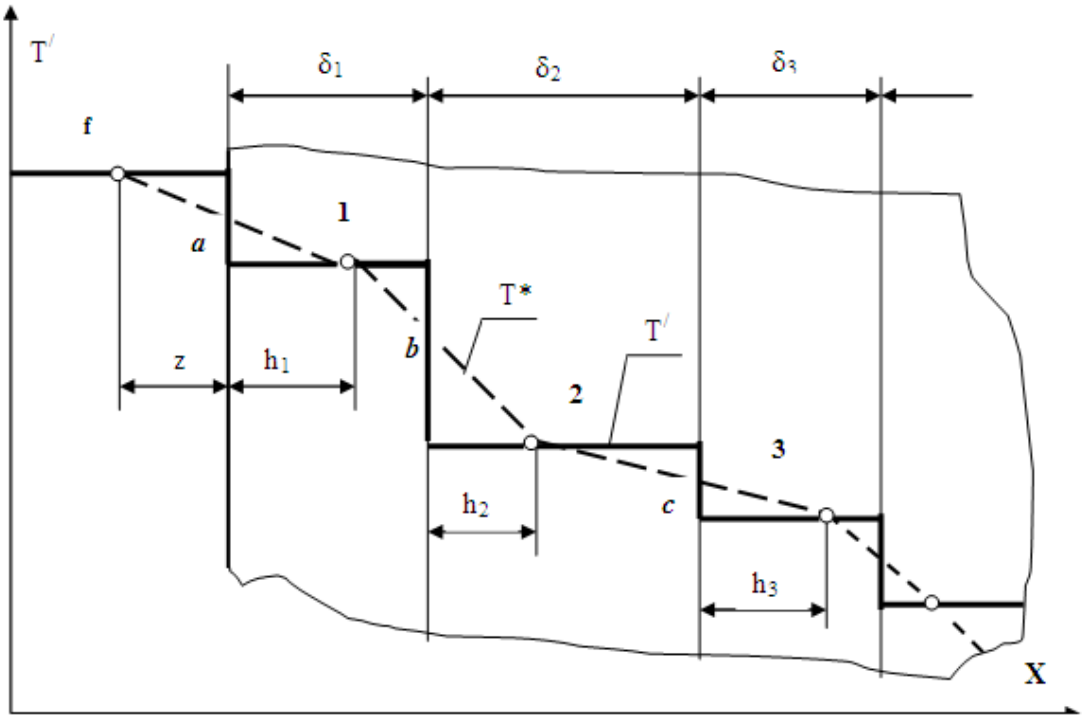


Рис. 1. К выбору координат расчетных точек

В частном случае для однослойной пластины (M=1) и граничных условиях первого рода T_{c1} и T_{c2} из условия (11) оптимальное положение расчетной точки в слое, имеющего в текущий момент времени температуру T_1, определится:

$$\bar{h}_1=\frac{h_1}{\delta_1}=\frac{1}{1+\left|\frac{T_1-T_{c1}}{T_{c2}-T_1}\right|}.$$

При $T_{c1}=T_{c2}$ координата расчётной точки лежит в середине слоя $\bar{h}_1=0{,}5$.

Оценка погрешности на всём временном интервале τ_k сводится к минимизации функционала:

$$J(h,\tau)=\sum_{i=1}^{M}\int_0^{\tau_k}\left(\sum_{j=1}^{N}q_j^*-\sum_{j=1}^{N}q_j\right)^2\partial\tau.$$

В ячейках, где $\varepsilon_i = 0$, приближённое решение совпадает с точным: $T^*=\bar{T}$.

Очевидно, что на положение расчетных точек в поверхностных ячейках будет в большей степени сказываться влияние граничных условий теплообмена. В качестве примера для оценки такого влияния рассмотрим случай нагрева бесконечной однослойной пластины толщиной δ. Одна сторона пластины является адиабатной поверхностью (условие Неймана); с другой стороны заданы граничные условия 3-го рода. Требуется определить координату $(\bar{h})^*$ расчетной точки, где результат расчёта температуры по МБЭ совпадает с точным аналитическим решением.

Для приближённого решения воспользуемся явной схемой расчета [2]:

$$T^{/}=T+\frac{\Delta\tau}{\rho c_p \delta}\left(\frac{T_f-T}{\frac{1}{\alpha}+\frac{\delta-h}{\lambda}}\right)$$

или в безразмерном виде:

$$\frac{T^{/}-T}{T_f-T}=\Delta Fo\left(\frac{Bi}{1+Bi\left(1-\bar{h}\right)}\right). \qquad (12)$$

В качестве аналитического решения воспользуемся выражением [8]:

$$\frac{T^{*}-T_f}{T_0-T_f}=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\sin\mu_n}{\mu_n+\sin\mu_n\cos\mu_n}\cos\left(\mu_n\bar{h}\right)\exp\left(-\mu_n^2 Fo\right), \qquad (13)$$

где вместо бесконечного ряда ограничимся суммой первых 500 его членов.

В уравнения (12) и (13) входят параметры: $Bi=\alpha\delta/\lambda$ – число Био; $Fo=\lambda\tau/(\rho c_p\delta^2)$ – число Фурье; $\Delta Fo=\lambda\Delta\tau/(\rho c_p\delta^2)$ – относительный временной шаг; $\bar{h}=h/\delta$ – относительная координата расчетной точки (на адиабатной поверхности $\bar{h}=0$).

Приравнивая значение температур $T^{*}=\bar{T}$ для одинаковых моментов времени, определяется координата $\bar{h}=\left(\bar{h}\right)^{*}$. При постоянных числах Fo зависимости $\left(\bar{h}\right)^{*}=f(Bi)$ в диапазоне $0{,}01\le Bi\le 5$ являются линейными:

$$\left(\bar{h}\right)^{*}=\begin{cases}0{,}7880-0{,}01000Bi, & Fo=0{,}01,\\ 0{,}7360-0{,}00778Bi, & Fo=0{,}02,\\ 0{,}6690-0{,}02550Bi, & Fo=0{,}05,\\ 0{,}6210-0{,}04550Bi, & Fo=0{,}10,\\ 0{,}5901-0{,}07110Bi, & Fo=0{,}20,\\ 0{,}5820-0{,}10000Bi, & Fo=0{,}30.\end{cases}$$

В случае Bi = idem и Fo= var изменение положения координаты $\left(\bar{h}\right)^{*}$ носит экспоненциальный характер (рис.2). В начальный момент времени оптимальным положением расчётной точки независимо от числа Bi считается граница пластины $\left(\bar{h}\right)^{*}=1$. С течением времени точка начинает перемещаться внутрь ячейки и стабилизирует своё положение при достижении установившегося теплового состояния пластины. Чем меньше число Bi, тем быстрее происходит стабилизация.

Учитывая создание более мощных ЭВМ требуемую точность можно достичь, используя сетки разбиения с малыми ячейками и более сложные модели распределения температуры в ячейках сетки.

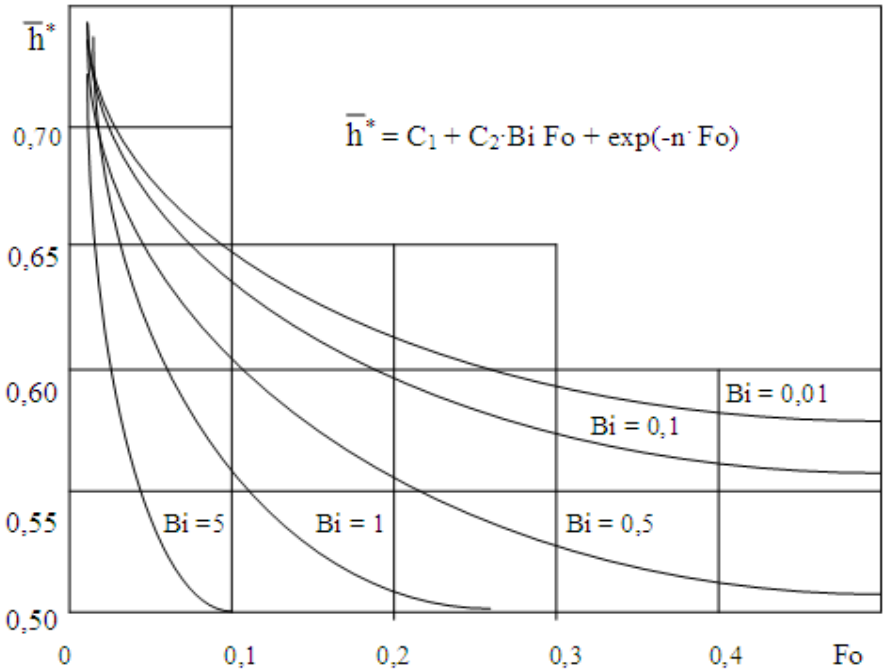


Рис. 2. Зависимость координаты точного счета
от чисел Био (Bi) и Фурье (Fo)

Таблица 1

Количественная оценка погрешности расчёта

Относительная координата расчетной точки, $\bar{h}$	Аналитическое решение (относительная температура θ)	Решение по методу балансов энергии					
		Явная схема		Комбинированная схема (η=0,5)		Неявная схема	
		Относительная температура. θ	Погрешность, $\varepsilon_{р.т}$, %	Относительная температура. θ	Погрешность, $\varepsilon_{р.т}$, %	Относительная температура. θ	Погрешность, $\varepsilon_{р.т}$, %
0,10	0,1429	0,1671	14,3	0,1670	14,3	0,1669	14,2
0,20	0,1625	0,1822	10,5	0,1821	10,4	0,1820	10,4
0,30	0,1952	0,2002	2,29	0,2001	2,24	0,2000	2,20
0,40	0,2411	0,2223	-7,05	0,2222	-7,10	0,2220	-7,15
0,50	0,3002	0,2497	-15,5	0,2496	-15,5	0,2494	-1,56
0,60	0,3721	0,2849	-21,9	0,2847	-22,0	0,2845	-22,0
0,70	0,4563	0,3313	-25,9	0,3310	-26,0	0,3307	-26,0
0,80	0,5516	0,3953	-27,1	0,3950	-27,1	0,3946	-27,2
0,90	0,6565	0,4888	-24,6	0,4883	-24,7	0,4877	-24,7
1,00	0,7690	0,6348	-16,9	0,6339	-17,0	0,6330	-17,1

Выводы и рекомендации

В качестве примера в таблице приведена количественная оценка погрешности расчёта $\varepsilon_{р.т}=f(\bar{h})$ при использовании явной (Я), неявной (Н) и комбинированной схем (К) с 50-ю процентным (η=0,5) участием (Я) и (Н) в (К) для случая Bi =5, Fo =0,2. Координата точного счета при этих условиях для всех схем составляет $(\bar{h})^*$=0,324.

Библиографический список

1. Бреббия, К. Применение метода граничных элементов в технике / К. Бреббия, С. Уоркер. – М.: Мир, 1982. – 248 с.

2. Горбенко, В.И. Теоретические основы метода балансов энергии и вещества: Учебное пособие по дисциплине «Тепломассообмен» / В.И. Горбенко. – Челябинск: ЧПИ, 1986. – 44 с.

3. Самарский, А.А. Введение в численные методы / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1987. – 288 с.

4. Коздоба, Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба. – Киев: Наукова думка, 1975. – 228 с.

5. Рихтмайер, Р. Разностные методы решения краевых задач / Р. Рихтмайер, К. Мортон. – М.: Мир, 1972. – 420 с.

6. Мак-Кракен, Д. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе / Д. Мак-Кракен, У. Дорн. – М.: Мир, 1977. – 587 с.

7. Фёдоров, В.И. Метод элементарных балансов для расчета нестационарных процессов поверхностных теплообменников / В.И. Фёдоров, З.А. Марценюк. – Киев: Наукова думка, 1977. – 143 с.

8. Теплопередача. Учебник для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

К содержанию

УДК 66.041.47-932.2 + 66.046.4

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА БАЛАНСОВ ЭНЕРГИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ

А.И. Грибанов

Обжиговая печь предназначена для обжига анодов для алюминиевых электролизеров. На базе метода балансов энергии была разработана математическая модель тепловой работы обжиговой печи. Она дает возможность рассчитать трехмерное нестационарное температурное поле в камере обжиговой печи. Применение метода балансов энергии также позволяет определить составляющие теплового баланса печи (мгновенного и за весь процесс обжига).

Ключевые слова: обжиговая печь, математическая модель, тепловой баланс, температурное поле, продукты сгорания.

Тепловой баланс для камеры обжиговой печи [1] за время процесса обжига в общем виде может быть представлен в виде следующего уравнения:

$$Q_г^{вх} + Q_{топл.} + Q_{л.г.} + Q_{л.см.} + Q'_{зас} + Q_{ф.т.} + Q_{возд.} = \\ = Q_{ан} + Q_{зас} + Q_г^{вых} + Q_{х.н.} + Q_{кл.} + Q_{н.о.}, \quad (1)$$

где $Q_г^{вх}$ – теплота продуктов сгорания, вошедших в огневые простенки камеры; $Q_{топл.}, Q_{л.г.}, Q_{л.см.}, Q'_{зас}$ –теплоты, выделившиеся от сгорания, соответственно, топлива, летучих газообразных и смолистых веществ и засыпки; $Q_{ф.т.}$ – физическая теплота топлива; $Q_{возд.}$ – физическая теплота воздуха, поступившего в огневые простенки камеры; $Q_{ан}, Q_{зас}$ – теплота, пошедшая на нагрев анодов и засыпки в камере; $Q_г^{вых}$ – теплота продуктов сгорания, вышедших из огневых простенков камеры; $Q_{кл.}$ – теплота, пошедшая на нагрев кладки камеры; $Q_{х.н.}$ – потери теплоты от химического недожега топлива, летучих газообразных и смолистых веществ; $Q_{н.о.}$ – потери теплоты от наружного охлаждения поверхностей камеры;

$$Q_{н.о.} = Q_п^{бок} + Q_п^{верх} + Q_п^{низ}, \quad (2)$$

где $Q_п^{бок}, Q_п^{верх}, Q_п^{низ}$ – потери теплоты от наружного охлаждения боковых стен, верней и нижней поверхностей камеры.

В зависимости от времени процесса обжига и температуры в камере отдельные составляющие теплового баланса могут быть равны нулю.

Определив составляющие теплового баланса и зная теплоту сгорания топлива $Q_н^р$, можно определить количество топлива, которое необходимо для воспроизведения данного графика изменения температуры в огневых простенках камеры. Кроме того, тепловой баланс камеры обжиговой печи позволяет определить следующие важнейшие характеристики, оценивающие качество работы обжиговой печи, как теплотехнического агрегата: удельный расход условного топлива; полный КПД печи; коэффициент использования теплоты [2].

Моделируемая часть камеры печи разбита на гомогенные элементы [3]. Каждый элемент имеет свою индексацию. По длине в направлении оси x – индекс i, по ширине в направлении оси y – индекс j и по высоте в направлении оси z – индекс k.

Объем произвольно взятого элемента в общем виде можно определить по формуле:

$$\Delta V_{i,j,k} = \Delta x_{i,j,k} + \Delta y_{i,j,k} + \Delta z_{i,j,k}, \quad (3)$$

где $\Delta x_{i,j,k}, \Delta y_{i,j,k}, \Delta z_{i,j,k}$ – размеры i, j, k-го элемента в направлении осей x, y, z.

Количество теплоты поступившей в произвольно взятый элемент за промежуток времени $\Delta\tau$ определится:

$$\Delta Q_{i,j,k}^{\Delta\tau} = \Delta V_{i,j,k}\left(C_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau}\cdot\rho_{i,j,k}\cdot T_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} - C_{i,j,k}^{\tau}\cdot\rho^{\tau}{}_{i,j,k}\cdot T_{i,j,k}^{\tau}\right), \quad (4)$$

где $C_{i,j,k}$ – теплоемкость элемента; $\rho_{i,j,k}$ – плотность элемента; $T_{i,j,k}$ – температура элемента.

Суммируя во времени $\Delta Q_{i,j,k}^{\Delta\tau}$, подведенное к элементам засыпки, анодов и т.д., можно определить составляющие теплового баланса в любой момент времени процесса обжига $\tau_м$ (кратный $\Delta\tau$) и за весь процесс обжига $\tau_к$.

Теплота, подведенная к анодам, расположенным в моделируемой части камеры, за время $\Delta\tau$:

$$Q_{ан.м.ч.}^{\Delta\tau} = \sum_{i=2}^{Ni-1}\sum_{j=4}^{Nj}\sum_{k=2}^{Nk-1}\Delta Q_{ан\ i,j,k}^{\Delta\tau}, \quad (5)$$

где Ni, Nj, Nk – число разбиений моделируемой части камеры по осям x, y и z.

Теплота, подведенная к анодам в камере за весь процесс обжига:

$$Q_{ан..} = n\sum_{\tau=0}^{\tau_к} Q_{ан.м.ч.}, \quad (6)$$

где n – число моделируемых частей в камере.

Аналогичным образом можно определить теплоту, пошедшую на нагрев засыпки $Q_{зас}$ и кладки камеры $Q_{кл.}$.

Наружные поверхности камеры разбиты на элементарные площадки. Количество теплоты, передаваемой площадкой верхней поверхности камеры в окружающую сруду за промежуток времени $\Delta\tau$:

$$\Delta Q_{п..}^{верх.\,\Delta\tau} = \frac{\left(T_{i,\,j,\,k}^{\tau} - T_{в}\right)}{R_{i,\,j,\,k}^{\tau}} \cdot \Delta\tau, \qquad (7)$$

где $T_{i,\,j,\,k}^{\tau}$ – температура элемента; $T_{в}$ – температура окружающей среды; $R_{i,\,j,\,k}^{\tau}$ – термическое сопротивление между узловой точкой элемента и окружающей средой.

Количество теплоты, теряемой верхней поверхностью за весь процесс обжига:

$$Q_{п..}^{верх.\,\Delta\tau} = \sum_{i=1}^{Ni} \sum_{j=1}^{Nj} \Delta Q_{п..}^{верх.\,\Delta\tau}. \qquad (8)$$

Количество теплоты, теряемой верхней поверхностью за весь процесс обжига:

$$Q_{п..}^{верх.} = \sum_{\tau=0}^{\tau_к} Q_{п..}^{верх.\,\Delta\tau}. \qquad (9)$$

Потери теплоты с боковых и нижней поверхностей камеры определяются аналогично. Суммируя найденные значения теплоты, определим потери теплоты от наружного охлаждения поверхностей камеры $Q_{н.о.}$.

Теплота, теряемая в результате химического недожега топлива, газообразных и смолистых веществ, $Q_{х.н.}$ определяется по экспериментальным данным на основе газового анализа и задается при расчете.

Потери теплоты с уходящими газами из одного огневого простенка за промежуток времени $\Delta\tau$:

$$Q_{ух.г.}^{\Delta\tau} = V_{д.г.}^{вых} \cdot C_{д.г.} \cdot \rho_{д.г.} \cdot T_{д.г.}^{вых} \cdot \Delta\tau, \qquad (10)$$

где $V_{д.г.}^{вых}$ – расход дымовых газов на выходе из огневого простенка; $C_{д.г.}$ – теплоемкость дымовых газов; $\rho_{д.г.}$ – плотность дымовых газов; $T_{д.г.}^{вых}$ – температура дымовых газов на выходе из огневого простенка.

Теплота, теряемая с уходящими продуктами сгорания из последней по ходу «огня» камеры за промежуток времени, равный темпу движения «огня» $\tau_{д.о.}$:

$$Q_{ух.г.} = m \sum_{\tau=0}^{\tau_{д.о.}} Q_{ух.г.}^{\Delta\tau}, \qquad (11)$$

где m – число огневых простенков в камере.

Теплоту, поступившую в огневой простенок рассматриваемой камеры из предыдущей, можно определить аналогично потерям тепла с уходящими газами. Поступление теплоты происходит до тех пор, пока в предыдущей камере не закончится процесс обжига. Таким образом, тепло, поступившее в огневые простенки рассматриваемой камеры из предыдущей:

$$Q_{Г.}^{вх} = m \sum_{\tau=0}^{\tau=5\tau_{д.о.}} Q_{Г.}^{вх}\,\Delta\tau \,. \qquad (12)$$

Количество теплоты, выделившейся в зоне огневого простенка в результате сгорания летучих газообразных $\Delta Q_{л.г.}$ и смолистых $\Delta Q_{л.см.}$ веществ за время $\Delta\tau$, определяется:

$$\Delta Q_{л.г.} = \Delta V_{л.г.} \cdot Q_{н}^{л.г.} \cdot \Delta\tau\,; \qquad (13)$$

$$\Delta Q_{л.см.} = \Delta m_{л.см.} \cdot Q_{н}^{л.см.} \cdot \Delta\tau\ , \qquad (14)$$

где $\Delta V_{л.г.}$ – объемный расход летучих газообразных веществ; $\Delta m_{л.см.}$ – массовый расход смолистых веществ; $Q_{н}^{л.г.}$, $Q_{н}^{л.см.}$ – теплота сгорания летучих газообразных и смолистых веществ.

Теплота от сгорания газообразных веществ в огневом простенке за время $\Delta\tau$:

$$Q_{л.г..}^{\Delta\tau} = \sum_{i=2}^{Ni-2} \sum_{k=2}^{Nk-1} \Delta Q_{л.г.}\,. \qquad (15)$$

Теплота, выделившаяся в огневых простенках камеры при сгорании летучих газообразных веществ в процессе обжига:

$$Q_{л.г..} = m \sum_{\tau=\tau_{н.в.}}^{\tau=\tau_{к.в.}} Q_{л.г.}^{\Delta\tau}\ , \qquad (16)$$

где $\tau_{н.в.}$ и $\tau_{к.в.}$ – время начала и конца выделения летучих газообразных веществ, которое зависит от температуры в элементах анода.

Теплота, выделившаяся от сгорания смолистых веществ, рассчитывается аналогично.

Теплотой воздуха $Q_{в}$, подсасываемого в огневые простенки камеры и физической теплотой топлива $Q_{ф}$ можно пренебречь, т.к. их величины незначительны.

Теплота от сгорания засыпки $Q'_{зас.}$ определяется по известному количеству сгоревшей засыпки и теплоте её сгорания $Q^{р}_{н\,зас}$. Количество сгоревшей засыпки задается зависимостью, полученной на основе экспериментальных данных.

Определив составляющие теплового баланса за процесс обжига, можно найти теплоту, выделившуюся при сгорании топлива $Q_{топл.}$.

По известной теплоте сгорания топлива $Q_н^р$ можно определить количество топлива $B_{топл.}$, необходимого для осуществления процесса обжига анодов по заданному температурному графику.

Библиографический список

1. Колодин, Э.А. Обжиг анодов для алюминиевых электролизеров / Э.А. Колодин, В.А. Свердлин // Серия: Производство легких металлов и электродной продукции. – М.: 1980. – 43 с.

2. Пути повышения эффективности работы обжиговых печей для анодов / В.А. Свердлин, С.Ф. Егоров, А.И. Грибанов и др. // Цветные металлы. – 1989. – № 1. – С. 72–74.

3. Математическое моделирование при проектировании обжиговых печей электродной промышленности / Ю.А. Короленко, А.Н. Бабин, А.И. Грибанов и др. // Цветные металлы. – 1983. – № 10. – С. 51–54.

К содержанию

УДК 620.9.002.5 + 658.567:620.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ И ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕРАБОТАННОГО МУСОРА В КАЧЕСТВЕ ВТОРИЧНОГО ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ

К.В. Голубкова, Т.Б. Жиргалова

Рассмотрены способы утилизации твердых бытовых отходов. Показано применение переработанного мусора в качестве вторичного энергоносителя.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, энергетика.

Безусловно, составные элементы энергетики отрицательно воздействуют на окружающую нас биосферу – это загрязнение воздуха выбросами с дымовыми газами ТЭС, загрязнение водоемов выбросами со сточными водами станций, уменьшение природных ресурсов, используемых для производства электричества и тепла и т.д. [1–17]. Но есть и положительное воздействие энергетики на окружающую среду – использование энергетического оборудования для утилизации твердых бытовых отходов и применение переработанного мусора в качестве вторичного энергоносителя.

Несмотря на длительную свою историю, человечество пока еще так и не нашло приемлемого способа избавления от твердых отходов: 73 % твердых бытовых отходов в США и 97 % в России собираются муниципальными службами или в отдельных случаях частными компаниями и вывозятся за город на свалки [1]. Свалка отходов или сброс их в море – это простое перекладывание наших проблем на плечи наших потомков. Отходы на официальной свалке принято либо зарывать в землю, либо просто вываливать, а уж потом засыпать землей. При этом могут возникнуть следующие проблемы: загрязнение грунтовых вод, накопление взрывоопасного газа. В связи с этим во многих странах стали принимать более строгие законы, регламентирующие размещение свалок, их конструкцию и эксплуатацию. Основополагающее требование – захороненные отходы не должны вступать в контакт ни с поверхностными или подземными водами, ни с воздухом, поэтому свалки располагают на возвышенностях и местах с глубоким залеганием грунтовых вод.

В настоящее время существует ряд способов хранения и переработки твердых бытовых отходов, а именно: предварительная сортировка, санитарная земляная засыпка, сжигание, биотермическое компостирование, низкотемпературный пиролиз, высокотемпературный пиролиз.

Биотермическое компостирование – этот способ утилизации твердых бытовых отходов основан на естественных, но ускоренных реакциях трансформации мусора при доступе кислорода в виде горячего воздуха при температуре порядка 60 °С. Биомасса ТБО в результате данных реакций в биотермической установке (барабане) превращается в компост. Однако для реализации этой технологической схемы исходный мусор должен быть очищен от крупногабаритных предметов, а также металлов, стекла, керамики, пластмассы, резины. Полученная фракция мусора загружается в биотермические барабаны, где выдерживается в течение 2 суток с целью получения товарного продукта. После этого компостируемый мусор вновь очищается от черных и цветных металлов, доизмельчается и затем складируется для дальнейшего использования в качестве компоста в сельском хозяйстве или биотоплива в топливной энергетике [2].

К сожалению, в мире пока еще бытует мнение, что наиболее эффективным методом избавления от бытового мусора является его сжигание. Сжигание бытового мусора, помимо снижения объема и массы, позволяет получать дополнительные энергетические ресурсы, которые могут быть использованы для централизованного отопления и производства электроэнергии. Сжигание можно разделить на два вида: непосредственное сжигание, при котором получается только тепло и энергия, и пиролиз, при котором образуется жидкое и газообразное топливо.

Способ утилизации бытовых отходов пиролизом известен достаточно мало в нашей стране из-за своей дороговизны. Технология пиролиза за-

ключается в необратимом химическом изменении мусора под действием температуры без доступа кислорода. По степени температурного воздействия на вещество мусора пиролиз как процесс условно разделяется на низкотемпературный (400–900 °С) и высокотемпературный (свыше 900 °С).

Преимущества низкотемпературного пиролиза: небольшая мощность оборудования, легкость хранения и транспортировки получаемых продуктов, при пиролизе не происходит восстановления (выплавки) тяжелых металлов. С помощью пиролиза можно перерабатывать составляющие отходов, неподдающиеся утилизации, такие как автопокрышки, пластмассы, отработанные масла, отстойные вещества. Установки или заводы по переработке твердых бытовых отходов способом пиролиза функционируют в Дании, США, ФРГ, Японии и других странах.

Технологическая схема высокотемпературного пиролиза предполагает получение из биологической составляющей (биомассы) отходов вторичного синтез-газа с целью использования его для получения пара, горячей воды, электроэнергии [4]. Технологическая цепь утилизации состоит из четырех последовательных этапов: отбор из мусора крупногабаритных предметов, цветных и черных металлов с помощью электромагнита и путем индукционного сепарирования; переработка подготовленных отходов в газофикаторе для получения синтез-газа и побочных химических соединений: хлора, азота, фтора, а также шкала при расплавлении металлов, стекла, керамики; очистка синтез-газа с целью повышения его экологических свойств и энергоемкости, охлаждение и поступление его в скруббер для очистки щелочным раствором от загрязняющих веществ соединений хлора, фтора, серы, цианидов; сжигание очищенного синтез-газа в котлах-утилизаторах для получения пара, горячей воды или электроэнергии.

В настоящее время топливо из бытовых отходов получают в измельченном состоянии, в виде гранул и брикетов. Предпочтение отдается гранулированному топливу, так как сжигание измельченного топлива сопровождается большим пылевыносом. Кроме того, при сжигании гранулированного топлива намного выше КПД котла. Мусоросжигание обеспечивает минимальное содержание в шлаке и золе разлагающихся веществ, однако оно является источником выбросов в атмосферу. Надо отметить, что технология ТБО развивалась в период, когда не были еще ужесточены нормы выброса газовой составляющей. Однако сейчас стоимость газоочистки на мусоросжигательных заводах резко возросла. Даже на самых современных установках не происходит полного сгорания отходов, и образуются очень мелкие частицы, состоящие из пепла, пыли, сажи и различные газообразные продукты, такие как хлористый водород, фториды, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды. Чтобы не допустить загрязнения атмосферы, современные заводы такого рода оборудуются специальными очистительными устройствами – электрофильтрами, установками влажной газоочистки.

Все мусоросжигательные предприятия являются убыточными. В этой связи разрабатываются новые способы переработки бытовых отходов [6]. Принципиально новый для России мусоросжигательный завод производительностью 300 тыс. тонн ТБО в год был построен в Москве в 2002 году. Завод состоит из отделений подготовки и сортировки ТБО, сжигания неутилизируемой части ТБО, очистки дымовых газов от вредных примесей, переработки золы и шлака, энергоблока и других вспомогательных отделений. Следует отметить, что низкие параметры пара, применяемые на отечественных мусоросжигательных заводах (G=15-35т/ч, p=16ата, t=240 °С), существенно снижают удельные показатели по выработке электроэнергии по сравнению с паросиловыми электростанциями(G=640т/ч, p=140ата, t=540 °С). Применение аналогичных мощностей и параметров пара на мусоросжигательных заводах ограничено свойствами сырья: кусковым топливом, низкой температурой плавления золы и коррозионными свойствами дымовых газов, получаемых при сжигании [7].

Биогаз, получаемый на полигонах ТБО, является также одним из перспективных источников энергии ввиду масштабов и стабильности образования, расположения и низкой стоимости добычи. При разложении бытовых отходов выделяется биогаз, содержащий до 60 % метана, что позволяет выделить следующие основные направления использования отходов: в качестве топлива для получения горячей воды или пара на покрытие технологических нужд очистных сооружений или сельскохозяйственных производств; в качестве топлива для получения теплого воздуха или горячих газов на сушку сельхозпродукции или обогрев сельскохозяйственных зданий; в качестве горючего для двигателей транспортных средств; для получения электроэнергии; для подпитки сетей природного газа.

На полигонах ТБО образующийся биогаз собирается с помощью систем горизонтальных или вертикальных труб. Эти тубы диаметром 10–15 см по всей длине имеют щели и отверстия, через которые проникает газ. Горизонтальные трубы закладываются, как правило, на ранних этапах создания полигона ТБО, а вертикальные могут закладываться заранее (что намного дешевле) либо буриться после. Трубы обязательно обсыпаются дренажным материалом (щебенка). Биогаз через систему вертикальных и горизонтальных труб, расположенных в толще ТБО, поступает в газопровод, а затем в газосборный пункт, которых может быть несколько. После главного газосборного пункта газ идет на системы очистки, затем на компрессорные устройства, для создания давления, необходимого для дальнейшего транспорта газа по трубопроводам к месту его потребления. На вновь создаваемых полигонах или новых участках полигонов можно с наращиванием высоты отходов откачивать газ снизу или монтировать систему сбора газа с горизонтальными или слегка наклонными газопроводами, которая по мере заполнения полигона дополняется газовыми скважинами. На существую-

щих участках полигонов, как правило, практикуется бурение скважин [6]. Во избежание расходов на бурение при эксплуатации полигона газовые скважины можно сооружать в процессе заполнения полигона.

Во Франции добывается около 40 млн. $м^3$/год биогаза. На одной из свалок вблизи Парижа была построена БиоТЭС, использующая биогаз, эмиссия которого составляет 1500 $м^3$/сут.

Твердые бытовые отходы – это богатый источник вторичных ресурсов (в том числе черных, цветных, редких и рассеянных металлов), а также «бесплатный» энергоноситель, так как бытовой мусор – возобновляемое углеродсодержащее энергетическое сырье для топливной энергетики.

На основе рассмотренного материала было выделено три основных направления энергетической утилизации твердых бытовых отходов: высокотемпературная газификация, совмещенная компоновка ТЭС для сжигания природного топлива и твердых бытовых отходов, захоронение с получением биогаза.

Высокотемпературная газификация позволяет экономически выгодно, экологически чисто и технически относительно просто перерабатывать твердые бытовые отходы без их предварительной подготовки – сортировки, сушки и т.д. Такой способ утилизации дает возможность получить: вторичную энергию в виде горячей воды или перегретого водяного пара с подачей их потребителю, а также вторичную продукции в виде гранулированного шлака и металла.

Совмещенная (интегральная) компоновка ТЭС для сжигания природного топлива и твердых бытовых отходов позволит эффективно использовать сжигание бытовых отходов в 2–3 раза. При использовании такого метода утилизации ТБО стоимость основного топлива, используемого на ТЭС, может быть полностью покрыта средствами от приема ТБО.

Количество биогаза, генерируемого на свалках, колеблется от 10 до 1200 $м^3$/ч. Мощность установок для производства электроэнергии из биогаза составляет от десятка кВт до нескольких тыс. кВт, что позволяет обеспечивать энергией от нескольких домов до небольшого поселка. Нередко биогаз используется в качестве топлива в энергетических установках с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). Себестоимость полученной энергии на установках с ДВС примерно в 2–2,5 раза ниже тарифов на электроэнергию для населения.

Библиографический список

1. Мариненко, Е.Е. Основы получения и использования биотоплива для решения вопросов энергосбережения и охраны окружающей среды в жилищно-коммунальном и сельском хозяйстве: Учеб. пособие для вузов / Е.Е. Мариненко. – Волгоград: ВолгГАСА, 2010. – 100 с.

2. Малофеев, В.М. Биотехнология и охрана окружающей среды: Учеб. пособие для вузов / В.М. Малофеев. – М.: Издательство Арктос, 2008. – 188 с.

3. Мусоросжигательные заводы: за и против. – URL: http://www.i-mash.ru/materials/opinions/29960-musoroszhigatelnye-zavody-za-i-protiv.html.

4. Экспертиза: каким должен быть «зеленый» мусоросжигательный завод. – URL: http://ecoleaks.info/musoroszhigatelnyiy-zavod-mozhet-byit-zelenyim.

5. Твёрдые бытовые отходы. – URL: http://www.naturekeepers.ru/направление-стиль-жизни-и-окружающая-среда/подпрограмма-ресурсосбережение/твёрдые-бытовые-отходы-тбо.

6. Вторичное использование твердых бытовых отходов. – URL: http://glavmusor.ru/articles/Vtorichnoe_ispolzovanie_tverdyx_bytovyx_otxodov.

7. Энергетическое использование биогаза полигонов твердых бытовых отходов. – URL: http://baltfriends.ru/node/66.

8. Джундубаев, А.К. Выбор основных параметров гидротранспортной системы топливоснабжения перспективной Каракечинской ГРЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1.– № 1. – С. 102–105.

9. Джундубаев, А.К. Выбор рациональной системы транспортирования каракечинского бурого угля к промплощадке перспективной Кавакской ТЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 106–110.

10. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

11. Использование водоугольных суспензий в энергетике / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 242–247.

12. Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

13. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конф. студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

14. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

15. Зимовец, И.А. Две проблемы повышения эффективности старых угольных котлов при сжигании природного газа / И.А. Зимовец, Г.Ф. Гарифуллина, В.Н. Потапов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 126–129.

16. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла № 8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

17. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Междунар. научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

К содержанию

УДК 621.181

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ОАО «НОВОРЯЗАНСКАЯ ТЭЦ» ПУТЕМ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛА ТГМ-84А

К.В. Голубкова, Т.Б. Жиргалова

Разработан проект реконструкции котла ТГМ-84А Новорязанской ТЭЦ. Рассмотрены возможные энергосберегающие мероприятия. Выполнена экономическая оценка срока окупаемости проекта.

Ключевые слова: котельный агрегат, ТГМ-84А, энергосбережение.

В настоящее время примерно половина потребляемых в России топливно-энергетических ресурсов расходуется на выработку электрической и тепловой энергии. Часть этой энергии приходится на долю тепловых электростанций [1–12].

Одной из таких электростанций является ООО «Ново-Рязанская ТЭЦ» – крупнейший производитель тепловой и электрической энергии в г. Рязани. Большую социальную значимость ТЭЦ определяет ее доля в обеспечении областного центра тепловой энергией – теплоэлектростанция снабжает теплом и горячей водой более 60 процентов жилищно-коммунальной сферы города Рязани – это жилые массивы Октябрьского, Железнодорожного и Советского округов областного центра. Ежегодно в течение отопительного сезона станция по объему отпуска может полностью покрывать потребности г. Рязани в электрической энергии, а в общем балансе потребления электроэнергии по Рязанской области доля поставляемой от ТЭЦ электроэнергии достигает 40 %. Среди промышленных потребителей ТЭЦ крупные предприятия Южного промышленного узла: ЗАО «Рязанская нефтеперерабатывающая компания», ЗАО «Многоотраслевая производственная компания «КРЗ» и еще более 20 предприятий областного центра.

Ново-Рязанская ТЭЦ с 1959 года является важнейшим объектом энергообеспечения города. Установленное на ТЭЦ оборудование преимущественно выработало свой ресурс и уступает современному из-за значительного физического и морального износа. Уменьшение объема инвестиций в промышленность, отсутствие у электростанций достаточной материальной базы и финансовых средств не позволяет осуществить техническое перевооружение. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы модернизации действующего оборудования и технологий. Большой интерес в этом направлении представляет повышение экономичности тепловых электростанций путем замены в котлах конвективных поверхностей нагрева на новые, более совершенные поверхности. Такие поверхности обладают высокой тепловой эффективностью и компактностью.

Целью нашего проекта является модернизация котельного агрегата ст. № 9 ТГМ-84А, путем замены гладкотрубного водяного экономайзера на водяной экономайзер с поперечным оребрением труб. Такая реконструкция позволит повысить эксплуатационную надежность котла, улучшить экологические показатели, устранить выявленные при эксплуатации недостатки и отклонения от проектных показателей; получить дополнительное количество теплоты для технологических нужд. Установка нового оборудования приведет к усовершенствованию технологий, все время стремящихся в будущее.

В результате проделанной работы была разработана конструкция оребренного экономайзера, проведены тепловые и конструкторские расчеты, разработаны вопросы автоматизации, рассчитаны технико-экономические показатели проекта.

Как известно, конвективные поверхности нагрева представляют собой громоздкую и дорогостоящую часть современных котлоагрегатов. Повышение экономичности и надежности котлов в значительной мере опреде-

ляется возможностями размещения поверхностей нагрева. Место для размещения конвективных поверхностей в действующих котлоагрегатах, как правило, ограничено стесненными габаритами конвективной шахты. С другой стороны, металл, из которого изготовлены хвостовые поверхности, является более дешевым по сравнению с легированными сталями пароперегревательных поверхностей, и поэтому замена хвостовых поверхностей экономически более выгодна.

Проведенные отечественными котлостроительными заводами работы по созданию и освоению технологий для изготовления поверхностей нагрева из труб с различными видами наружного приварного оребрения открывают широкие возможности использования преимуществ таких поверхностей перед гладкотрубными. Как известно, эти преимущества являются следствием более высокой интенсивности теплообмена. Использование оребренных поверхностей позволяет сократить общую длину труб поверхности нагрева, уменьшить ее металлоемкость, габариты, гидравлические сопротивления, повысить надежность работы котла. Одновременно, развитые поверхности позволяют значительно эффективнее, по сравнению с гладкотрубными, использовать трехмерное пространство конвективной шахты котла, что обеспечивает уменьшение габаритов или увеличение тепловосприятия конвективного газохода.

Использование оребренных поверхностей нагрева при модернизации действующих котельных установок рассматривается и в зарубежных публикациях. Однако отечественные работы по модернизации действующих котлоагрегатов опережают их как по уровню, так и по времени. Производство таких поверхностей к настоящему моменту хорошо освоено на Подольском машиностроительном заводе (ЗИО) и Таганрогском котлостроительном заводе (ТКЗ).

На сегодняшний день водяной экономайзер с применением оребренных труб можно увидеть на многих электростанциях России (котлы производительностью 200÷1650 т/ч): Нижнетуринская ГРЭС, Серовская ГРЭС, Верхнетагильская ГРЭС, Красногорская ТЭЦ, Богословская ТЭЦ; Троицкая ГРЭС, Южноуральская ГРЭС, Аргаяшская ТЭЦ и др. Установка водяного экономайзера на оребренных трубах вместо гладкотрубного (рассчитанного на одинаковый теплосъем) позволяет:

– снизить общую металлоемкость, а, главное, уменьшить расход труб в 2÷2,5 раза, заменяя высвобождающуюся их часть гораздо более дешевой лентой оребрения;

– упростить монтажные работы, снизить в 2÷2,5 раза количество сварных стыков труб;

– снизить аэродинамическое сопротивление поверхности;

– значительно снизить золовой износ;

– упростить компоновочные решения.

При этом водяной экономайзер на оребренных трубах легко вписывается вместо существующего гладотрубного без изменения габаритных размеров конвективной шахты.

Удельная стоимость изготовления одной тонны оребренной поверхности несколько выше стоимости изготовления одной тонны штатной (гладкой) поверхности, но общий тоннаж оребренного водяного экономайзера значительно ниже гладкотрубного – общая стоимость поперечно-оребренного экономайзера на 10–15 % ниже стоимости штатного гладкотрубного экономайзера, рассчитанного на одинаковый теплосъем (включая материалы, изготовление, проектные работы).

Для выявления экономической эффективности проектного решения проведем технико-экономическое обоснование, позволяющее сделать вывод о целесообразности принятого задания на проектирование. Расчет проведем по укрупненным технико-экономическим показателям.

В качестве базового варианта для сравнения рассмотрим котельный агрегат ст. № 9 ТГМ-84А с гладкотрубным водяным экономайзером, а в качестве проектного котельный агрегат с оребренным водяным экономайзером.

В качестве критерия предварительной оценки эффективности используется срок окупаемости дополнительных капиталовложений в модернизацию котла, который находится по формуле:

$$T = \Delta K / (И_1 - И_2) \quad (1)$$

где ΔK – капитальные затраты на модернизацию энергоблока, тыс. руб.; $И_1, И_2$ – суммарные годовые издержки в базовом и проектном вариантах, тыс. руб.;

Величина ΔK по предварительным расчетам равна 4700 тыс. руб.

Издержки в базовом варианте находим по формуле:

$$И_1 = И_т + И_{ам} + И_р \quad (2)$$

где $И_т$ – издержки на топливо; $И_{ам}$ – амортизационные отчисления; $И_р$ – издержки на ремонт.

Издержки на оплату труда, социальные и прочие отчисления, платежей за загрязнение окружающей среды принимаем в обоих вариантах условно постоянными и в расчетах не учитываем.

$И_1$=570917+9830+1966=582713, тыс. руб./год.

2) Расчет годовых издержек в проектном варианте:

$$И_2 = И_т + И_{ам} + И_р - \Delta Э_{ээ} \quad (3)$$

где $И_т$ – издержки на топливо; $И_{ам}$ – амортизационные отчисления; $И_р$ – издержки на ремонт; $\Delta Э_{ээ}$ – экономический эффект.

Годовые издержки после модернизации равны:

$$И_2=570917+10300+2060-2914=580363, \text{ тыс. руб./год.}$$

Срок окупаемости дополнительных капиталовложений:

$$T=\frac{4700}{582713-580363}=2, \text{ года.}$$

Так как экономия издержек при замене водяного экономайзера может составить 2350 тыс. руб./год и срок окупаемости равен 2 года, считаю, проведенная модернизация экономически обоснована.

Библиографический список

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб. : НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

2. Богомолов, В.В. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.

3. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

4. Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

5. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

6. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

7. Зимовец, И.А. Две проблемы повышения эффективности старых угольных котлов при сжигании природного газа / И.А. Зимовец, Г.Ф. Гарифуллина, В.Н. Потапов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергети-

ке и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 126–129.

8. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла № 8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

9. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

10. Баева, М.Н. Проблема распределения затрат топлива на производство электрической и тепловой энергии / М.Н. Баева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 44–47.

11. Горсткин, Д.А. К вопросу о методах распределения затрат теплоты и топлива по видам энергетической продукции / Д.А. Горсткин, Д.М. Суворов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 85–87.

12. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

К содержанию

УДК 621.181 + 621.181.8

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА СТ. № 7 НИЖНЕТАГИЛЬСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ КПД КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Д.Х. Нуреева, Т.Б. Жиргалова

Рассмотрен проект реконструкции пароперегревателя котла ст. № 7 Нижнетагильского металлургического комбината. Проводимые мероприятия позволяют повысить коэффициент полезного действия котельного агрегата.

Ключевые слова: пароперегреватель, котельный агрегат.

На современном этапе развития очень важным становиться проблема ее взаимодействия с окружающей средой [1–12]. Потребляя огромное количество первичных ресурсов в виде твердого, жидкого и газообразного топлива традиционные металлургические предприятия выбрасывают в окружающую среду огромное количество отходов. Физическую теплоту и теплоту сгорания можно использовать для выработки электрической и теплой энергии.

Нижнетагильский металлургический комбинат является крупнейшим в мире предприятием по переработке ванадийсодержащих титаномагнетитовых руд с извлечением ванадия в товарный продукт в доменном и конвертерном переделах по специальным технологиям. Комбинат производит ванадиевый чугун, ванадиевый шлак (основное сырьё для извлечения ванадия), первородную конвертерную сталь, природно-легированную ванадием, широкую гамму металлопроката для железнодорожного транспорта.

На комбинате широко используется метод утилизации отработанных промышленных газов (доменного, коксового, конвертерного). Установленная мощность ТЭЦ составляет 149,9 МВт, УСТК-5,7 МВт, ГУБТ за ДП № 6–12 МВт. На ТЭЦ установлено 9 паровых и 3 водогрейных котлов, которые обеспечивают комбинат собственной электрической энергией (на 50,1 %), горячей водой и паром.

В данном проекте реконструкция парового котла № 7. котельный агрегат ПК-14-2М (ст № 7) изготовления Подольского котельного завода введен в эксплуатацию в 1965 году и предназначен для получения перегретого пара с параметрами $t_{пе}$=540 °С и $P_{пе}$=100 кгс/см^2 при температуре питательной воды 220 °С. Номинальная проектная паропроизводительность 220тн/ч. Котел имеет П-образную компоновку и состоит из топочной камеры, поворотного газохода и опускной конвективной шахты.

На период поставки котла (начало 1960-х годов), в связи отсутствия природного газа на НТМК, котел № 7, по проекту Подольского котельного завода предназначался для сжигания доменного газа (не более 50 % по теплу), мазута и, частично, коксового газа. С учетом поверхность нагрева

была увеличена до 2360 м^2, по сравнению с однотипными котлами, спроектированными для сжигания только газовых топлив, в том числе доменного газа до 100 % (при расчетных параметров пара и питательной воды). Суммарная проектная поверхность нагрева КПП в этих котлах не превышала 2110 м^2.

Помимо вышеизложенного, в связи с проектным топливным балансом, котел № 7 был оборудован:

- системой рециркуляции газов в топку (до 25 %) для поддержания расчетной температуры пара при сжигании мазута;
- калориферами и системой рециркуляции воздуха псоле ТВП1 в напорное патрубки дутьевых вентиляторов для защиты входных кубов ТВП от низкотемпературной сернистой коррозии;
- 20-ю горелочными устройствами для раздельного сжигания топлива

После перевода котла на сжигание только газовых топлив (природный, доменный, коксовый) проектные системы рециркуляции газов и воздуха, а также калориферы были демонтированы.

Последующая эксплуатация котла при температуре питательной воды 105–130 °С и сжигании смеси топлив с достаточно большой долей серосодержащего коксового газа и температурой воздуха перед ТВП, не превышающей 45–55 °С привела к интенсивной сернистой коррозии и загрязнению 1-ой ступени ТВП, резкому увеличению сопротивления газового тракта, и как следствие, ограничениям нагрузки котла и потребления доменного газа, в первую очередь по условиям тяги.

Основная причина существующих сложностей и, в первую очередь, ограничений по тяге является интенсивная низкотемпературная сернистая коррозия труб ТВП 1-ой ступени с соответствующими загрязнениями и дальнейшим забиванием труб продуктами коррозии.

Вышеизложенное наглядно подтверждается и результатами поверочных расчетов котла, выполненных с учетом зафиксированных при опытном исследовании значений разряжения за котлом, избытков воздуха по газовому тракту, а также температур уходящих газов, параметрами пара и питательной воды.

Исходя из результатов опытного обследования можно выделить следующие мероприятия по модернизации горелок и конвективной шахты, а именно:

1) установка взамен 20-ти существующих горелок, 4-х прямоточно-вихревых горелочных устройств типа МПВСр;

2) изменение конструктивно-компоновочной схемы конвективной шахты и схемы подачи воды в котел, заключающейся в:

– демонтаж ТВП 1-ой ступени и замещение его дополнительными экономайзерными пакетами, соединяемыми последовательно с существующим экономайзеров 1 –ой степени;

– подвод воды после узла питания, непосредственно в дополнительный экономайзер, последовательным возвратом после экономайзера 1-ой степени к узлу и далее, с сохранением схемы обвязки поверхностного пароохладителя и конденсатора, к вхожным коллекторам существующего экономайзера 2-ой ступени.

Выводы

Модернизация котла с заменой существующих горелок многотопливным прямоточно-вихревые горелочными устройствами типа МПВСр и установкой вместо ТВП 1-ой ступени дополнительных пакетов экономайзера с подачей в них питательной воды с температурой 135 °С, позволит (с учетов опыта внедрения таких мероприятий на однотипных котлах отрасли): обеспечить полное сгорание топлив при минимальных значениях коэффициентов воздуха (α=1,05–1,07); повысить надежность горелок, упростить их обслуживание и ремонт; упростить процесс поддержания требуемых значений температцры перегретого пара при увеличении потребления доменного газа за счет интенсификации теплообмена в топке и работы с минимального избытками воздуха; полностью исключить низкотемпературную коррозию «хвостовых» поверхностей нагрева при эксплуатационно-необходимых расходах коксового газа на котел; обеспечить значительное снижение температуры уходящих газов в сопоставимых режимах, а также зависимость этого параметра от тепловой доли доменного газа и нагрузки котла.

Библиографический список

1. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

2. Богомолов, В.В. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справ. / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.

3. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

4.Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

5. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

6. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

7. Зимовец, И.А. Две проблемы повышения эффективности старых угольных котлов при сжигании природного газа / И.А. Зимовец, Г.Ф. Гарифуллина, В.Н. Потапов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 126–129.

8. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла № 8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

9. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

10. Баева, М.Н. Проблема распределения затрат топлива на производство электрической и тепловой энергии / М.Н. Баева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 44–47.

11. Горсткин, Д.А. К вопросу о методах распределения затрат теплоты и топлива по видам энергетической продукции / Д.А. Горсткин, Д.М. Суворов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 85–87.

12. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

К содержанию

УДК 621.1 + 66.047.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСПАРИТЕЛЕЙ МГНОВЕННОГО ВСКИПАНИЯ В ТЕПЛОВОЙ СХЕМЕ ТЭЦ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА

Т.Б. Жиргалова

Рассмотрен вариант использования испарителей мгновенного вскипания в тепловой схеме ТЭЦ.

Ключевые слова: тепловая схема, испаритель.

Установка ИМВ-50. Впервые испарительная установка ИМВ-50 была смонтирована и введена в эксплуатацию на Уфимской ТЭЦ-2 ОАО «Башкирэнерго» в 2000 году. На ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго» две подобные установки были установлены и введены в эксплуатацию в 2001 году. Монтаж установок вел МУ-2 ЗАО «Востокметаллургмонтаж». В 2003 году состоялся запуск установки испарителя мгновенного вскипания (ИМВ-50) на Безымянской ТЭЦ АО «Самарэнерго».

В настоящее время подобные установки вводятся в эксплуатацию на многочисленных ТЭЦ России [1, 2].

В технологическом цикле металлургического комбината используется пар на производство, который не возвращается на ТЭЦ или не пригоден для дальнейшего использования. Недостачу конденсата восполняют химочищенной водой, которая имеет весьма высокое солесодержание и использование ее в качестве подпиточной в питательную воду котлов приводит к образованию отложений на поверхностях нагрева, что снижает мощность, К.П.Д. котла, увеличивает срок ремонта, так как процесс удаления внутренних отложений в экранных трубах очень трудоемок и требует использования специального оборудования [3].

Для повышения надежности работы котлов ст. №1,2 ТЭЦ ОАО «Мечел-Энерго» введена в строй термообессоливающая установка, которая должна была восполнять потери конденсата. Она предназначена для получения обессоленной воды высокого качества (солесодержание менее 1 мг/л) для котлов высокого давления тепловых электростанции и промышленных предприятий. Отличается от известных технологий водоподготовки высокой экономичностью и экологичностью [4, 5].

Термообессоливающая установка, установленная на ТЭЦ ОАО «Vtxtk-“ythuj» производительностью 100 т/ч состоит из двух автономных параллельно включенных установок ИМВ-50-18. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Каждый из двух испарителей мгновенного вскипания ИМВ-50-18, входящих в состав термообессоливающей установки скомпанован из элементов как стандартного, так и нестандартного оборудования (разработано отечественными предприятиями).

Испаритель мгновенного вскипания ИМВ-50 (рис. 1) состоит из двух корпусов, представляющих собой вертикальные сборки из трех секций. В каждую секцию входят три горизонтальные ступени, расположенные друг над другом. В таблице 1 представлены основные технические характеристики испарительной установки ИМВ-50-18.

Таблица 1

Основные технические характеристики испарительной установки ИМВ-50-18

№ п/п	Наименование параметра	Количественная характеристика
1	Производительность по дистилляту (номинальная), т/ч	50
2	Габариты: – высота, м – длина, м – ширина, м	 7,9 5,8 4,3
4	Теплообменная поверхность, $м^2$	4560
5	Число ступеней, шт.	18
6	Расход циркуляционной воды: – первого контура, т/ч – второго контура, т/ч	 500 500
7	Расход греющего пара (1,5 ата), т/ч	4,8

Ступени испарителя представляют собой плоскостенный сосуд, разделенный на две части: камеру расширения и камеру конденсации. Высота ступеней 700 мм, длина – 5850 мм, ширина – 1640 мм. В камере расширения расположены водоперетечные устройства и жалюзийный сепаратор. В камере конденсации расположены трубки, охлаждаемые потоком циркуляционной воды, либо сторонним потоком. Трубки крепятся к трубным доскам сваркой. Трубные доски являются также элементами опорной системы испарителя. В камере конденсации выполнены устройства для сборки и отвода неконденсируемых газов. С целью исключения повторного растворения этих газов в охлажденном дистилляте предусмотрен участок с обратным движением потока. С торцов камеры конденсации закрываются съемными крышками.

Отвод неконденсируемых газов осуществляется из ступени в ступень по каскадной схеме – из 1-й и из 10-й до 9-й и 18-й. Из 9-й и 18-й ступеней газы отводятся с помощью эжектора типа ЭВ-200 по самостоятельным трубопроводам.

ИМВ-50 выполнен двухконтурным по выпариваемой воде, циркуляция которой осуществляется следующим образом:

1) первый контур: 9-я ступень – бак – циркуляционный насос – конденсаторы 7-1, 6-й, 5-1,...1-й ступеней – головной подогреватель камеры расширения последовательно 1-й, 2-й,….9-й ступеней.

2) второй контур: 18-я ступень – бак – циркуляционный насос – конденсаторы 16-й, 15-й,….,10-й ступеней (расположены во втором блоке) – конденсаторы 9-й и 8-й ступени (расположены в первом блоке) – камера расширения 1-й и далее последовательно до 18-й ступени расширения.

Исходная вода из деаэратора самотеком поступает в циркуляционный бак первого контура. Продувка 1-го контура является подпиткой второго. Максимальная температура циркуляционной воды первого контура 104 ^{o}C, второго 70 ^{o}C. Расход циркуляционной воды в каждом контуре равен 500…550 м^3/ч. Сопротивление каждой ступени по водяной стороне не более 2,5 мм. вод. ст.

Установка работает следующим образом: циркуляционная вода, подогретая в головном подогревателе, поступает в коллектор и далее через патрубки на водораспределитель 1-й ступени. На водораспределителе циркуляционная вода диспергируется (разбрызгивается) на отдельные струи и попадает в свободный объем камеры расширения, где вскипает, так как имеет температуру, превышающую на 3…4 ^{o}C температуру насыщения в данной ступени. Образующийся пар, пройдя сепаратор, конденсируется на трубках конденсатора. Конденсат (дистиллят), образовавшегося пара, собирается на днище камеры конденсации следующей ступени.

Из 9-й ступени дистиллят поступает в бак сбора конденсата 1,4 м^3, а из него дистиллятным насосом в деаэратор № 3 или в баки 57 м^3 № 1 или № 2 (в турбинном цехе № 1).

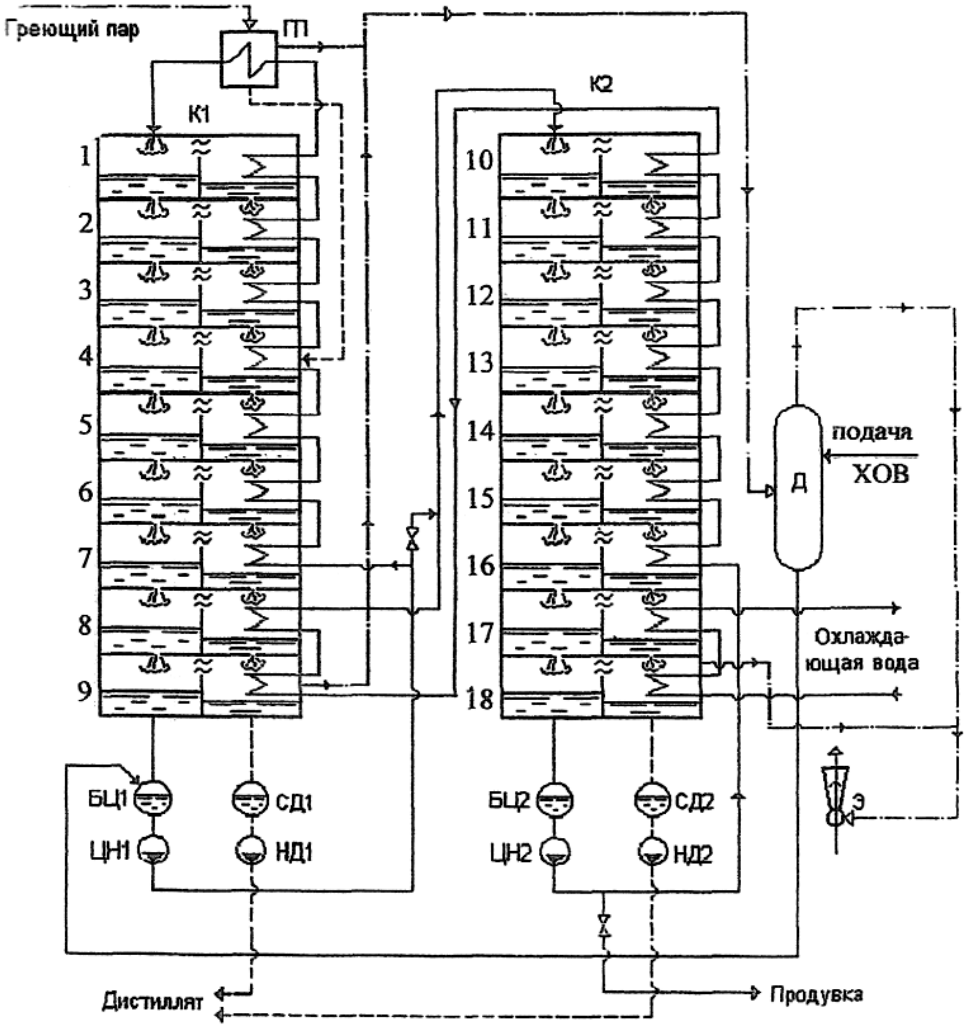
Неиспарившаяся циркуляционная вода из камеры расширения 1-й ступени через перетечные устройства поступает во 2-ю ступень, где процесс протекает аналогичным образом. После камеры расширения 9-й ступени циркуляционная вода поступает в бак сбора циркуляционной воды и далее насосом подается в конденсатор 7-й ступени. Затем последовательно она проходит конденсаторы остальных ступеней, подогреваясь паром, генерируемым в каждой ступени. Подогрев циркуляционной воды в конденсаторе каждой ступени осуществляется примерно на ту же температуру, на которую осуществляется снижение температуры циркуляционной воды при расширении. Так, например, температура циркуляционной воды на выходе из конденсатора 1-й ступени имеет величину всего на 7,7 ^{o}C ниже температуры такой же воды на выходе в камеру расширения 1-й ступени.

Неконденсирующиеся газы из 9-й ступени отводятся через вакуумный деаэратор, где эжектором создается разряжение, а охлаждение конденсаторов 8-й и 9-й ступеней осуществляется циркуляционной водой 2-го контура, которая затем поступает в камеру расширения 10-й ступени второго блока ИМВ.

Ввиду идентичности протекания процессов в обоих блоках ИМВ отметим только следующее обстоятельство. Охлаждение конденсаторов 17-й и 18-й ступеней производится технической водой из линии циркуляционной воды ПВС. В зависимости от начальной температуры и схемы питания ис-

парителя расход охлаждающей воды может меняться от 80 до 150 т/ч. Наибольшее давление технической воды в трубной системе конденсаторов последних ступеней не должно превышать 0,6 МПа, а температура на выходе из конденсаторов этих ступеней не должна превышать 45 ^{o}C.

Бак циркуляционной воды и бак дистиллята объединены в единый блок. Принципиальная схема ИМВ-50 приведена на рисунке.



Принципиальная схема ИМВ-50: К1 – 1-я колонна ИМВ; К2 – 2-я колонна ИМВ; ГП – головной подогреватель; Д – деаэратор; Э – эжектор; БЦ1 – бак циркуляционной воды 1-й колонны; БЦ2 – бак циркуляционной воды 2-й колонны; СД1 – сборник дистиллята 1-й колонны; СД2 – сборник дистиллята 2-й колонны; ЦН1 – циркуляционный насос 1-й колонны; ЦН2 – циркуляционный насос 2-й колонны; НД1 – насос дистиллята 1-й колонны; НД2 – насос дистиллята 2-й колонны

Библиографический список

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд. стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.

2. Марков, А.О. Диалоговая система определения параметров пара, воды и расходов пара на ПВД в цикле ТЭС / А.О. Марков, Г.Г. Орлов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 211.

3. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

4. Валиюллина, М.Р. К вопросу оценки теплоэнергетической эффективности теплообменников, применяемых в теплоэнергетике / М.Р. Валиюллина, А.А. Валиюллина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 72–75.

5. Баева, М.Н. Проблема распределения затрат топлива на производство электрической и тепловой энергии / М.Н. Баева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 44–47.

К содержанию

УДК 621.1 + 621.182

ПЕРЕВОД ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЕЛЬНЫХ В МИНИ-ТЭЦ – ПУТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Т.Б. Жиргалова

Рассмотрен пример перевода отопительной котельной в мини-ТЭЦ с ДВС.

Ключевые слова: отопительная котельная, мини-ТЭЦ, утилизация теплоты отходящих газов.

В настоящее время многие из существующих ТЭЦ не могут полностью обеспечить потребность в тепловой и электрической энергии в связи с моральным и физическим износом оборудования. Увеличение мощности связано с большими капитальными затратами, которые не может предоставить настоящее состояние энергетики. Другой путь решения данной проблемы – это развитие малой энергетики. Необходимо строительство небольших котельных для покрытия новых мощностей. На базе этих котельных возможна установка миниэлектростанций с ДВС (двигателем внутреннего сгорания) [1, 2, 3, 4, 5].

К основным недостаткам крупных электростанций ТЭЦ относятся: высокая стоимость оборудования в расчете на 1 кВт мощности, длительные сроки строительства и замораживание огромных финансовых средств на длительный период, потребность в реконструкции сетей передачи электроэнергии, неэффективное использование вторичного тепла [6, 7].

Основные преимущества миниэлектростанций с ДВС – это высоко автоматизированные энергообъекты; максимально ремонтируемые на месте без привлечения завода-изготовителя или специализированной организации.

Помимо покрытия потребности в электрической мощности, возможно пользование тепла системы охлаждения и утилизация отходящих газов для обогрева, в частности, помещения котельной [8].

В большинстве случаев тепло системы охлаждения ДВС можно использовать путем установки калорифера непосредственно в отапливаемом помещении. Калорифер служит для отопительных целей зимой, включается при нагреве охлаждающей жидкости более 75 град. В некоторых случаях перед калорифером устанавливается пластинчатый теплообменник для сброса тепловой нагрузки в обратную трубу системы отопления или обратную трубу в двухтрубной системе горячего водоснабжения с баком аккумулятором. Допускается подключение закрытой отопительной системы объекта непосредственно к двигателю. В этом случае необходимо использовать подготовленную воду.

Например, возможна установка водяного экономайзера, который представляет собой сварную конструкцию формы параллелепипеда, состоящую из полости водяной рубашки, находящегося в водяной рубашке теплообменника расположенных в нижней части патрубка подвода воды и патрубка подвода выхлопных газов, а также, расположенных в верхней части патрубка отвода нагретой воды, патрубка выхода выхлопных газов, предохранительного клапана, вентиля и патрубка сброса пара. Внутри теплообменника устанавливается несколько рядов трубок, позволяющих более эффективно использовать тепло ходящих газов. Выхлопные газы проходят через теплообменник, нагревают стенки и трубки, и через дымовую трубу уходят в атмосферу. Вода, залитая в бак водонагревателя, омывает нагретые поверхности теплообменника и достигает требуемой температуры [9,10,11].

Итак, основными преимуществами миниэлектростанции с ДВС являются:

– незначительный срок окупаемости – менее года;

– выработанное тепло потенциально покрывает расходы на газ и эксплуатацию;

– для максимальной эффективности эксплуатации котельной потребление электроэнергии должно быть сведено к минимуму, так как сжигание природного газа для получения тепла менее эффективно. В противном

случае котлы должны использоваться для работы в пиковых режимах, а основной объем тепла должны давать электростанции [12];

– эффективная утилизация тепла возможна и в летний период при использовании тепла в технологии или быту (горячее водоснабжение, сушка, выпарка, горячая мойка) [13].

Библиографический список

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд. стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.

2. Лымбина, Л.Е. Поступательное развитие региональной энергетики Южного Урала / Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 195–198.

3. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

4. Торопов, Е.Е. Power-efficient pumping systems with the intellectual control / Е.Е. Торопов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 21–22.

5. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение в многоквартирных домах г. Сима / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, И.В. Юдинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 141–143.

6. Горсткин, Д.А. К вопросу о методах распределения затрат теплоты и топлива по видам энергетической продукции / Д.А. Горсткин, Д.М. Суворов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 85–87.

7. Марков, А.О. Диалоговая система определения параметров пара, воды и расходов пара на ПВД в цикле ТЭС / А.О. Марков, Г.Г. Орлов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 211.

8. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

9. Валиюллина, М.Р. К вопросу оценки теплоэнергетической эффективности теплообменников, применяемых в теплоэнергетике / М.Р. Валиюллина, А.А. Валиюллина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 72–75.

10. Гапоненко, А.М. Поле скоростей на выходе из кругового раздаточного коллектора теплообменника / А.М. Гапоненко, А.Ю. Дубоносов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 80–81.

11. Харисов, И.Д. Применение нанотехнологий для интенсификации теплообмена / И.Д. Харисов, К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 290–294.

12. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла №8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

13. Даценко, Е.Н. Определение оптимальных параметров элементов теплоэнергетических устройств и сетей методом последовательных приближений / Е.Н. Даценко, Н.Н. Авакимян, Н.И. Васильев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 96–99.

К содержанию

УДК 621.18 + 621.1

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОАО «АГРОСНАБТЕХСЕРВИС»

Т.Б. Жиргалова

Рассматривается проект системы теплоснабжения ОАО «Агротехсервис».

Ключевые слова: тепловые сети, система отопления, котельная.

В настоящее время состояние оборудования ЖКХ в основном морально и физически устарело. Практически прекратились работы по ремонту старых и прокладке новых сетей. Закономерным результатом этого стали социальные катастрофы, связанные с размораживанием целых городов. Крайняя изношенность старых трубопроводов ведет к тому, что теплопотери на них доходят до 60 %. По данным Минтопэнерго, в России на 100 км теплотрасс приходится 70 аварий в год. При этом КПД старого котельного оборудования составляет 60...70 %, а с учетом потерь в теплосетях снижается до 50 %. Есть и еще один аспект проблемы – крайняя монополизация поставщиков тепла, при которой они не заинтересованы в сокращении издержек и экономии. В результате среднедушевой расход тепла и воды в нашей стране превышает европейские показатели более чем в 2 раза [1–5].

Конечно, описанная ситуация говорит о том, что центральное отопление невыгодно и устарело. Однако существующий европейский опыт свидетельствует об обратном. Так, в Дании, во многом под влиянием советского опыта, решено было основой жилищной инфраструктуры сделать именно централизованное отопление. В результате реализации государственной программы к середине 90-х гг., доля систем централизованного теплоснабжения составляла около 60 % от общего потребления тепла (в крупных городах до 90 %). К системе ЦТ подключено более 500 тыс. когенерационных установок, обеспечивающих теплом и светом более 1 млн зданий и промышленных сооружений. Очевидно, что здесь система ЦО себя оправдывает [6, 7].

Тем не менее, в нашей стране все шире используются низкоэффективные с энергетической точки зрения котельные и иное оборудование, позволяющее получать тепло на основе газового топлива без электрической надстройки. До тех пор пока существующие проблемы центрального отопления не решены, индивидуальное отопление будет крайне востребовано.

В связи с этим было принято решение о замене устаревших котлов в котельной ОАО «Агроснабтехсервис» и о разработке индивидуальной системы отопления для производственного корпуса ОАО «Агроснабтехсервис» [8]. Изначально рассматривались три возможных варианта:

– традиционное водяное отопление;

– воздушное отопление;

– использование газовых инфракрасных излучателей (ГИИ).

Применение ГИИ имеет ряд ограничений по пожарной безопасности, в сравнении с другими вариантами. В данный момент планируется производственное помещение использовать как цех обработки металла, но впоследствии возможно его переоборудование в деревообрабатывающий цех, в связи с чем станет возможной эксплуатация излучателей из соображений противопожарной безопасности.

Преимущества воздушного способа отопления перед традиционным водяным в больших по объему помещениях очевидны, перечислим лишь основные:

– экономичность. Тепло производится непосредственно в нагреваем помещении и практически целиком расходуется по назначению. Благодаря сжиганию топлива без промежуточного теплоносителя достигается высокий тепловой КПД всей системы отопления: 90…94 % – для рекуперативных нагревателей и практически 100 % – для систем прямого нагрева;

– возможность «включить» приточную вентиляцию. В настоящее время признано энергетически целесообразным устраивать в жилых и гражданских зданиях организованную приточно-вытяжную вентиляцию с применением вентиляторных агрегатов, включающих аппараты для утилизации теплоты вытяжного воздуха на нагрев приточного наружного воздуха. Эти современные решения обеспечивают создание в помещениях комфортных параметров воздушной среды и до 60 % сокращают затраты теплоты на отопление зданий. Ни для кого не секрет, что сегодня на большинстве предприятий приточная вентиляция не работает должным образом, что значительно ухудшает условия работы людей и влияет на производительность труда. Таким образом, воздушное отопление подразумевает собой не только экономическую эффективность, но и улучшение экологической обстановки и условий труда.

А также к преимуществам можно отнести:

– простое регулирование путём изменения температуры воздуха;

– отсутствие опасности замерзания теплоносителя;

– малая инерционность;

– малые затраты.

Способ отопления крупных помещений при помощи теплогенераторов один из самых дешевых и быстро реализуемых. Капитальные затраты на строительство или реконструкцию воздушной системы, как правило, значительно ниже расходов на организацию водяного или лучистого отопления. Срок окупаемости капитальных затрат обычно не превышает одного–двух отопительных сезонов, случае он составил 1 год и 8 месяцев при расчете по приведенным затратам в сравнении с системой водяного отопления.

Себестоимость производства тепла системой воздушного отопления составит 932 рубля/Гкал, что ниже стоимости производства тепла при помощи котельной, при котором себестоимость производства тепла 1 524 руб-

ля/Гкал, что неприемлемо, так как стоимость тепла, получаемого от тепловых сетей, составляет для коммерческих организаций 1 176,7 рубля/Гкал, что значительно ниже.

Библиографический список

1. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

2. Торопов, Е.Е. Power-efficient pumping systems with the intellectual control / Е.Е. Торопов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 21–22.

3. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение в многоквартирных домах г. Сима / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, И.В. Юдинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 141–143.

4. Ильин, Р.А. Тепловые потери тепловых сетей с изоляцией Tlm Ceramic / Р.А. Ильин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 151–154.

5. Марков, А.О. Диалоговая система определения величины подпитки теплосети / А.О. Марков, Г.Г. Орлов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 210.

6. Торопов, Е.Е. Power-efficient pumping systems with the intellectual control / Е.Е. Торопов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 21–22.

7. Даценко, Е.Н. Определение оптимальных параметров элементов теплоэнергетических устройств и сетей методом последовательных приближений / Е.Н. Даценко, Н.Н. Авакимян, Н.И. Васильев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 96–99.

8. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд. стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.

К содержанию

УДК 621.1 + 621.311.22

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЭС РОССИИ

Н.Н. Каргаполова

Сегодняшнее состояние энергетики требует срочно изменить техническую политику и сделать государственным делом организацию исследований в энергетике и определить пути совершенствования управления энергообъектами России, внедрения современного оборудования, решения проблем теплоснабжения, водоподготовки, решения экологических проблем и подготовки специалистов, способных вывести энергетику России на передовые позиции.

Ключевые слова: нормативная база, автоматические системы управления, «умные сети», повышение эффективности, парогазовые установки.

Введение

В России сегодня работает 335 ТЭС, 98 ГЭС и 10 АЭС. Их установленная мощность 226 ГВТ, в т.ч. на ТЭС около 155 ГВТ. В структуре генерирующих мощностей российской энергетики доля ТЭС оставляет 68,5 % (155 млн.кВт), ГЭС – 21 %, АЭС – 10,5 %. В топливном балансе ТЭЦ газа 69,4 %, угля 28,6 %, мазута 2 %. Согласно «Энергетической стратегии России на период до 2030 года» доля угля будет составлять 34 %, а доля газа 60 %.

Сегодня более 70 % основного оборудования электростанции отработали парковый ресурс, и необходимо решить вопрос о модернизации оборудования, а также ликвидации безнадежно устаревших установок отработавших более 50 лет. Состояние, в котором находиться теплоэнергетика в большинстве районов России с учетом физического износа и морального старения, требует обновления. В арсенале российских энергетиков огромное количество разработок «новых» технологий 30 летней давности, так и не внедренных у нас.

Техническую политику, организацию фундаментальных и прикладных исследований в энергетике, создание объектов для демонстрации новых технологий и оборудования необходимо решить на государственном уровне.

Какие же пути внедрения можно наметить?

1. Управление

Совершенствование организации энергетического хозяйства предприятий и страны в целом.

Внедрение АСУ ТП [1, 3, 12].

С 70-х годов XX века в СССР и в мире начали создавать «интеллектуальные» системы и сегодня есть пилотные проекты в США, Китае, Канаде, Индии, Японии, Европе. «Smart Grid» (умные сети) – это полностью интегрированная энергосистема, оснащенная умными датчиками и способная предвидеть пиковые нагрузки и быстро перераспределять, не допуская сбоев в электроснабжении [10, 13, 16].

2. Внедрение современного высокоэкономичного оборудования

В котельном оборудовании: использование топок вихревых, циклонных, с циркулирующим «кипящим» слоем, установка дополнительных хвостовых поверхностей с целью использования тепла конденсации водяных паров в уходящих газах, имеющие 2-х светные экраны, газоплотные топки со спиральной навивкой или внутренним винтовым оребрением, применение мембранных конструкций [4, 15].

Создание котлов на альтернативном топливе (биотопливо, водоугольные суспензии и т.д.), использование интегрированных платформ электронных устройств (концепция smart grid в котлостроении); строительство котлов-утилизаторов в соответствии с мировыми стандартами таких как КУ для Новомосковской ГРЭС, изготовленный «ЗиО- Подольск» и ЮУГРЭС-2 котел П-140 [5, 9, 11, 21].

В турбинном оборудовании: замена ЦВД турбинами «Р», применение унифицированных конструкций цилиндров турбин и отдельных узлов типа паро-впуска, применение рабочих лопаток сабельной конструкции не только в ЦНД, но и в ЦВД, ЦСД, меридиональные профили лопаток ЦВСД, внедрение разно-шаговых и сотовых уплотнений, цельнофрезерных периферийных бандажей в ЦСД и ЦНД [1, 20].

Использование осевого или тангенциального подвода пара в цилиндре турбин, совершенствование аэродинамических характеристик клапанов и турбинных ступеней, совершенствование систем тепловых расширений, использование турбины Т-130-130 с промперегревом [16].

3. Создание энергоблоков

БПЭ – блоки повышенной эффективности, парогазовые установки такие как одновальные конденсационные ПГУ-400 для Шатурской и Яйвинской ГРЭС (ГТ-270 + К-130 и горизонтальным КУ); создание блоков на суперсверхкритические параметры типа Е-250/300-29,5-600/600. Первый блок К-100-30-600/600 был построен на Каширинской ГРЭС еще в 1963 году. До 2020 года необходимо освоить пылеугольные блоки на ССКП 330-800МВт и паросиловые блоки с ЦКС с КПД 45 %, а до 2035 года внедрить технологии ПГУ с внутрицикловой газификацией угля[1].

4. Теплоснабжение и теплотехнологическое оборудование

Тепловые сети в нашей стране являются наиболее уязвимым элементом системы теплоснабжения. Обеспечение тепловых нужд России выходит

далеко за пределы отраслевой энергетической задачи. Неэффективная организация этого процесса привела к огромному перерасходу энергетических, материальных и финансовых ресурсов, сделали неэкономичной теплофикацию. В России производится более 2 млрд Гкал теплоты в год, в том числе порядка 1,5 млрд централизованно, где потери составляют более 450 млн Гкал. Децентрализовано 580 млн Гкал – их потери 16 млн.

Центральной проблемой является уменьшение потерь теплоты, аварийности и износа тепловых сетей. Сегодня более 80 % теплотрасс нуждаются в замене и капитальном ремонте до 2020 года, нужно затратить 45–50 млрд дол. Для газовых котельных (41 % от общего числа) актуально преобразование их в мини-ТЭЦ, для чего нужны газовые турбины, газодизели и др., сервисные службы и ремонтная база, необходимо решить вопросы топливоснабжения, подготовки кадров.

В системах теплоснабжения есть новые технологии: использование предизолированных трубопроводов, металлопластиковые трубы, бесканальная прокладка трасс, современная тепловая изоляция, пластинчатые теплообменные трубы из сшитого полиэтилена (СПЭ); стальные трубы с пенополиуретановой изоляцией (ППУ); внедрение частотно- регулируемых приводов(ЧРП) насосов; применение оцинкованных или эмалированных внутри труб; применение датчиков повреждения теплотрасс, использование ТНУ, мембранных фильтров водоподготовки [8, 10, 13, 14, 17, 19].

5. Водоподготовка для ТЭС, АЭС и тепловых сетей

Традиционно для обеспечения водно-химического режима используют химические методы. Сегодня начинают внедрять ВПУ (водоподготовительные установки), «обратного осмоса», так на Челябинской ТЭЦ-1 при вводе в работу ПГУ запустили параллельно с традиционными H-Na-катионитными фильтрами ВПУ с мембранными фильтрами, качество очистки значительно улучшилось.

Применение противоточных H-Na- фильтров. Использование поверхностно-активных веществ (ПАВ) для создания защитных пленок на металле с увеличением срока службы оборудования (котлов, турбин, арматуры) и трубопроводов, ингибиторов [7,8].

6. Экологические проблемы

Внедрение безотходных и малоотходных технологий и с пользованием золы, шлака, уходящих газов, сточных вод на производство дополнительных продуктов; применение оборотных бессточных схем водоснабжения с каскадными способами потребителей и современными способами очистки сбросных вод.

Внедрение топок ЦКС и трехступенчатого сжигания топлива, использование водоугольного топлива улучшает экологические характеристики ТЭС [6, 15, 20].

Выводы

Комплекс проблем, связанный с формированием инновационной энергетики в России, может быть осуществлен в рамках масштабной государственной макропрограммы по направлениям:

1. Разработка микропрограммы.
2. Создание нормативно-правовой базы с закладкой мощного ресурса модернизации.
3. Определение приоритетов по отношению к нетрадиционной энергетике.
4. Преодоление ментальных барьеров общества с развитием культуры потребления и энергосберегающего образа жизни и инновационной культуры.
5. Подготовка специалистов.

Библиографический список

1. Цели и приоритеты энергетической стратегии России до 2030 года. Этапы и механизмы их реализации. – URL: http://ueip.org/energy-strategy-russia/energy-politika/innovacionnaya-nauchno-texnicheskaya/.

2. Probasco, D., Ruhlman B / Coal-fired Generation Cost and Performance Trends Power. 2011. № 5. Pp. 66–68.

3. Быценко, С.Г. Инструментальное обеспечение рынка электроэнергии. Концепция создания автоматизированной системы контроля и управления энергопотреблением / С.Г. Быценко // Промышленная энергетика. – 2008. – № 1, 2, 3, 4.

4. Некрасов, А.С. Состояние и перспективы развития теплоснабжения России / А.С. Некрасов, С.А. Воронина // Энергетик (Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН). – 2004. – № 10.

5. Малахов, В.А. Оценка экономической эффективности внедрения энергосберегающих технологий в сфере теплоснабжения / В.А. Малахов // Теплоэнергетика (Институт энергетических исследований РАН). – 2012. – № 3. – С. 70–77.

6. Рыженков, В.А. Повышение эффективности и надежности эксплуатации ТЭС и АЭС на основе применения ПАВ- технологий / В.А. Рыженков, А.В. Куршаков, И.П. Анахов // Энергетик. – 2012. – № 3.

7. Седлов, А.С. Выбор оптимального метода водоподготовки для ТЭС / А.С. Седлов, В.В Шищенко и др. // Теплоэнергетика. – 2005. – № 4; 2011. – № 8.

8. Балаева, И.С. Водоподготовка: новая противоточная технология / И.С. Балаева, Б.К. Кусманов, Н.Т. Бондарев // Аква-Терм. – 2011. – июль.

9. A. High «Efficiency PSOFC/ATS- Gas Turbine Power System. Final report. Siemens Westinghouse Power Corporation». 2001.

10. Бельчук, А.И. Проблемы модернизации российской экономики / А.И. Бельчук // Российский внешнеэкономический вестник. – 2010. – № 7. – С. 46–50.

11. Использование водоугольных суспензий в энергетике / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 242–247.

12. Юртаев, М.А. Энергосбережение за счет автоматизации центральных тепловых пунктов / М.А. Юртаев, Т.Б. Жиргалова, А.Ф. Минникаев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 304–307.

13. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

14. Саблин, А.В. Проблемы теплофикации в современных рыночных условиях / А.В. Саблин, В.Ю. Шашкин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 269–270.

15. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла №8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

16. Баева, М.Н. Проблема распределения затрат топлива на производство электрической и тепловой энергии / М.Н. Баева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 44–47.

17. Ильин, Р.А. Тепловые потери тепловых сетей с изоляцией Tlm Ceramic / Р.А. Ильин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 151–154.

18. Валиюллина, М.Р. К вопросу оценки теплоэнергетической эффективности теплообменников, применяемых в теплоэнергетике / М.Р. Валиюллина, А.А. Валиюллина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1 – С. 72–75.

19. Харисов, И.Д. Применение нанотехнологий для интенсификации теплообмена / И.Д. Харисов, К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 290–294.

20. Лымбина, Л.Е. Поступательное развитие региональной энергетики Южного Урала / Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 195–198.

21. Писцов, С.А. Анализ надежности и повышение эффективности работы тепловых сетей города / С.А. Писцов, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 260–261.

К содержанию

УДК 620.91/.98

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Н.Н. Каргаполова, М.Д. Кривкова

Рассмотрены способы повышения эффективности работы оборудования энергетического комплекса. Предложены инновационные решения для непосредственного внедрения на предприятиях энергетической отрасли. Показаны экономические, экологические и социальные проблемы отрасли и предложены пути решения этих проблем.

Ключевые слова: энергетический комплекс, органическое топливо, циркулирующий кипящий слой (ЦКС).

Введение

Энергетический комплекс, в стандартном для специалистов понимании, включает добычу ископаемого топлива, его транспортировку, переработку, подготовку и использование на тепловых электрических станциях или промышленных котельных [1–18]. Инновации – это внедренное новшество, обеспечивающее качественный рост эффективности процессов и продукции, востребованных рынком. Инновация является конечным результатом интеллектуальной деятельности человека, его фантазии, творчества, открытий, изобретений и рационализации. В современном мире инновации приобретают все большее значение для повышения конкурентоспособности и устойчивого роста национальных экономик [1].

1. Необходимость внедрения инноваций на предприятиях энергетического комплекса. Краткий обзор способов повышения эффективности производства

Основа для внедрения инноваций в производство – это «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р» [17]. Согласно этому документу топливная энергетика требует использования энергоэффективных новых решений.

Особенности развития современных теплоэнергетических отраслей состоят в том, что, с одной стороны, истощаются ресурсы естественных энергоносителей, происходит удорожание их добычи и переработки. Актуальными с другой стороны, являются проблемы экологии. В этой связи проблема рационального, в том числе экономного использования природных энергоносителей, а в равной степени и проблемы энергосбережения становятся ключевыми вопросам современной экономики.

Сокращение энергозатрат, при использовании тепловой энергии подразумевает, в частности: повышение К.П.Д. и надежности агрегатов, генерирующих тепловую энергию; использование качественных топлив, совершенствование процессов их переработки и очистки; оптимизацию процесса их сжигания, связанную с сокращением или нейтрализацией вредных выбросов; создание перспективных, с точки зрения экономии, технологий сжигания традиционных топлив; увеличение доли качественно новых энергоагрегатов, позволяющих существенно снизить затраты газообразных или жидких топлив; применение нетрадиционных и возобновляемых видов энергии (ветровой, солнечной, энергии малых и микро-ГЭС, энергии биомассы, тепловых насосов, и низкопотенциальной энергии, энергии приливов и отливов, волновой и геотермальной), позволяющих существенно снизить применение углеводородных топлив; применение альтернативных топлив (искусственных жидких и газообразных, искусственного водорода и так далее) [1–18].

Рассмотрим некоторые из перечисленных новых технологий в области топливной энергетики.

2. Углеводородный цикл

В 1990-е годы была разработана технология термической деполимеризации, которая позволяет разлагать сложные углеводородные соединения на простые, с получением смеси простых углеводородных соединений, аналогичной природной нефти – искусственной нефти.

Переработка отходов в искусственную нефть позволяет создать замкнутый цикл обращения углеводородов по схеме: нефть – органический синтез – полимеры – отходы – искусственная нефть.

В России по оценочным данным, ежегодно образуется около 1,1 млн тонн изношенных шин и 0,7 млн тонн полимерных отходов, 14,4 млн тонн древесных отходов. При этом во вторичный оборот пускается 3–4 % резинотехнических изделий и 4,2 % полимеров.

При условии выработки из тонны бытовых отходов до 300 литров искусственной нефти, из накопленного в России объема бытового мусора можно получить дополнительно до 3,8 млрд тонн искусственной нефти. Это составит 46,3 % к международно признанным запасам нефти в России и 14,9 % к российским данным по запасам нефти.

Данная технология позволит перерабатывать в высококачественное топливо малоценные виды энергоносителей: бурый уголь, сланцы, дрова, торф, органические отходы сельскохозяйственного производства, биологические отходы, сточные воды, отстой канализационных вод, резина, пластмассы, полимеры, мазут, битум которые сейчас откладываются в виде бытовых и промышленных отходов.

3. Новые пути использования ископаемого топлива

Россия обладает огромными запасами угля, оцениваемыми примерно в 200 млрд тонн, что составляет 5,5 % мировых запасов. Торф залегает в России на площади 150 млн гектар и его запасы составляют 235 млрд тонн (47 % мировых запасов). Суммарно, Россия обладает запасом в 435 млрд тонн ископаемого топлива. Доля торфа в топливном балансе составляет 0,2 %, а его потребление составляет около 2,5 млн. тонн. в год. Уголь занимает 27 % в топливном балансе России. Учитывая неуклонный рост тарифов, диктуемый газовым монополистом, к 2015 году ожидается, что доля угля составит 37 % топливного баланса России. Использование угля в России в настоящее время существенно уступает газу по экономической эффективности, создает нагрузку на железнодорожный транспорт и экологически небезопасно. Для развития энергетики наиболее интересными направлениями представляются способы переработки угля в жидкое или газообразное топливо. Существует, по меньшей мере, три способа переработки угля в жидкие углеводородные соединения: гидрогенизация, метод Фишера-Тропша, термическая деполимеризация. Первые два способа были разработаны в Германии и широко использовались для производства моторного топлива. По методу гидрогенизации угля производился высококачественный авиакеросин. По методу Фишера-Тропша производилось дизельное топливо. По методу гидрогенизации из 1 тонны угля получали 164 кг жидких и твердых углеводородов, в том числе 95 кг авиационного топлива. По методу Фишера-Тропша выход составлял 200 кг из 1 тонны угля, в том числе 87 кг автобензина и 56 кг дизтоплива. Получение горючих газов из угля может проводиться по методу пиролиза, когда, нагревая при недостатке кислорода твердые органические вещества, получают горючий газ и

смолистую фракцию. Красноярская компания «Сибтермо» разработала перспективный метод коксования бурого угля с использованием модернизированной технологии пиролиза, комбинированный с выработкой электрической и тепловой энергии. В результате этого из 1 тонны бурого угля Канско-Ачинского бассейна выходит до 300 кг кокса, и около 1,5 Гкал горючего газа. Опытные установки полностью интегрированы с типовыми котлами ТЭЦ. При подаче в камеру сгорания воды или водяного пара получается горючий синтез-газ: смесь монооксида углерода и водорода, с примесью азота и оксида углерода (примеси около 11 %). Подобный синтез-газ имеет теплоту сгорания 2800 ккал/куб. метр).

Перспективно создание альтернативных топливных материалов на основе бурого угля. Современная технология получения синтетических жидких топлив из бурого угля представляет собой три стадии:

– процесс ожижения бурого угля;

– очистка жидкого угля от механических примесей;

– углубленная переработка в синтетическое жидкое топливо.

Еще один способ получения топлива из угля – создание водоугольной суспензии (ВУС) путем сухого измельчения предварительно дробленного угля в роторно-вихревой мельнице. Достоинство данного топлива – дешивизна и экологичность. Использование ВУС на пылеугольных ТЭС упрощает технологии приема, хранения, подачи топлива на котлы, улучшает состояние экологии на местности за счет снижения выхода в атмосферу мелкодисперсной золы и канцерогенных оксидов азота [2–8].

4. Технология циркулирующего кипящего слоя в энергетических установках (ЦКС)

Технология сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) за последние 20 лет претерпела значительные изменения, что позволило ей выйти на рынок крупных энергетических блоков. За рубежом уже хорошо освоены котлы с ЦКС для блоков 300 МВт, применяются высокие параметры пара с температурой острого пара и пара промежуточного перегрева 585 °С. В 2009 г. пущен первый блок мощностью 460 МВт с прямоточным котлом ЦКС, обеспечивающий КПД 43,3 %. Сооружаются блоки 550 МВт с температурой перегрева 603 °С, ведутся разработки блоков 600 и 800 МВт на еще более высокие параметры пара. Наиболее развивающимися рынками поставки котлов с ЦКС являются Китай, Индия и Польша.

В котлах с ЦКС сжигаются топлива широкой гаммы характеристик, в основном низкосортные, включая отходы обогащения угля, торф и биомассу, существенно расширяется топливная база. В Европе широко внедряются котлы с ЦКС для совместного сжигания различных видов биомассы и угля. Важным является преимущество технологии ЦКС, связанные с

низкими выбросами оксидов азота (низкотемпературное, ступенчатое сжигание) и серы (добавка известняка при оптимальной температуре связывания серы в топку). Учитывая перспективы увеличения доли угля в топливном балансе, увеличение доли возобновляемых топлив (биомасса) и ужесточение норм на вредные выбросы, задача разработки отечественных котлов с ЦКС является, безусловно, актуальной.

Важным вопросом является использование типовых решений при сжигании различных твердых топлив. Стандартизация котлов ЦКС привела бы к снижению их стоимости, позволила в большей степени унифицировать их проекты под различное топливо, упростила и ускорила бы установку и обслуживание. Унификация и модульность, примененные при разработке котла с ЦКС средней мощности позволяют снизить затраты на инжиниринг и сроки строительства. Огромное внимание при сооружении современных ТЭС уделяется вопросам использования различных местных топлив, биомассы и отходов производств (совместное сжигание). Так же крайне важным считается необходимость снижения выбросов парниковых газов.

Сооружается первый блок с котлом ЦКС на Новочеркасской ГРЭС. Поставщиком котла является ОАО «ЭМАльянс» по инжинирингу компании «Фостер-Уиллер» при значительной доле зарубежной поставки ключевых элементов. Пуск котла намечен на 2014 год. Использование лучших зарубежных решений является вполне правомерным, однако, в дальнейшем было бы целесообразным увеличивать долю собственного изготовления котлов с ЦКС. Именно так поступают в Китае, где на базе лицензий и инжиниринга нескольких зарубежных компаний развиваются собственные технические решения и доля их постоянно растет. В 2010–2012 годах при финансировании министерства промышленности и торговли РФ выполнен ряд работ по созданию основ производства отечественных котлов с ЦКС. Разработаны программы расчетов котлов с ЦКС, выбраны компоновочные решения, разработаны эскизные проекты котлов с ЦКС для блоков 225 и 330 МВт, разработан проект и ведется сооружение пилотной установки для отработки отечественных технических решений и исследования сжигания отечественных топлив на территории ТКЗ.

5. Экологические аспекты внедрения новых технологий

Энергетика страны требует решения возникающих экологических проблем. Внимание стоит уделять вопросам экологии, ведь экологическая обстановка на планете ухудшается и следовательно становятся все более актуальными экологические проблемы [15, 16]. Правительство РФ активно поддерживает политику экологической безопасности. Экологическая политика основана на принципах охраны окружающей среды, изложенных в федеральном законодательстве, а именно в документе «Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до

2030 года, утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г.» [18]. Так в её основе лежит формирование эффективной конкурентоспособной и экологически ориентированной модели развития экономики РФ [17, 18].

Выводы

1. Энергетическая стратегия развития энергетики России до 2030 года может быть реализована при внедрении новых технологий.

2. Технология циркулирующего кипящего слоя для сжигания твердых бытовых отходов, антрацитов и углей с повышенным содержанием золы успешно внедряется в мире.

3.Переход к новым способам сжигания позволит улучшить экологическую и экономическую ситуации в Уральском регионе и стране в целом.

Библиографический список

1. Богданов, А.Б. Национальные показатели энергоэффективности России / А. Б. Богданов // Энергосбережение. – 2010. – № 5. – С. 46–53.

2. Реш, А.Г. Перспективы использования бурого угля / А.Г. Реш, К.В. Голубкова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 266–268.

3. Использование водоугольных суспензий в энергетике / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 242–247.

4. Джундубаев, А.К. Выбор основных параметров гидротранспортной системы топливоснабжения перспективной Каракечинской ГРЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – № 1. – С. 102–105.

5. Джундубаев, А.К. Выбор рациональной системы транспортирования каракечинского бурого угля к промплощадке перспективной Кавакской ТЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 106–110.

6. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

7. Анализ технико-экономических показателей гидротранспортной системы Кара-Кече – промплощадка ГРЭС / А.К. Джундубаев, А.И. Бийбосунов, К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – Т. 2.– № 1. – С. 105–107.

8. Методы теплотехнических расчётов при эксплуатации гидротранспортных систем в зимнее время / А.К. Джундубаев, А.И. Бийбосунов, К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 108–112.

9. Загидуллина, А.И. Использование водорода в энергетике / А.И. Загидуллина, А.И. Грибанов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 113–114.

10. Бурьян, А.В. Пути модернизации мирового ТЭК: переход на альтернативные источники энергии / А.В. Бурьян // Известия Российского Государственного педагогического Университета им. А.И. Герцена. – 2012 – № 133.

11. Кривкова, М.Д. Инновации в топливной энергетике / М.Д. Кривкова, Н.Н. Каргаполова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 173–178.

12. Комплексное производство биотоплива, основанное на использовании растворенной целлюлозы из сельскохозяйственных отходов / M. Sarwar Jahan, Naznin Sultana, Mostafizur Rahman // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2012.

13. Сердинова, К.А. Утилизация отходов сельского хозяйства / К.А. Сердинова, В.Ю. Шашкин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 279 – 284.

14. Соломащенко, К.И. Утилизация отходов деревообработки / К.И. Соломащенко, А.Г. Реш // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 293–297.

15. Саблин, А.В. Проблемы теплофикации в современных рыночных условиях / А.В. Саблин, В.Ю. Шашкин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 269–270.

16. Саблин, А.В. Проблемы теплоснабжения в России / А.В. Саблин, В.Ю. Шашкин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2014. – Т. 2. – № 1. – С. 261–271.

17. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р.

18. Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030 года, утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г.

К содержанию

УДК 620.9 + 621.1 + 621.31

СОВРЕМЕННЫЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ

Л.Е. Лымбина

Показана необходимость энерго-ресурсосбережения, как обязательного принципа народохозяйствования и направлений в программах по его реализации в энергетике.

Ключевые слова: энерго-ресурсосбережение, энергобезопасность, теплоснабжение, энергосберегающие технологии.

Рациональное и рентабельное энерго-ресурсосбережение в настоящее время является приоритетной и важнейшей задачей с точки зрения успешного экономического развития и экологической безопасности России. С этим связаны экономическая, политическая, техногенная безопасности государства, а также его защищенность от угроз дефицита всех видов энергии и энергоресурсов. Эти угрозы могут возникать по причинам негативных воздействия природных, техногенных, управленческих, социально-экономических, внутри- и внешнеполитических факторов.

Масштаб проблемы для России заключается не только в низкой среднегодовой температурой (– 5,5 ºС), но и в значительной длительности отопительного периода, где этот показатель в основном составляет более 200 суток, есть отдельные регионы страны, где он приближается практически к «постоянному» – до 340 суток (СНиП 23-01-99*/2005 «Строительная климатология»). Проблему усугубляет изношенность, а также морально и физически устаревшее оборудование сетей и систем в теплоэнергоснабжении. И хотя, при высокоразвитой теплофикации на долю когенерации в РФ приходится около 70–80 % вырабатываемой тепловой энергии, однако, по данным некоторых экспертов, потери тепла при транспортировке и в зданиях достигают порядка 60–70% при общем расходе на теплоснабжение более 420 млн т. у. т. в год (длина трубопроводов систем теплоснабжения с износом 50 %, а в ряде случаев иногда больше, составляет около 300 тысяч километров).

Большинство существующих зданий разного назначения являются достаточно «холодными» и потери тепловой энергии провоцируют крайнюю нерентабельных систем теплоснабжения. По оценкам специалистов фактические теплопотери зданий составляют 30 %, а в жилых домах в среднем на 25 % превышают проектные значения вследствие низкого качества строительства и эксплуатации. Если учесть прогресс технологий термомодернизации зданий с переходом ЕС с 2021 г. на стандарт энергопассивного здания (менее 15 кВт.ч/м^2 в год), это может увеличить долю потерь тепловой энергии до 80 % для существующих зданий.

Выход из создавшегося положения возможен, если минимизировать эти потери внедрением энергосберегающих проектов.

Любую теплоэнергетическую систему условно делят на три основные звена: источник – производство тепловой энергии (ТЭЦ, котельная); транспортировка тепловой энергии потребителю (тепловые сети); потребители тепловой энергии. Каждое звено из приведенных обладает характерными непроизводительными потерями, снижение которых и является основной функцией энергосбережения.

В производстве тепловой энергии при нормальной работе котлоагрегата (с КПД около 75 %) всегда существуют три вида основных потерь: с недожогом топлива и уходящими газами (до 18 %), потери энергии через обмуровку котла (до 4 %) и потери с продувкой и на собственные нужды котельной (до 3 %). Современные котлоагрегаты имеют КПД около 80–85 % и потери у них будут ниже при: непрерывной работе в диапазоне мощностей, определенном режимной картой – идеальный вариант эксплуатации котельной; своевременной и качественной режимной наладке котлоагрегата с инвентаризацией вредных выбросов; чистке поверхностей котлоагрегатов в соответствии с правилами эксплуатации котлоагрегатов; эффективности работы системы химводоочистки (ХВО). Кроме того, диаметр сопел горелок, установленных на котлоагрегате должен отвечать реальной нагрузке котла; котел должен быть оборудован полным комплектом средств контроля и регулирования (паромерами, теплосчетчиками, системами регулирования процесса горения и тепловой нагрузки); целостность обмуровки котла исключает дополнительные присосы воздуха в топку; использование современного насосного оборудования в котельной позволит в два-три раза снизить затраты электроэнергии на собственные нужды котельной и снизить затраты на их ремонт и обслуживание; использование надежной запорной арматуры, высококачественной автоматики и регулирующих устройств позволяет минимизировать потери, возникающие из-за колебаний мощности и возникновения нештатных ситуаций в котельной. Несоблюдение некоторых из этих мероприятий может увеличивать потери до 25 %.

В звене транспортировки тепловой энергии важную роль играют: гидравлическая «налаженность» теплосети – экономический показатель ее работы; потери тепловой энергии по длине тепловых сетей, связанными со способом укладки и изоляции трубопроводов; оптимальный КПД сетевых насосов, обеспечивающих движение теплоносителя по теплопроводам; качество тепловой изоляции тепловых сетей; равномерное распределение теплоты по объектам теплопотребления. Обычно потери тепловой энергии в тепловых сетях не должны превышать 5–7 %. Фактически они могут достигать 25 % и больше.

В звене потребителей теплоты основными источниками возникновения непроизводительных потерь тепловой энергии являются многофакторность: тепловая защита зданий; несоответствие характера теплоснабжения текущим погодным условиям (до 20 %); в системах теплоснабжения зданий – неравномерность распределения теплоты по объекту потребления и зачастую нерациональность внутренних тепловых схемы объекта (5–15 %); в системах горячего водоснабжения – отсутствие рециркуляции горячей воды (потери до 25 %), наличие внутренних утечек, загрязнения поверхностей теплообмена и трудности регулирования (потери до15–20 %). Косвенной причиной вышеперечисленных потерь является отсутствие на объектах теплопотребления приборов учета количества потребляемого тепла, а также недопонимание значимости принятия энергосберегающих мероприятий.

В качестве некоторых направлений в программы по энергоресурсосбережению в теплоэнергоснабжении должны быть включены следующие мероприятия.

Энергоаудит – с целью получения достоверной информации о потерях и принятия решений по оптимизации при использовании энергоресурсов, а также план внедрения комплекса мер стимулирующих энергосбережение.

Использование высокопроизводительного котельного оборудования не только в когенерации, в том числе мини-ТЭЦ, но и локальных котельных контейнерного типа.

Использование современных котельных установок с высоким КПД позволяет существенно снизить расход энергоносителей, уменьшить затраты на техническое обслуживание и ремонт, а также использовать не только традиционные газ и уголь, но и более дешевое топливо, например, древесные гранулы и брикеты. Проведение одного из малозатратных эффективных методов энергосбережения – режимно-наладочных испытаний с целью достижения проектного объема потребления топлива в диапазоне рабочих нагрузок, наладку средств автоматического регулирования процессов сжигания топлива, вспомогательного оборудования на источниках теплоты.

Режимно-наладочные работы позволяют выявить недостатки в состоянии и эксплуатации котлоагрегатов, наметить и осуществить комплекс мероприятий, повышающих экономичность: оптимизировать уровни избыт-

ков воздуха в разных частях газового тракта, температуры уходящих газов, установить режим водоподготовки, обеспечивающий минимальное образование накипи на внутренних поверхностях нагрева, и др.

Утилизация теплоты уходящих газов (тепловые ВЭР) путем использования рекуперативных, смесительных, комбинированных аппаратов, работающих при различных приемах использования теплоты, содержащейся в уходящих газах.

Внедрение автоматизированных информационно-аналитических систем коммерческого учета энергоресурсов, таких как: и**нформационно-аналитические системы** и системы поддержки принятия решений, позволяющих производить комплексный анализ и обобщение полученной информации, а также оценку деятельности и прогноз развития анализируемых объектов; **диспетчерские системы**, обеспечивающие выполнение задач оперативно-диспетчерского контроля, организации оптимального управления потреблением энергоресурсов, выявления аварийных ситуаций и состояния оборудования; **автоматизированные системы коммерческого учета энергоресурсов**, выполняющие задачи инструментального коммерческого учета энергоресурсов, основанного на измерении количественных, качественных и режимных параметров подачи-потребления энергоресурсов для принятия оптимальных управляющих решений, направленных на экономию энергоресурсов и связанное с этим сокращение расходов; **геоинформационные системы**, позволяющие оптимальным образом осуществлять сбор, систематизацию, обработку, оценку, хранение и отображение географически координированных данных для обеспечения в населенном пункте (предприятии) единой политики по учету, паспортизации, сохранности, содержанию и эксплуатации объектов энергохозяйства.

Применение частотно-регулируемых электроприводов для повышения ресурса работы механического и электротехнического оборудования, с помощью которых достигается снижение расхода энергии и значительный экономический эффект.

Переход на автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (ИТП) от групповых тепловых пунктов (ЦТП), как более эффективное решение, как по капиталовложениям, так и по эксплуатационным затратам: повышение эффективности авторегулирования теплоснабжения зданий; снижение затрат на прокладку трубопроводов систем тепловодоснабжения, снижение потерь тепла при транспортировке и расхода электроэнергии на перекачку теплоносителя.

Применение новейших высокоэффективных теплоизолирующих материалов для теплопроводов и при возведении энергоэффективных зданий, а также при реконструкции ветхого фонда. Например, применение энергоэффективных наружных ограждающих конструкций – многослойных композитных конструкций стен и покрытий.

Энергосберегающие высокие технологии пассивного энергоснабжения зданий, так называемые интеллектуальные или «умные» системы, которые позволяют оптимизировать поступление, распределение и существенно сократить расход теплоэлектроэнергии в зданиях (опыт стран Западной Европы, США, Японии).

Внедрение систем рекуперации, которые позволяют повторно использовать тепловую энергию, вырабатываемую оборудованием, осветительными и электроприборами, людьми, при этом снижая потребность в теплоте от внешнего источника.

Энергосбережение путем утилизации природной теплоты и холода, использования вторичных энергоресурсов (ВЭР), уменьшения тепловых потерь: использование теплонасосных установок с целью повышения потенциала природных источников теплоты; пассивное и активное использование солнечной энергии; использование природной теплоты и холода (воды, наружного воздуха, грунта); использование внутренних источников теплоты и холода (теплоты и холода удаляемого воздуха, теплоты источников освещения, нагревательных приборов, сточных вод и т. д.);

Совершенствование инженерных систем и их элементов. Например, комбинирование систем между собой и с другими системами; автоматизация процессов теплоснабжения; качественное и количественное регулирование; трубопроводы системы горячего водоснабжения обязательно должны быть выполнены по циркуляционной схеме.

Совершенствование объемно-планировочных, строительно-конструктивных мер по энергосбережению, таких как: выбор ориентации здания относительно сторон света; выбор формы здания в плане и по вертикали, степени и характера остекления, применением солнцезащитных устройств, уменьшением затрат энергии на искусственное освещение.

На пути реализации внедрения энергосберегающих технологий встречаются некоторые трудности. Например, при внедрении новых энергоэффективных технологий эти трудности возникают при согласовании с надзорными и согласующими органами, которые должны быть первыми партнерами во внедрении энергосберегающих технологий. Еще один из факторов – отсутствие критериев оценки качества работы сложной теплоэнергетической системы. При организации теплоснабжения десятков тысяч потребителей от тепловых сетей, объединяющих различные виды источников тепла, необходим единый технологический документ, который увязывает интересы всех сторон теплоэнергетического процесса.

Вышеперечисленное можно продолжать, но ясно одно, что внедрение энергосберегающих технологий в теплоэнергоснабжение, должно стать не просто обязательным принципом хозяйствования, но важнейшим требованием поддержания энергобезопасности страны и ее экономического развития.

Библиографический список

1. Федеральный закон от 23.11.2009 N 261-ФЗ (ред. от 28.12.2013) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2014).

2. Лымбина, Л.Е. Поступательное развитие региональной энергетики Южного Урала / Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых 22-26 апреля 2013 г. / под ред. Е.В. Торопова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013.

К содержанию

УДК 621.181 + 662.93/.95 + 621.181.7

ВЫДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГРУПП ТЕХНОЛОГИЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

К.В. Осинцев

Рассмотрены варианты организации процесса сжигания угольной и природного газа в топках котельных агрегатов, выделены основные группы технологий низкотемпературного сжигания органического топлива.

Ключевые слова: технология сжигания, топливо, котел, горелка.

В процессе развития факельной технологии сжигания угольной пыли на котлах широкое распространение получили прямоточные горелки смесительного типа, формирующие на выходе относительно однородную реагентную смесь и высокий уровень температуры факела вблизи амбразур. При подаче в них пыли угля с низким выходом летучих веществ, решался поставленный вопрос зажигания; при переходе к пыли шлакующего угля с высоким выходом летучих $V^г \geq 25$ % возникало много проблем со снижением шлакования горелочных амбразур, экранов и ширм. Например, горелки котлов БКЗ-210-140Ф $1^{\underline{й}}$ очереди Челябинской ТЭЦ-2, при размещении на фронтовых стенах топочных камер и подаче в них пыли челябинского бурого угля с $V^г \approx 40$ %, изначально формировали низкоскоростной факел однородной топливо-воздушной смеси.

Снизить температурный фон и активность шлакования в области максимального тепловыделения и в выходном окне топочной камеры можно различными методами, а выбор связать с оценкой их эффективности и привязкой к факторам, влияющим на температурный уровень факела в топке. Для этого можно обратиться к известным полуэмпирическим зависимостям [1, 2, 3]:

$$T''_{а.г} = f\left[\left(Q^{р}_{н} \cdot B_{р}\right), T_{а}, F_{а.г}, \Psi_{э}, r\right], \quad (1)$$

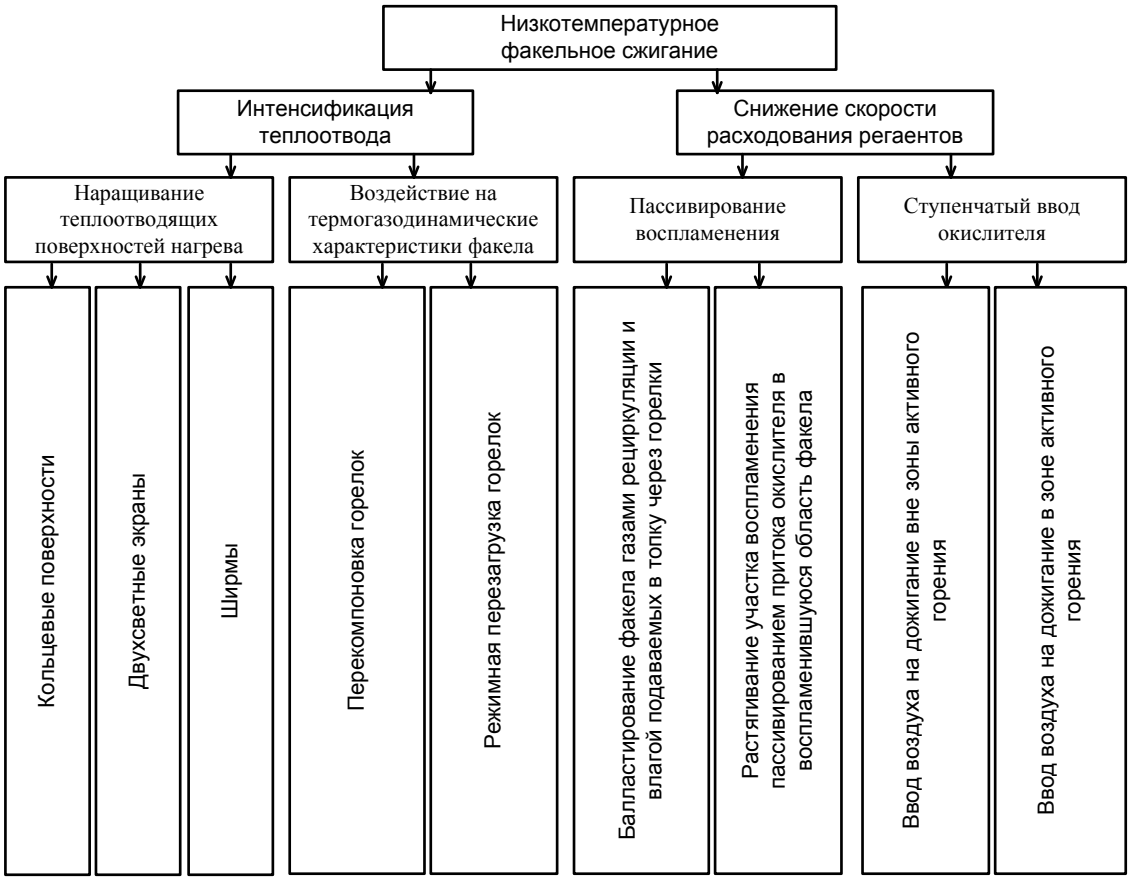
$$T''_{т} = \varphi_1\left[\left(Q^{р}_{н} \cdot B_{р}\right), M, r\right] \cdot \varphi_2\left[\left(Q_{л} \cdot F_{ст}\right), \Psi_{э}, a_{т}\right] \cdot \varphi_3\left(T_{а}\right), \quad (2)$$

где $\left(Q^{р}_{н} \cdot B_{р}\right)$ и $\left(Q_{л} \cdot F_{ст}\right)$ – тепловыделение и теплопоглощение в топке, кВт; $B_{р}$ – расход топлива, кг/с, $F_{ст}$ – поверхность теплообмена, м^2; $\Psi_{э}$, $a_{т}$, M, r – безразмерные коэффициенты, характеризующие эффективность тепловосприятия экранов, радиационные свойства факела, особенности конструкции топки и свойств топлива, степень балластирования инертным материалом; $T_{а}$, $T''_{а.г}$, $T''_{т}$ – температуры факела: адиабатическая, в конце зоны активного горения, на выходе из топки соответственно, К.

Зависимости (1), (2) показывают, что температурный уровень в топке напрямую связан с тепловыделяющим $\left(Q^{р}_{н} \cdot B_{р}\right)$ процессом горения и теплопоглощением $\left(Q_{л} \cdot F_{ст}\right)$, осуществляемым главным образом радиацией от факела к облучаемым поверхностям нагрева в топке. Степень эффективности этих процессов может быть оценена по значениям безразмерных коэффициентов $\Psi_{э}$, $a_{т}$, M, r. Понятно, что главенствующими процедурами снижения температурного уровня в зоне активного горения топки, где размещены горелки, будут как интенсификация теплоотвода, так и снижение скорости расходования реагентов (иначе, пассивирование топливного окисления и тепловыделения).

Процессы охлаждения и пассивирования горения многовариантны, это хорошо видно из предлагаемой классификационной схемы существующих методов организации низкотемпературного факельного сжигания топлива в топках, рис.

В настоящее время вопросы организации процесса сжигания угольной пыли и природного газа не остаются без внимания в Уральском и Поволжском регионах [4–14].



Классификация методов организации
низкотемпературного факельного сжигания топлива

Выводы

1. Организация низкотемпературного сжигания угольной пыли является эффективным мероприятием снижения шлакования, выхода оксидов азота, повышения надежности и экономичности котлов.

2. При выборе метода организации низкотемпературного сжигания угольной пыли целесообразно ориентироваться на разработанную классификационную схему, рис.3, результаты проведенного анализа эффективности известных методов с учетом изменения экономических и экологических показателей котлов, а также затратности при внедрении.

Библиографический список

1. Анализ эффективности сжигания природного газа и бурого угля ухудшенного качества на котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. – 2001. – № 6. – С. 26–34.

2. Проектирование топок с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания / под ред. В.В. Митора, Ю.Л. Маршака. – Л.: ВТИ-НПО ЦКТИ, 1981. – Вып. 42. – 118 с.

3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: Издательство НПО ЦКТИ, 1998.

4.Джундубаев, А.К. Выбор основных параметров гидротранспортной системы топливоснабжения перспективной Каракечинской ГРЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 102–105.

5.Джундубаев, А.К. Выбор рациональной системы транспортирования каракечинского бурого угля к промплощадке перспективной Кавакской ТЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 106–110.

6. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

7. Использование водоугольных суспензий в энергетике / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 242–247.

8. Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

9. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

10. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

11. Зимовец, И.А. Две проблемы повышения эффективности старых угольных котлов при сжигании природного газа / И.А. Зимовец, Г.Ф. Гарифуллина, В.Н. Потапов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 126–129.

12. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла №8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

13. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

К содержанию

УДК 621.181.7

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ФАКЕЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВКАХ ГОРЕЛОК НА СТЕНАХ ТОПОЧНЫХ КАМЕР КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

К.В. Осинцев

Рассмотрена модель топочного устройства с твердым шлакоудалением и различными схемами настенной компоновки горелок, используемая для оценки тепловых характеристик факела. Предложена методика пользования моделью.

Ключевые слова: котел, горелка, модель, методика.

Для проведения оценочных предварительных тепловых расчетов и обработки результатов исследований факельных процессов с использованием авторской модели [1] топочного устройства разработаны следующие методические рекомендации.

1. В тепловых расчетах используют средние значения температуры факела на выходе из зоны активного горения и в выходном окне топки $T''^{ср}_{а.г}$ и $T''^{ср}_{т}$ и степени выгорания топлива в тех же сечениях $a''_{а.г}$ и $a''_{т}$. Для оценки работоспособности топочных и пароперегревательных поверхностей нагрева определяют максимальные локальные значения $T^{max}_{ф0}$ и $T''^{max}_{т}$.

2. Параметр $T''^{ср}_{а.г}$ определяется как средневзвешенный на двух участках факельного воспламенения и горения при уравновешенном теплоотводе.

Для фронтальной компоновки горелок:

$$T''^{ср}_{а.г} = \frac{T^{ср}_{воспл} l_ф + T_{ф0}\left(C_т - l_ф\right)}{C_т}; \quad (4)$$

Для исследованной топки котла БКЗ-210-140Ф при сжигании угольной пыли и природного газа в вихревых и прямоточных горелках смесительного типа с $l_ф \le 0.5$ м параметр $T''^{ср}_{а.г} \approx 0.995 T_{ф0}$. Для топки того же котла с многофункциональными горелочными устройствами, размещаемыми на фронтовой стене с $l_ф = 1.5 - 2.5$ м параметр $T''^{ср}_{а.г} \approx (0.94 - 0.97) T_{ф0}$.

Для встречной компоновки горелок:

$$T''^{ср}_{а.г} = \frac{T^{ср}_{воспл} 2l_ф + T_{ф0}\left(C_т - 2l_ф\right)}{C_т}, \quad (5)$$

$$T''^{ср}_{а.г} = \frac{T^{ср}_{воспл} 2l_ф + T_{ф0}\left(A_т - 2l_ф\right)}{A_т}. \quad (6)$$

Для топки котла БКЗ-210-140Ф при сжигании угольной пыли и газа в горелках смесительного типа, размещаемых встречно на боковых стенах $T''^{ср}_{а.г} \approx (0.990 - 0.995) T_{ф0}$; при использовании многофункциональных горелок $T''^{ср}_{а.г} \approx (0.91 - 0.96) T_{ф0}$.

Для тангенциальной компоновки горелок в общем случае:

$$T''^{ср}_{а.г} = \frac{T^{ср}_{воспл}\left(F_т - F_ф\right) + T_{ф0} F_ф}{F_т}. \quad (7)$$

При использовании авторских схем ввода реагентов с боковых стен сохраняется аналоговая запись $T''^{ср}_{а.г}$ по формуле (6) с заменой параметра $l_ф$ на $l'_ф \approx 0.5 l_ф$; при $l_ф \approx 2.5 - 4.5$ м значения параметра $T''^{ср}_{а.г} \approx (0.95 - 0.97) T_{ф0}$.

3. Анализ эффективности экранных поверхностей нагрева проводиться с учетом поправки на неравномерность распределения температуры в поперечных сечениях топки:

$$T^{max}_{ф0} = k_1 T_{ф0}, \quad (8)$$

где k_1 – коэффициент неравномерности, определяется по результатам термогазодинамических продувок, в частности для исследованного типа топок.

4. Средняя температура факела на выходе из зоны охлаждения (или на выходе из топки) $T''^{ср}_{т}$ определяется согласно методических рекомендаций.

5. Анализ работы пароперегревателя со стороны набегающего факела на загрязняемость проводиться с учетом поправки на неравномерность распределения температуры по ширине и высоте выходного окна топки:

$$T_{\text{т}}''^{\max} = k_2 k_3 T_{\text{т}}''^{\text{ср}}, \quad (9)$$

где k_2 – коэффициент неравномерности по ширине топки и выходного окна, k_3 – коэффициент неравномерности по высоте выходного окна. Для исследованного типа топок с фронтальной и встречной (котлы типа П-57, ПК-39) компоновками горелок используют максимальное $k_2 \approx 1.05$ и табулированные значения k_3. Для других типов топочных камер и схем компоновки горелок и газоходов в отсутствии опытных данных $k_2 \approx 1.0$.

6. Коэффициенты k_1, k_2, k_3 могут быть использованы в расчетах тепловосприятия экранов и пароперегревателя. В отсутствии иных опытных данных оценку максимальных удельных тепловосприятий радиационных настенных экранов и ширмовых пароперегревателей в выходном окне топочной камеры производят согласно рекомендаций.

7. В расчетах теплообмена в качестве степени выгорания топлива в выходном окне зоны активного горения следует принимать параметр $a_{\text{ф}}''$ в конце участка горения с условно постоянной температурой факела $T_{\text{ф0}}$. В оценочных расчетах в отсутствии опытных данных $a_{\text{ф}}'' \approx a_{\text{а.г}}''^{\text{н}}$, $a_{\text{т}}'' \approx a_{\text{т}}''^{\text{н}}$, выбираются согласно нормативной и методической документации [2]. Во всех вариантах ввода газовоздушных реагентов в топку степень выгорания природного газа $a_{\text{т}}'' \approx 1.0$.

8. При проведении исследований в отсутствии прямых замеров радиационных потоков теплоты оценку коэффициента эффективности экранов $\Psi_{\text{э}}^{\text{а.г}} = \varphi_1\left(T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}}\right)$ в зоне активного горения и $\Psi_{\text{э}}^{\text{охл}} = \varphi_2\left(T_{\text{т}}^{\text{ср}}\right)$ в зоне охлаждения можно производить расчетом, ориентируясь на опытные значения средней температуры $T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}} = f(T_{\text{ф0}})$ и $T_{\text{т}}^{\text{ср}} = \varphi_3\left(T_{\text{а.г}}''^{\text{ср}}, T_{\text{т}}''^{\text{ср}}\right)$ соответственно согласно рекомендациям [2].

9. В отсутствии опытных данных оценку параметра $T_{\text{ф0}}$ можно произвести с использованием стационарной модели теплового равновесия Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого для элементарного линейного участка воспламенения газового пламени с границами $l-(l+dl)$:

$$dq_{\text{т}} = dq_{\text{в}}(T) + dq_{\text{н}}, \quad (10)$$

где $dq_{\text{т}}$ – тепловой поток в направлении поступления реагентной смеси, кВт, образующийся при наличии продольного температурного градиента $(T_{\text{ф0}} - T_0)$, К; $dq_{\text{в}}(T)$ – тепловыделение, кВт, генерирующее продольный температурный градиент $(T_{\text{ф0}} - T_0)$, К; $dq_{\text{н}}$ – теплота, необходимая для на-

грева смеси, кВт. Решение задачи по отысканию, в частности, температурного градиента $(T_{ф0}-T_0)$ или максимальной температуры факела $T_{ф0}$, при этом серьезно упрощается. Составляя баланс теплоты для участка факела с границами $l-(l+dl)$, необходимо учитывать реальные условия зажигания реагентной смеси и вносить поправки на дополнительные тепловые потери и теплоотвод:

$$dq_т = dq_в(T) + dq_{доп} - dq_{экр} - dq_р - dq_{гр}, \qquad (11)$$

где $dq_{доп}$ – приток теплоты с подсветочным топливом, кВт; $dq_{экр}$ – отвод теплоты к экранам, кВт; $dq_р$ – затраты теплоты на нагрев непрореагированной части топлива и воздуха, кВт; $dq_{гр}$ – потери теплоты факела на нагрев газов рециркуляции, кВт.

После раскрытия и интегрирования всех членов уравнение (11) можно представить в удобной для инженерных расчетов форме [1]:

$$\lambda\frac{T_{ф0}-T_0}{l_ф}F_ф = a_ф Q^р_н B_р + Q^р_{н\,доп}B_{р\,доп} - \sigma a_т T^4_{ф0}\sum_{i=1}^{i=n}\left(\Psi_i F_i\right)_{а.г} - c_{рт}\left(T_{ф0}-T_0\right)\cdot\left(1-a_ф\right)B_р - \\ -c_{рв}(T_{ф0}-T_0)\rho_0\upsilon_0\left[\left(1-a_ф\right)+\left(\alpha-1\right)\right]B_р - c_{рг}(T_{ф0}-T_0)\rho_г\upsilon_г rB_р, \qquad (12)$$

где λ – условный коэффициент теплопроводности, кВт/(м·К), в проводимых исследованиях принимались опытные значения $\lambda\approx1$кВт/(м·К); T_0 – температура начальная, усредненная вдоль плоскости амбразур и поверхности экранов, в отсутствии опытных данных ориентировочно по приведенной выше таблице; $T_{ф0}$ – средняя температура факела смеси всех компонент в конце зоны воспламенения и условно постоянная на втором участке зоны активного горения, К; для топки с фронтальной компоновкой горелок $F_ф = H_{а.г}\cdot A_т$, м^2; для топки со встречной компоновкой горелок $F_ф = H_{а.г}\cdot C_т$, м^2, где $H_{а.г}$ – высота зоны активного горения, м; $A_т$ – ширина камеры сгорания, м; $C_т$ – глубина камеры сгорания, м; $a_ф$ – интегральная степень выгорания топлива; $B_р$ и $Q^р_н$ – расход и теплота сгорания топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг соответственно; $B_{р\,доп}$ и $Q^р_{н\,доп}$ – расход и теплота сгорания подсветочного топлива на рабочую массу, кг/с и кДж/кг; $\sigma=5.7\cdot10^{-11}$ кВт/(м^2·К^4) – универсальная постоянная Стефана-Больцмана; $a_т$ – степень черноты факела, принимается согласно [2]; $\sum_{i=1}^{i=n}\left(\Psi_i F_i\right)_{а.г}$ – комплекс эффективной поверхности тепловосприятия зоны активного горения по нормативной методике теплового расчета, м^2; член уравнения $c_{рт}\left(T_{ф0}-T_0\right)\cdot\left(1-a_ф\right)B_р$ соответствует количеству теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей части топлива $\left(1-a_ф\right)B_р$, кг/с, член

уравнения $c_{\text{рв}}(T_{\text{ф0}}-T_0)\rho_0\upsilon_0\left[\left(1-a_{\text{ф}}\right)+\left(\alpha-1\right)\right]B_{\text{р}}$ – количество теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев непрореагировавшей и избыточной части воздуха $\rho_0\upsilon_0\left[\left(1-a_{\text{ф}}\right)+\left(\alpha-1\right)\right]B_{\text{р}}$, кг/с; $c_{\text{рг}}(T_{\text{ф0}}-T_0)\rho_{\text{г}}\upsilon_{\text{г}}rB_{\text{р}}$ – количество теплоты, кВт, отбираемой из факела на нагрев газов рециркуляции в количестве $\rho_{\text{г}}\upsilon_{\text{г}}rB_{\text{р}}$, кг/с; $c_{\text{рт}}$, $c_{\text{рв}}$, $c_{\text{рг}}$ – теплоемкость топливного остатка, воздуха и газов рециркуляции при средней температуре на участке воспламенения $T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$ по (2), кДж/(кг·К); υ_0, $\upsilon_{\text{г}}$ – объемы воздуха и продуктов сгорания, отнесенные к нормальным условиям и 1 кг топлива, нм^3/кг; ρ_0, $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха и продуктов сгорания при средней температуре на участке воспламенения $T_{\text{воспл}}^{\text{ср}}$ по (2), кг/нм^3.

Библиографический список

1. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с одноярусной фронтальной компоновкой многофункциональных горелок при сжигании разнородного топлива / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 14–23.

2. Осинцев, К.В. Учет неоднородности и нестабильности тепловой структуры топочного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2007. – № 6. – С. 66–70.

К содержанию

УДК 621.181.7

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОТЫ ТЭС ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА РАССРЕДОТОЧЕННЫЙ ВВОД РЕГЕНТОВ В ТОПКИ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

К.В. Осинцев

Производится сравнение технико-экономических показателей разработанной автором технологии топливосжигания с рассредоточенным вводом реагентных потоков в топку и существующей.

Ключевые слова: парогенераторы, ТЭС, инвестиции.

Особенностью оценки экономической эффективности улучшения работы индивидуальных узлов технологии выработки теплоты и электроэнергии является сбор статистических технических данных до и после внедрения мероприятий [1].

Снижение затрат на расшлаковку, включая ручной труд и растопочные потери топлива при аварийных запусках котлов в работу, выглядит так:

$$\Delta Э_{шл} = n\left(Э'_{шл} - Э''_{шл}\right), \quad (1)$$

где $Э'_{шл}$ и $Э''_{шл}$ – годовые затраты на расшлаковку, аварийные пуски котлов и ремонт шнеков топочного шлакоудаления до и после внедрения мероприятия, руб./год; n – количество котлов, охваченных мероприятием. Значение параметра $\Delta Э_{шл}$ в переводе на существующий уровень цен достигал 0,6–1,5 млн руб./год по каждому из переводимых на новую технологию котлов БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 и 1,0–2,0 млн руб./год по каждому котлу БКЗ-160 ТЭЦ г. Бишкек.

Годовая экономия при повышении срока службы горелочных элементов:

$$\Delta Э_{сл} = K_{р}^{с}/\tau_{с} - K_{р}^{н}/\tau_{н}, \quad (2)$$

где $K_{р}^{с}$ и $K_{р}^{н}$ – стоимость ремонта и замены горелочных элементов, руб.; $\tau_{с}$ и $\tau_{н}$ – срок службы старых и новых элементов, год. Здесь $\tau_{с}$ = 0,5-2,0 года, $\tau_{н} \geq$ 12-20 лет, а $\Delta Э_{сл}$=1,0–1,5 млн руб./год по каждому из упомянутых выше котлов.

Годовой экономический выигрыш от улучшения термического КПД котлов:

$$\Delta Э_{топл} = \left(\Delta\eta_{к.а}^{бр}/\eta_{к.а}^{бр}\right)B_{р}C^{т}, \quad (3)$$

где $\Delta\eta_{к.а}^{бр}$, $\eta_{к.а}^{бр}$ – улучшение КПД брутто и собственно КПД брутто до внедрения мероприятия; $B_{р}$ – среднестатистический годовой расход топлива, т/год; $C^{т}$ – цена на топливо на момент внедрения мероприятия, руб./т. При реальном показателе $\Delta\eta_{к.а}^{бр}\approx$1,0% значение $\Delta Э_{топл}\approx$0,5–1,0 млн руб./год по пылегазовым котлам ЧТЭЦ-2 и ТЭЦ г. Бишкек, а $\Delta Э_{топл}\approx$0,3 млн руб./год по газовым котлам Челябинской ГРЭС.

Годовой экономический эффект, связанный с повышением паропроизводительности и возможностью вывода одного из котлов в резерв:

$$\Delta Э_{N} = c\tau\left(N_1 n_1 - N_2 n_2\right), \quad (4)$$

где c – стоимость кВтч, руб./1000кВтч; τ – условное среднестатистическое число часов работы котлов, ч; n_1, n_2 – усредненное количество работающих котлоагрегатов до и после внедрения мероприятия, шт.; N_1, N_2 – суммарная электронагрузка собственного оборудования котлов до и после внедрения мероприятия, кВт. Параметр $\Delta Э_{N}$ имел существенные колебания своего значения и существенно снижался по мере наращивания объектов внедрения новой технологии. В среднем по всем объектам $\Delta Э_{N}$=0,2–0,6 млн руб./год.

Выигрыш от сокращения платы за выбросы оксидов азота в атмосферу был незначителен. Например, на ЧТЭЦ-2 $\Delta Э_{NOx} \leq 60$ тыс. руб./год.

Затраты на разработку и внедрение, вычитаемые при формировании экономического эффекта, учитываются в виде распределенных затрат с нормативным коэффициентом $E_н$=0,151/год:

$$\Delta Э_р = -E_н K_р, \quad (5)$$

где $K_р$ – затраты на разработку и внедрение.

Затраты на разработку и внедрение даже без распределения по годам на пилотных объектах, как правило, не превышали 10–25 % от реализуемого экономического эффекта и окупались за короткий период:

$$\tau_р = K_р / \Sigma\Delta Э \leq 0{,}5 \text{ года}, \quad (6)$$

где $\Sigma\Delta Э = \Delta Э_{шл} + \Delta Э_{сл} + \Delta Э_{топл} + \Delta Э_N$, руб./год; $\Delta Э_{шл}$, $\Delta Э_{сл}$, $\Delta Э_{топл}$, $\Delta Э_N$ приведены в формулах (1) – (4), руб./год.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения новой технологии на котлах ЧТЭЦ-2 и ТЭЦ г. Бишкек выглядит весьма внушительно, рис.1*а*.

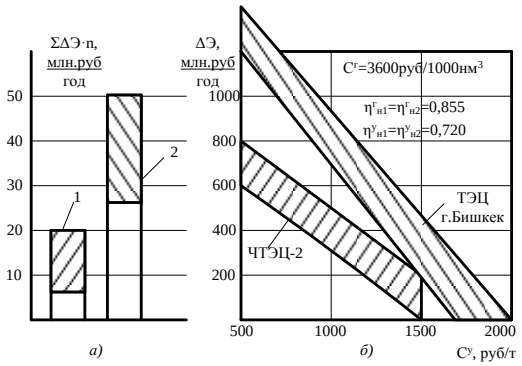


Рис. 1. Экономическая эффективность перевода котлов на технологию с рассредоточенным вводом реагентных потоков в топки: *а* – диапазоны межгодовых изменений суммарного эффекта ΣΔЭ·n по зависимостям (1–4) на котлах ЧТЭЦ-2, ТЭЦ г.Бишкек; *б* – экономическая эффективность замещения природного газа твердым топливом с изменением доли природного газа с 70 % до 10 % и тепловой загрузки ТЭС (0,4–0,6) установленной мощности; 1 – котлы БКЗ-210-140Ф ЧТЭЦ-2 в количестве n=4 шт.; 2 – котлы ТЭЦ г. Бишкек в количестве n=13 шт.

Экономической мотивацией целесообразности снижения газопотребления на пылегазовых ТЭС может служить сложившаяся на момент принятия решения разница рыночных цен на топливо. При выработке равноэквивалентной продукции, в частности, отпускаемой теплоты с паром (или другим теплоносителем) укрупненный экономический эффект можно оценить по формуле:

$$\pm\Delta Э = Э_1 - Э_2 = \left(C^г B_1^г \eta_{н1}^г + C^у B_1^у \eta_{н1}^у\right) - \left(C^г B_2^г \eta_{н2}^г + C^у B_2^у \eta_{н2}^у\right), \quad (7)$$

где $Э_1$, $Э_2$ – топливная составляющая годовых затрат до и после перехода на технологию использования топлива при равноэквивалентной выработке продукции с минимизацией потребления природного газа, руб./год; $B_1^г$, $B_1^у$ – годовой расход газа и угля до перехода на технологию с минимизацией потребления газа, нм^3/год, т/год; $B_2^г$, $B_2^у$ – годовой расход газа и угля после перехода на технологию с минимизацией потребления газа, нм^3/год, т/год; $C^г$, $C^у$ – цена газа и угля, руб./тыс.нм^3, руб./т; $\eta_{н1}^г$, $\eta_{н1}^у$, $\eta_{н2}^г$, $\eta_{н2}^у$ – условные КПД нетто технологии получения готовой продукции при работе на газе и угле, учитывающие как термические свойства установок, так и затраты электроэнергии на собственные нужды, эксплуатационные и ремонтные расходы, плату за экологические изменения окружающей среды до и после перехода на технологию со снижением потребления природного газа.

Данные по промышленным объектам (ТЭС, ТЭЦ и т.д.) можно найти в [2–11].

Библиографический список

1. Shifting the equipment of thermal power stations for firing different kinds of fuels in flames using the technology of distributed admission of reagents into the furnace / K.V. Osintsev, V.V. Osintsev, M.P. Sukharev, and E.V. Toropov // Thermal engineering (English translation of Teploenergetika). – 2008. – V. 55. – № 4. – Pp .355–360.

2. Джундубаев, А.К. Выбор основных параметров гидротранспортной системы топливоснабжения перспективной Каракечинской ГРЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 102–105.

3. Джундубаев, А.К. Выбор рациональной системы транспортирования каракечинского бурого угля к промплощадке перспективной Кавакской ТЭС / А.К. Джундубаев, Ш.Б. Дикамбаев, Ш.У. Мавлянбеков // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 106–110.

4. Промышленное сжигание непроектного Каракечинского бурого угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 252–255.

5. Использование водоугольных суспензий в энергетике / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 242–247.

6. Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

7. Айталиева, Л.Н. Повышение энергетической эффективности – как одно из решений энергосбережения в топливно-энергетическом комплексе Астраханской области / Л.Н. Айталиева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 32–35.

8. Говорова, К.П. Выявление энергосберегающего потенциала и разработка мероприятий по повышению энергоэффективности Свердловской ТЭЦ / К.П. Говорова, Е.Д. Матюшенко, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 82–84.

9. Зимовец, И.А. Две проблемы повышения эффективности старых угольных котлов при сжигании природного газа / И.А. Зимовец, Г.Ф. Гарифуллина, В.Н. Потапов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 126–129.

10. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла №8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

11. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение за счет утилизации дымовых газов / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, П.В. Обласова // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 139–140.

К содержанию

УДК 661.62 + 621.181.7

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ТОПЛИВА НА РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДЫ В ТОПКЕ КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

А.Г. Реш, Е.В. Торопов

В работе приведены результаты расчетно-теоретического анализа влияния содержания избыточного воздуха и дополнительной воды на радиационные характеристики продуктов сгорания трех видов модельного твердого топлива по изменению плотности собственного излучения недиатермичных газов RO_2 и паров H_2O с учетом их температуры и величины газового излучающего слоя. В рамках принятого изменения параметров обнаружено монотонное снижение плотности потока излучения с увеличением избытка воздуха; при увеличении количества дополнительной воды радиационные свойства RO_2 снижаются на ~ 4,0%, а поток излучения паров воды возрастает почти в 2 раза, при этом несколько уменьшается отставание излучения паров воды от газообразного RO_2.

Ключевые слова: энергетическое топливо, продукты сгорания, котельный агрегат, поток излучения.

Эффективность работы топочных устройств котельных агрегатов (КА) и достаточно полное сжигание в них топлива могут быть достигнуты только при соответствующей организации всех протекающих в топочном объеме физико-химических и тепловых процессов. Адекватными свойствам топлива должны быть конструкция топливо-сжигающих устройств (ТСУ), их мощность, тип, способ организации процессов смешения компонентов горения в ТСУ и в топочном объеме. От этих параметров также зависят характеристики движения потоков воздуха, топлива и топочных газов, перенос горящих объемов и компонентов горения в топке КА, нагрев их до температуры воспламенения и последующие за этим физико-химические преобразования, перенос выделяемой при горении теплоты в объеме топочной камеры, преобразование негорючего остатка топлива и т.п. Результирующим процессом в этой технологической цепи является передача теплоты от топочных газов к нагреваемым теплоносителям – воде, пароводяной смеси, пару и воздуху в воздухоподогревателях. Все эти процессы протекают в зависимости от характеристик топлива и продуктов сгорания.

От характеристик энергетического топлива и его качества также зависят такие конструктивно-режимные параметры, как тепловая мощность КА и отдельного ТСУ, регулируемость процесса горения, минимум затрат энергии на собственные нужда КА и потерь энергии с химическим и механическим недожегом топлива. В этом ряду также стоят эксплуатационные характеристики: надежность, безопасность и простота обслуживания, ре-

монтопригодность, метало – и материалоемкость и др. Краткий и неполный перечень требований к топочным процессам дает возможность понять, что задача оценки качества энергетического топлива – многопараметрическая, которую можно разделить на ряд частных задач. При этом основными правилами оценки должны быть закон сохранения массы в форме материального баланса процесса горения, закон сохранения энергии в форме теплового баланса и закон Гесса, определяющий независимость теплового эффекта реакции горения от схемы реализации процесса.

Теплотехнические качества энергетического топлива в значительной степени определяются соотношением органической и минеральной части и содержанием и видом балластных составляющих в продуктах сгорания – золы A^p и влаги W^p. Технология применения топлива на ТЭС и промпредприятиях позволяет выделить технологические характеристики топлива: плотность и пористость, сыпучесть, гранулометрический состав, выход летучих и спекаемость, механическую прочность и способность к самовозгоранию. Часть этих показателей и характеристик взаимозависима и оказывает влияние на процессы горения и теплообмена.

В настоящей работе поставлена задача – определить влияние увеличения коэффициента избытка воздуха от стехиометрического α = 1,0 до α = 1,1; 1,2; 1,3 и дополнительной влаги сверх W^p на радиационные характеристики продуктов сгорания трех типов модельного твердого топлива – кузнецкого каменного угля марки Д с $Q_н^{рн}$ = 21,90, кузнецкого антрацита марки А с $Q_н^{рн}$ = 24,16 и челябинского бурого угля марки 3Б с $Q_н^{рн}$ = 12,56 МДж/кг. Состав продуктов сгорания при нормальных условиях (0^0С; 0,1013 МПа) и при стехиометрическом сжигании и общий выход продуктов сгорания на кг топлива приведен в нормативных материалах [1, 2], там же приведены влажность $W^{рн}$, содержание золы $A^{рн}$ и другие характеристики этих топлив. Верхний индекс «*н*» здесь и далее означает, что величина взята из нормативных материалов.

При увеличении влажности сверх нормативной за счет смешения топлива с водой в количестве $g_в$, кг воды на кг смеси, снижается теплота сгорания смеси $Q_н^{р,см}$, МДж/кг смеси:

$$Q_н^{р,см} = (1 - g_в) Q_н^{р,н} \quad (1)$$

и требуемое количество воздуха, м^3/кг смеси, при α = 1,0:

$$V_в^{0,см} = (1 - g_в) V_н^{0,н} \quad (2)$$

при увеличении расхода воздуха больше стехиометрического α ≥ 1,0:

$$V_в^{d,см} = \alpha(1 - g_в) V_в^{0,н}. \quad (3)$$

Количество RO_2 в продуктах сгорания, м^3/кг смеси, связано только с горючей частью топлива и может быть определено по формуле:

$$V_{RO_2}^{см} = (1 - g_в) V_{RO_2}^{н}. \quad (4)$$

Количество водяных паров в продуктах сгорания V_{H_2O}, м^3/кг смеси, связано с уменьшением поступления H_2O с влажным воздухом и дополнительным поступлением воды при ее расходе $g_в$:

$$V_{H_2O}^{\alpha,\text{см}} = (1 - g_в) V_{H_2O}^{0,\text{н}} + 0{,}0161(\alpha - 1) V_{\text{в}}^{0,\text{см}} + 1{,}244 g_{\text{в}}. \quad (5)$$

Аналогично определяется количество азота V_{N2} и избыточного кислорода $V_{O_2}^{\alpha,\text{см}}$, м^3/кг смеси:

$$V_{N_2}^{\alpha,\text{см}} = (1 - g_{\text{в}}) V_{N_2}^{0,\text{н}} + 0{,}79(\alpha - 1) V_{\text{в}}^{0,\text{с}}, \quad (6)$$

$$V_{O_2}^{\alpha,\text{см}} = 0{,}21(\alpha - 1) V_{\text{в}}^{0,\text{н}}. \quad (7)$$

Численные коэффициенты в формулах (5)–(7) означают: 0,0161 = =1,24·0,013 – поступление водяных паров с избыточным воздухом, имеющим влажность 0,013 кг/м^3 и удельный объем 1,24 м^3/кг; 0,21 и 0,79 – объемные доли кислорода и азота в воздухе.

Общее количество продуктов сгорания $V_Г^{\alpha,см}$, м^3/кг смеси, определяется суммированием расчетных величин по формулам (4)–(7):

$$V_Г^{\alpha,см} = V_{RO_2}^{см} + V_{H_2O}^{\alpha,см} + V_{N_2}^{\alpha,см} + V_{O_2}^{\alpha,см}. \quad (8)$$

Эти данные позволяют определить объемную долю трехатомных (недиатермичных) газов $RO_2 = CO_2 + SO_2$ и H_2O в объеме продуктов сгорания смеси топлива с водой при избытке воздуха $r_{RO_2} = V_{RO_2}^{см} / V_Г^{\alpha,см}$, $r_{H_2O} = V_{H_2O}^{\alpha,см} / V_Г^{\alpha,см}$ и их парциальное давление и рассчитать плотность потока собственного излучения этих компонентов, Вт/м^2,

$$E_{RO_2} = 3{,}5\left(p_{RO_2} l\right)^{0,33} (T/100)^{3,5}, \quad (9)$$

$$E_{H_2O} = 3{,}5 p_{H_2O}^{0,8} l^{0,6} (T/100)^{3,0}. \quad (10)$$

В зависимостях (9)–(10) парциальное давление недиатермичных газов определяется в функции давления в топке КА, то есть для КА с уравновешенной тягой общее давление принимается равным атмосферному 0,1013 МПа, тогда $p_{RO_2} = 0{,}1013 r_{RO_2}$, $p_{H_2O} = 0{,}1013 r_{H_2O}$.

В таблицах 1, 2 приводятся результаты анализа по описанной выше методике влияния избыточного воздуха и дополнительной воды на радиационные свойства топочной среды. В таблице 1 анализируется влияние только избыточного воздуха на плотность потока собственного излучения

E_{RO_2} и E_{H_2O} при отсутствии дополнительной воды $g_в = 0$ и при изменении температуры газового слоя толщиной $l = 3{,}0$ м от 1300 до 1500 К.

Таблица 1

Радиационные свойства продуктов сгорания при $g_в = 0$, $\alpha = var$

Уголь, бассейн, марка	Температура, К	Плотность потока собственного излучения, E_{RO_2} / E_{H_2O}, Вт/м^2			
		$\alpha = 1{,}0$	$\alpha = 1{,}1$	$\alpha = 1{,}2$	$\alpha = 1{,}3$
Кузнецкий, Д	1500	4897,5/176,1	4758,4/165,5	4632,5/156,8	4518,3/149,3
	1400	3846,8/143,2	3737,6/134,6	3638,7/127,5	3589,0/121,4
	1300	2967,9/114,6	2883,7/107,8	2807,4/102,1	2837,1/97,2
Кузнецкий, А	1500	5100,4/106,4	4951,7/99,1	4813,3/96,3	4691,6/92,2
	1400	4006,2/86,5	3889,4/80,6	3780,7/78,3	3685,1/75,0
	1300	3090,9/62,2	3000,8/64,5	2916,9/62,7	2843,2/60,1
Челябинский, 3Б	1500	4858,6/217,9	4728,0/205,2	4607,2/194,2	4496,2/184,4
	1400	3816,3/177,2	3713,7/166,8	3618,8/157,9	3531,6/149,9
	1300	2944,4/141,9	2865,2/133,5	2792,0/126,4	2724,7/120,0

Таблица 2

Поток излучения топочной среды при $l = 3{,}0$ м, $\alpha = 1{,}1$, $g_в = 0{,}4$

Уголь: бассейн, марка	Температура топочной среды, К		
	1300	1400	1500
Кузнецкий, Д	6761,8/647,5	8764,0/808,7	11157,7/994,6
Кузнецкий, А	10136,2/519,5	13137,8/648,4	16726,0/797,5
Челябинский, 3Б	9446,3/847,2	12243,5/1058,1	15587,5/1301,4

Чтобы учесть влияние изменения толщины газового слоя при $l_1 \neq 3{,}0$ м необходимо приведенные в таблицах 1, 2 данные по радиационным свойствам газов умножить на поправочные множители $0{,}696 l_1^{0{,}33}$ для RO_2 и $0{,}517 l_1^{0{,}6}$ для H_2O.

В заключение необходимо отметить следующее:

1. Как показал анализ, изменение радиационных свойств продуктов сгорания трех модельных видов твердого топлива имеет общие черты: при увеличении избытка воздуха радиационные свойства обоих недиатермичных газов снижаются в одинаковой степени, отставая от увеличения избытка воздуха на ~ 20 %, при этом между радиационными потоками RO_2 и H_2O сохраняется приблизительно 22-х кратный разрыв.

2. При добавке к твердому топливу дополнительной влаги излучение RO_2 снижается приблизительно на 3,0 %, а излучение H_2O возрастает почти в 2,0 раза, разрыв между этими потоками сохраняется, но снижается до 4-х кратного.

3. Комплексную оценку влияния избытка воздуха и дополнительной воды можно произвести с учетом полученных результатов при анализе результирующего влияния балластных составляющих на теплоотдачу излучением и конвекцией в элементах КА.

Библиографический список

1. Осинцев, К.В. Расчет теплообмена в топке котельного агрегата / К.В. Осинцев, Е.В. Торопов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. – 180 с.

2. Богомолов, В.В. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович, Н.В. Новицкий, Н.А. Тимофеева. – Челябинск, УралВТИ, 2004. – 314 с.

К содержанию

УДК 621.1 + 697.3

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ МИКРОРАЙОНА г. ЧЕЛЯБИНСКА

А.Г. Реш, Т.Б. Жиргалова

Предложен вариант системы теплоснабжения жилого микрорайона города Челябинска от энергоэффективного источника теплоснабжения.

Ключевые слова: теплоснабжение, тепловые нагрузки.

В связи со строительством нового микрорайона в г. Челябинске увеличилась потребность в тепловой энергии, поставляемой городу. В результате расчета тепловых нагрузок по укрупнённым показателям было определено, что для обеспечения микрорайона (5700 жителей) теплом и горячей водой требуется 21МВт тепловой мощности.

Для осуществления теплоснабжения рассматривалось два возможных варианта [1, 2, 3, 4]: покупка тепловой энергии у ОАО «Челябоблкоммунэнерго» от существующей котельной. Стоимость 1 Гкал теплоты для потребителей при этом варианте составляет 1047,84 рублей с НДС; строительство новой котельной, принадлежащей городскому округу. Стоимость 1 Гкал теплоты для потребителей составит 839,16 рублей с НДС.

В результате анализа состояния существующих тепловых сетей и тарифов на тепловую энергию ОАО «Челябоблкоммунэнерго» в г. Челябинске,

была разработана схема теплоснабжения от новой водогрейной котельной, принадлежащей городу. В этом случае себестоимость выработки 1 Гкал теплоты составит 646,5 руб., а отпускная цена для населения – 839,16 руб. с НДС. Таким образом, за счет осуществления теплоснабжения от новой городской котельной потребители будут платить меньше, а поступления в городской бюджет возрастут [5,6].

Предполагается установка 3 котлов КВ-ГМ-7,56-115Н («Дорогобуж-котломаш»), мощностью 7,56 МВт каждый. Котельные агрегаты КВ-ГМ-7,56-115Н зарекомендовали себя как надежное, легкоремонтируемое и эффективное оборудование с КПД около 94 %. Котлы оборудуются автоматизированными газовыми горелками «Cib Unigas» P1030. Особенностью данных горелок является большой интервал нагрузок. Горелка оснащена клапаном подачи газа и клапаном подачи воздуха. Для того чтобы горение было оптимальным, производятся автоматическое регулирование подачи газа и подачи воздуха, то есть выбирается соотношение «газ–воздух» [7, 8].

Предусмотрена двухконтурная тепловая схема котельной [9]. Первичный контур: котлы – термогидравлический распределитель. Параметры теплоносителя в первичном контуре 115/70 °С. Циркуляция воды в первичном контуре поддерживается циркуляционными насосами NB 80-200/17 Grundfos, установленными на обратном трубопроводе. Вторичный контур: термогидравлический распределитель–системы потребления тепла. Параметры теплоносителя во вторичном контуре 95/70 °С. Циркуляция воды во вторичном контуре обеспечивается сетевыми насосами NB 150-315/291 Grundfos с частотным регулированием, установленными на подающем трубопроводе. Подпитка системы теплоснабжения осуществляется насосом CR-15/5 Grundfos. Заполнение бака подпиточной воды осуществляется от технического водопровода, подключенного к существующей насосной станции. Также предполагается установка химводоочистки на базе комплекса пропорционального дозирования комплексона ИОМС, насосом дозатором во всасывающую линию подпитки. Частота пульсаций выставляется в зависимости от величины подпитки, которая определяется из показаний датчика протока [10].

Предусматривается:

– управление работой сетевых насосов в режиме «рабочий-резервный» с целью обеспечения устойчивой работы отопительного контура [11];

– управление насосами на линии подпитки. При давлении в обратном трубопроводе от потребителей ниже заданного включается насос подачи подпиточной воды в обратный контур линии потребителей;

– оборудование котельной системой автоматического контроля и регулирования параметров теплоносителя.

Система управления оснащена главным выключателем, зажимами для всех внешних кабелей, всеми необходимыми предохранителями и распределительными устройствами. Регулирование характеристик в соответствии с требованиями путем управления с обратной связью такими параметрами: давление, перепад давления, расход, температура, перепад температур, уровень жидкости, регулирование без обратной связи.

Возможно выполнение регулировок в рамках выбранного режима управления.

При регулировке параметров управления они могут оптимально устанавливаться в соответствии с условиями эксплуатации.

Отвод дымовых газов будет осуществляться через железобетонную дымовую трубу диаметром 1000 мм и высотой 40 м.

Срок окупаемости данной системы теплоснабжения составит 5,6 года, что считается хорошим показателем в сфере энергетики.

Библиографический список

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд. стер. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.

2. Торопов, Е.Е. Power-efficient pumping systems with the intellectual control / Е.Е. Торопов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 21–22.

3. Распределенное имитационное моделирование систем теплоснабжения / А.А. Басалаев, Т.А. Барбасова, А.Р. Хасанов, В.В. Абдуллин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 55–58.

4. Писцов, С.А. Анализ надежности и повышение эффективности работы тепловых сетей города / С.А. Писцов, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 260–261.

5. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение в многоквартирных домах г. Сима / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, И.В. Юдинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 141–143.

6. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

7. Жиргалова, Т.Б. Реконструкция системы сжигания топлива котла № 8 ЧТЭЦ-2 / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 146.

8. Осинцев, К.В. Low-temperature combustion technology / К.В. Осинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 16–20.

9. Писцов, С.А. Анализ надежности и повышение эффективности работы тепловых сетей города / С.А. Писцов, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 260–261.

10. Марков, А.О. Диалоговая система определения величины подпитки теплосети / А.О. Марков, Г.Г. Орлов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 210.

11. Белкин, А.П. Повышение энергоэффективности эксплуатации сетевых насосов тепловых пунктов / А.П. Белкин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 61–63.

К содержанию

УДК 621.311.22 + 621.1

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НОВЫЙ ИСТОЧНИК ТЕПЛА

А.Г. Реш, Т.Б . Жиргалова

Приведен вариант перевода системы теплоснабжения от источника при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии ПГУ (ЧТЭЦ-3).

Ключевые слова: ПГУ, тепловые сети, тепловые нагрузки.

Современные централизованные системы теплоснабжения представляют собой сложный комплекс, включающий источники тепла, тепловые сети, насосные станции, тепловыми пунктами и абонентские вводы, оснащенные системами автоматического управления [1].

Для централизованного теплоснабжения используются два типа источников тепла: теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и районные котельные (РК).

В г. Челябинске активно внедряются в теплоэнергетику энергоэффективные источники теплоснабжения, в частности, при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии – это ПГУ (ЧТЭЦ-3) [2, 3].

Челябинские тепловые сети являются наиболее прогрессивным и динамично развивающимся предприятием г. Челябинска. Значительными темпами развивается жилой фонд, открываются новые предприятия, все это приводит к появлению новых потребителей тепла, увеличению объема отпускаемой тепловой энергии и соответственно повышаются требования к надежности оборудования тепловых сетей.

Город Челябинск относиться к большим городам России и находится в относительно равнинной местности Юго-Восточной части Урала. Вся Челябинская область является территорией с достаточно низкой среднегодовой температурой наружного воздуха, зимой температура может достигать экстремальных значений – 35 °С и ниже. Жители Металлургического района г. Челябинска живут в основном в многоэтажных многоквартирных домах, отапливаемых от центральных источников тепла. В качестве источника теплоснабжения для Северной зоны выступают ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго»(71,810 тыс. чел. являются потребителями тепла от ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго»).

Основные данные о системе теплоснабжения от ТЭЦ ООО «Мечел-энерго»:

– число жителей подсоединенных к центральному отоплению;

– минимальная годовая температура наружного воздуха – 34,0 °С;

– число дней отопительного сезона в году – 218 дней;

– основное топливо для производства тепла на ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго» – природный газ;

– альтернативное топливо – промышленный газ, уголь;

– топливо при аварийной ситуации – уголь;

– теплоноситель – горячая вода;

– максимальная температура отопительной воды в подающем трубопроводе от ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго» – 120 °С.

В настоящее время разработан и осуществлен перевод тепловых сетей и систем теплопотребления Северной зоны Металлургического района на новый источник тепла – ЧТЭЦ-3, от парогазового блока – энергоблока ст. № 3.

Построена новая понизительная насосная станция для снижения давления на магистралях. Благодаря этому режим теплоснабжения Северной зоны не будет зависеть от режима тепловой сети в целом. Вследствие этого будет решена многолетняя проблема с недопустимо высоким давлением на внутренних сетях потребителей [4].

В связи с выбором нового источника тепла – ЧТЭЦ-3(ПГУ-3) был разработан гидравлический режим, а также произведена реконструкция ЦТП-9 переход на независимую схему теплоснабжения, что обусловлено несовпадением гидравлических режимов тепловой сети и системы теплоснабжения абонентов, так как ЦТП находится в нижней точке тепловой сети отметка 216, а источника 246.

Повышение энергоэффективности за счет перевода системы теплоснабжения Северная Металлургического района г. Челябинска на новый источник теплоты заключаются в следующем [5, 6, 7]:

1) уменьшение расхода воды на теплоснабжение в связи с повышением температуры теплоносителя, так как ЧТЭЦ-3 работает по температурному графику 150/70 °С, а ТЭЦ ООО «Мечел-Энерго» по температурному графику 120/70 °С;

2) уменьшение потерь напора за счет снижения расхода сетевой воды, вследствие чего отсутствует необходимость увеличения диаметров трубопровода, что экономически и технически выгодно [8, 9];

3) повышение надежности тепловых сетей в системах транспортировки и распределения теплоты, а также уровня безопасности работы тепловых сетей в связи с уменьшением давления на магистралях в Северной зоне теплоснабжения Металлургического района [10];

4) повышение надежности и безопасности контура теплоснабжения ЦТП-9, вследствие перехода на независимую схему теплоснабжения [11].

Библиографический список

1. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях :учебник для вузов / О.Л. Данилов, А.Б. Гаряев, И.В. Яковлев и др.; под ред. А.В. Клименко. – 2-е изд. стер. – М.:Издательский дом МЭИ, 2011. – 424 с.

2. Лымбина, Л.Е. Вектор развития энергетики в Уральском федеральном округе / Л.Е. Лымбина, В.Д. Шестеров // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 199–204.

3. Лымбина, Л.Е. Поступательное развитие региональной энергетики Южного Урала / Л.Е. Лымбина // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 195–198.

4. Жиргалова, Т.Б. Энергосбережение в многоквартирных домах г. Сима / Т.Б. Жиргалова, Л.Е. Лымбина, И.В. Юдинцев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – № 1. – С. 141–143.

5. Баева, М.Н. Проблема распределения затрат топлива на производство электрической и тепловой энергии / М.Н. Баева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 44–47.

6. Горсткин, Д.А. К вопросу о методах распределения затрат теплоты и топлива по видам энергетической продукции / Д.А. Горсткин, Д.М. Суворов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 85–87.

7. Торопов, Е.Е. Power-efficient pumping systems with the intellectual control / Е.Е. Торопов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 21–22.

8. Ильин, Р.А. Тепловые потери тепловых сетей с изоляцией Tlm Ceramic / Р.А. Ильин // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 151–154.

9. Марков, А.О. Диалоговая система определения величины подпитки теплосети / А.О. Марков, Г.Г. Орлов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 210.

10. Писцов, С.А. Анализ надежности и повышение эффективности работы тепловых сетей города / С.А. Писцов, А.А. Поморцева // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 260–261.

11. Юртаев, М.А. Энергосбережение за счет автоматизации центральных тепловых пунктов / М.А. Юртаев, Т.Б. Жиргалова, А.Ф. Минникаев // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 304–307.

К содержанию

УДК 536.2 + 621.036

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ МАТРИЦЕ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ НАСАДОК

Е.В.Торопов, Д.К. Волкинд

Регенераторы различного температурного уровня и мощности широко применяются в промышленной теплоэнергетике и котельной технике от МГД-генераторов до систем подготовки компонентов горения в металлургии включительно. Комплекс проблем, встающих при усовершенствовании этих аппаратов, зависит от требуемого уровня нагрева газообразных сред и их количества и включает проблемы теплообмена, аэромеханики и механики прочности материалов при высокой температуре и давлении. Проблемы объектной (параметрической) идентификации физико-математических моделей регенеративного теплообмена возникают в связи с необходимостью повышения точности расчетов и управляемости процессов, в первую очередь в связи с актуальностью разработок новых процессов и аппаратов. В настоящей работе рассмотрены варианты конструктивного совершенствования матрицы насадок регенераторов в рамках разработанной новой схемы расчета показателей регенеративного теплообмена, реализация которой позволила определить достижимые показатели в функции заданных параметров системы и рассчитать коэффициент теплообмена для трех конструкций матрицы насадки регенератора.

Ключевые слова: регенератор, насадка.

Конструктивные решения, основанные на научных разработках и практических результатах, которые лежат в основе перспективных конструкций регенераторов, определяют уровень достигаемых температур и срок службы аппаратов и всей системы в целом. Поэтому разработка новых конструкций регенераторов и их элементов – системы горения топлива, теплообменной поверхности матрицы насадки, огнеупорной и теплоизоляционной кладки, представляет большой практический интерес. Актуальность проблемы непосредственно вытекает из необходимости осуществления в настоящее время на технологических агрегатах высокотемпературного нагрева дутья, из задач разработки и совершенствования конструктивных и режимных особенностей аппаратов в направлении достижения высоких теплотехнических показателей и эксплуатационной стойкости.

Совершенствование конструкций и режимов работы высокотемпературных регенераторов шло как в направлении промышленных испытаний аппаратов и их элементов, так и в области научного исследования процес-

сов тепло и массообмена и при сжигании топлива, и в каналах насадки, и в отдельных элементах аппаратов. В качестве стимулятора научных и практических поисков выступала потребность технологии в высокотемпературном дутье, и это было связано с повышением давления в агрегате, совершенствованием подготовки исходных материалов, применением комбинированного и обогащенного кислородом дутья, внедрением других технологических усовершенствований.

С позиций достижений материаловедения модернизация системы подготовки и нагрева воздушного дутья была связана с применением огнеупорных и изоляционных материалов повышенного качества в тракте горячего дутья, в кладке стен и купола аппаратов, в изготовлении насадочных огнеупоров. Модернизации также подверглись металлоконструкции и механическое оборудование, особенно с водяным охлаждением, технология монтажа кожуха и элементов, деталей эвакуации продуктов сгорания и подачи холодного дутья. Эти усовершенствования стали возможны на основе достижений в материаловедении при изготовлении огнеупоров и специальных сталей, в свою очередь они сказались на совершенствовании технологии нагрева дутья. Но надежность и долговечность деталей и элементов оборудования обеспечиваются не только их высокими служебными показателями, но и сочетанием адекватных режимных теплофизических условий – температурой, давлением, компенсацией термических напряжений и химическим составом газовых сред.

Все факторы, влияющие на технико-экономические, экологические, энергетические и другие показатели работы системы нагрева воздушного дутья, можно условно разделить на группы конструктивных и режимных параметров. Причем эти группы тесно взаимосвязаны и взаимозависимы: определенный уровень интенсификации процессов горения и тепло-и массообмена может быть реализован только в воздухонагревателях, конструктивно обеспечивающих реализацию этих показателей. С другой стороны, предельные показатели, достигнутые на аппаратах определенной конструкции, стимулируют разработку новых конструкций и системы горения топлива, и насадочной камеры.

Количество теплоты Q_2, Дж/цикл, передаваемой нагреваемому теплоносителю за цикл, определяется по формуле

$$Q_2 = \text{æ}H_0\Delta t_л, \qquad (1)$$

где $\Delta t_л$ – логарифмическая разность температур теплоносителей, град, определяемая как для поверхностного теплообменника рекуперативного типа; H_0 – полная поверхность теплообмена одного аппарата, м^2. Это же количество теплоты должно быть передано от продуктов сгорания к нагреваемой насадке для условий установившегося теплового режима без учета тепловых потерь кожухом аппарата в окружающую среду.

Коэффициент теплообмена $æ$, Дж/(м^2·град·цикл), можно определить через коэффициент теплообмена идеального регенератора $æ_{id}$, умноженный на коэффициент использования поверхности теплообмена ξ:

$$æ = æ_{id} \cdot \xi, \tag{2}$$

где ξ, согласно работам ВНИИМТ [1] , определяется по зависимости:

$$\xi = \xi_x + A\left[1 - e^{-k(N_1+N_2)}\right]. \tag{3}$$

В формуле (3) факторы ξ_x, A, k являются функциями шести определяющих критериев $Bi_{1,2}$, $Fo_{1,2}$, $N_{1,2}$, для их определения нами предложены аппроксимации [2].

Коэффициент теплообмена идеального регенератора определяется при отсутствии термического сопротивления аккумуляционных процессов по формуле:

$$æ_{id} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1\tau_1} + \frac{1}{\alpha_2\tau_2}}. \tag{4}$$

Анализируя зависимость для $æ_{id}$, следует отметить, что термическое сопротивление теплообмена идеального регенератора можно представить последовательным соединением двух термических сопротивлений для периодов нагрева и охлаждения, каждое из которых имеет структуру:

$$\frac{1}{\alpha_{1,2}} = \frac{1}{Bi_{1,2}} \cdot \frac{1}{Fo_{1,2}} \cdot \frac{1}{\rho c \delta}. \tag{5}$$

Изложенные выше соотношения включают диаметр канала $d_э$ в явном виде, но степень у этого фактора в зависимости (3) получена и в целом, и в дробном виде, и положительного и отрицательного знака, что несколько затрудняет анализ результатов. Поэтому представляется рациональным произвести декомпозицию основного соотношения и оценить влияние диаметра канала насадки на отдельные элементы зависимости для $æ$ (2).

Представляет определенный интерес вначале произвести оценку численных значений $æ_{id}$ в зависимости от коэффициентов теплоотдачи в период нагрева α_1 и охлаждения α_2 насадки и от длительностей этих периодов τ_1 и τ_2. Причем необходимо отметить, что при размерности коэффициентов теплоотдачи Вт/м^2·К = Дж/с·м^2·К длительности периодов необходимо подставлять в секундном измерении, а поскольку длительность периодов измеряется за цикл работы аппарата, то размерность $\tau_{1,2}$ при определении величин в полном цикле должна быть с/цикл. Ранее [2]отмечалось, что длительности периодов связаны друг с другом через число аппаратов в системе N_a и длительность периода реверса $\Delta\tau$. Таким образом, при N_a = 3, $\Delta\tau$ = 0,1 часа = 360 с, τ_2 = 3600 с, τ_1 = 6840 с; при N_a = 2, τ_2 = 3600 с, $\Delta\tau$ = 360 с, τ_1 = 3240 с; при N_a = 4, τ_2 = 3600 с, τ_1 = 10440 с, $\Delta\tau$ = 360 с.

Расчет $æ_{id}$ для этих параметров при $\alpha_1 = 30; 35; 40$; и $\alpha_2 = 20; 25; 30$ Вт/м^2·К для $\xi = 1{,}0$ приведен в таблице 1 при отсутствии термического сопротивления аккумуляционных процессов.

Таблица 1

Коэффициент теплообмена $æ_{id}$, кДж/м^2·К·цикл, при $\xi = 1{,}0$

Коэффициенты теплоотдачи, Вт/м^2·К,			Число аппаратов в системе, N_a,		
α_1	α_2	α_1/α_2	2	3	4
30	20	1,50	41,36	53,30	58,54
35	25	1,40	50,18	65,41	72,21
40	30	1,33	58,91	77,43	85,81

Приведенные в табл. 1 данные позволяют оценить величину $æ_{id}$ как максимальное значение коэффициента теплообмена, реальные значения $æ$ будут по величине ниже табличных данных, так как фактически $\xi < 1{,}0$. Следует отметить, что по данным табл. 1 значения коэффициента теплообмена монотонно растут с увеличением коэффициентов теплоотдачи и числа аппаратов в системе.

При реализации расчетов для анализа конвективной теплоотдачи по формулам, рекомендованным в работе [1], возникают затруднения, связанные с изменением теплофизических свойств потоков газообразных теплоносителей при изменении давления и температуры, в частности, это касается вязкости газов. Принято считать [3], что определение коэффициента кинематической вязкости смеси газов можно осуществить по аддитивной формуле, в зависимости от объемного содержания компонентов газовой смеси и коэффициентов кинематической вязкости индивидуальных газов, входящих в смесь. Но температурные зависимости индивидуальных газов изучены слабо, а относительно зависимости вязкости газов от давления пока нет четких рекомендаций у специалистов по молекулярной физике. Применение теории Максвелла о независимости теплопроводности и вязкости от плотности в молекулярной физике газообразных сред, по-видимому, ограничивается давлением, далеким от критического. Так, рекомендации о применении формулы Сатерленда [4] ограничиваются интервалом температур 0–300 ^{o}C. Еще сложнее решается вопрос о величинах вязкости при турбулентном режиме течения, когда к молекулярному механизму переноса импульса добавляется турбулентный механизм, и вязкость оказывается зависящей от корреляций пульсаций скорости пространственного течения. Этот вопрос и ряд связанных с ним задач требует рассмотрения режимов течения теплоносителей в каналах насадки доменных воздухонагревателей.

На основе вышеприведенных аргументов представляется рациональным несколько видоизменить методику расчета, сохранив как основу принцип определения эффективности работы теплоаккумулирующей матрицы через коэффициент теплообмена $æ$.

Тепловой баланс теплоаккумулирующей матрицы можно представить в виде $kQ_1 = Q_2$, кДж/цикл, где $Q_{1,2}$ – количество теплоты, передаваемой за цикл от продуктов сгорания топлива (индекс 1) к нагреваемому дутью (индекс 2); k – коэффициент тепловых потерь. Этот коэффициент при полном сжигании топлива определяется по потерям с уходящими дымовыми газами q_2 = 8 % при $t_1^{''}$ = 300 °С, а также по потерям теплопередачей через огнеупорную кладку и теплоизоляцию в окружающую среду q_5 = 1,0 % , тогда $k = (100 – q_2 – q_5)/(100 – q_5) = 0{,}92$.

Количество теплоты, полученное дутьем за цикл Q_2, связано с технологическим заданием по расходу $v_д$ и температуре горячего дутья $t^{''}_д$; эти параметры определяются технологией доменной плавки и в условиях модельного примера для доменной печи полезным объемом 2500 м^3 можно принять $v_д$ = 5000 м^3/мин = 83,3 м^3/с при нормальных условиях и $t^{''}_д$ = 1300 °С [1]. При относительном живом сечении $f_{ж}$ = 0,335 м^2/м^2 и при полном сечении насадочной камеры $F_{нк}$ = 35,5 м^2 полное живое сечение $F_{ж}$ = 11,89 м^2, что дает возможность рассчитать плотность потока массы $(\rho w)_2$ = 9,04 кг/м^{2}с. Количество теплоты, которую необходимо передать дутью за цикл при длительности дутьевого периода 3600 с $Q_2 = v_д \Delta i_2 \cdot 3600 = 523{,}89 \cdot 10^6$ кДж.

Определенная таким способом плотность потока массы в соответствии с уравнением сплошности не изменяется при изменении температуры и давления газообразной среды, поэтому целесообразно число Рейнольдса и режим движения среды определять по формуле $Re = (\rho w)d/\mu$, где d – эквивалентный диаметр канала, м, μ – динамическая или абсолютная вязкость среды, Н·с/м^2, которая зависит от температуры, но не зависит от давления. В условиях модельного числового примера Re = 8236,4 при d = 0,041 м и таким образом, при $Re > 4260$ $Nu = 0{,}0218 \cdot Re^{0,8}$; для других интервалов числа Рейнольдса: при $1700 < Re < 4260$ $Nu = 2{,}95 \cdot 10^{-4} Re^{1,31}$; при $Re < 1700$ $Nu = 1{,}83 Re^{0,14}$ [1]. В соответствии с этими данными коэффициент теплоотдачи конвекцией в воздушный период для всех интервалов Re:

$$\alpha_{2к} = A_2 (\rho w)_2^m d^{m-1} \mu_2^{-m}, \qquad (6)$$

где A_2 = 1,463·10^{-3}; 0,198·10^{-4}; 0,1228; m = 0,8; 1,31; 0,14 – соответственно для трех отмеченных выше режимных интервалов по числам Re. В условиях модельного примера при d = 0,041 м $\alpha_{2к} = 27{,}09 d^{-0,2} = 51{,}31$ Вт/м^{2}К и далее $\alpha_2 = \alpha_2^к = 51{,}31$ Вт/м^{2}К, так как $\alpha_2^л \approx 0$.

Количество теплоты, полученное аккумулирующей матрицей насадки за цикл Q_1, определяется через коэффициент потерь теплоты и принятую величину Q_2: в условиях примера $Q_1 = Q_2/k = 523{,}89 \cdot 10^6 / 0{,}92 = 569{,}44 \cdot 10^6$ кДж. С другой стороны, количество теплоты, которую необходимо подать на вход в каналы насадки, можно определить через энтальпию подаваемых на вход в насадку продуктов сгорания и потери:

$$Q_1 = B V_\alpha \tau_1 i_1^{'} = Q_2 k, \qquad (7)$$

где произведение расхода топлива B на выход продуктов сгорания с одного м^3 топлива V_α, определяемый расчетом горения топлива, дает возможность рассчитать по уравнению теплового баланса (7) и заданному по технологическим соображениям Q_2 расход топлива в м^3/с: $B = Q_2/(kV_\alpha\tau_1 i_1')$. Здесь i_1', кДж/м^3, – энтальпия продуктов сгорания топлива на входе в насадку, определяемая заданной температурой t_1', °С.

Полученная зависимость (7) позволяет сравнительно просто определить плотность потока массы через «живое» $F_{ж}$, м^2, сечение насадки ρw, кг/м^2·с:

$$BV_\alpha\rho / \tau_1 F_æ = (\rho w)_1' = (\rho w)_1'', \quad (8)$$

определить число Рейнольдса для периода нагрева насадки:

$$Re = (\rho w)_1 d / \mu_1 \quad (9)$$

и выбрать расчетную формулу для числа Нуссельта в интервалах чисел Рейнольдса, рассмотренных выше. В условиях модельного примера при $(\rho w)_1$ = 2,55 кг/м^2·с Re = 55,435·10$^3 d$, при d = 0,041 м Re_1 = 2272, Nu = 2,95·10$^{-4} Re^{1,31}$ и коэффициент теплоотдачи конвекцией в период нагрева насадки:

$$\alpha_1^{ê} = 2{,}95\times10^{-4}\frac{\lambda_1}{\mu_1^{1,31}}(\rho w)_1^{1,31} d^{0,31} \quad (10)$$

и далее $\alpha_1^{к}$ = 48,326$d^{0,31}$, Вт/м^2·К.

В общем случае для периодов нагрева и охлаждения насадки:

$$\alpha_{1,2}^{ê} = C_{1,2} d^{m_1} = A_{1,2}\lambda_{1,2}(\rho w)_{1,2}^{m}\mu_{1,2}^{m} d^{m_1}, \quad (11)$$

где в условиях модельного примера A_1 = 2,95·10^{-4}, A_2 = 0,0218, m_1 = 1,31, m_2 = 0,8.

Коэффициент теплоотдачи излучением для периода нагрева насадки определяется по составу продуктов сгорания, определенному расчетом сжигания топлива (здесь не приводится); состав сухого доменного газа: CO = 22,0 %, CO_2 = 17,5%, H_2 = 5,0 %, CH_4 = 0,3%, N_2 = 55,7 %, влажность на сухую массу 22 г/м^3; в продуктах сгорания при коэффициенте расхода воздуха α = 1,10 содержание трехатомных газов CO_2 = 24,0 %. H_2O = 5,0 % (p_y = 0,24, $p_в$ = 0,05).

Коэффициенты теплоотдачи излучением можно представить в виде:

$$\alpha_{1,2}^{ë} = B_{ó} d_{ý}^{0,33} + B_{â} d_{ý}^{0,6}; \quad (12)$$

где

$$B_{ó} = \frac{3{,}317\,ð_{ó}^{0,33}}{\Delta T}\left(\frac{T_{ã}}{100}\right)^{3,5}; \quad B_{â} = \frac{3{,}175\,p_{â}^{0,8}}{\Delta T}\left(\frac{T_{ã}}{100}\right)^{3,0}; \quad (13)$$

Эти коэффициенты включают парциальное давление углекислоты p_y и водяного пара $p_в$ соответственно. В вышеприведенных зависимостях $T_г$ – температура газовых сред усредненная по высоте канала насадки, а ΔT –

средний температурный напор. Таким образом, полные коэффициенты теплоотдачи в период нагрева насадки (индекс 1) и в период охлаждения (индекс 2) определяются по формулам:

$$\alpha_{1,2} = \tilde{N}_{1,2} d_э^{m-1} + B_\delta d_э^{0,33} + B_\alpha d_э^{0,6}. \quad (14)$$

Входящий в формулу (20) фактор $d_э^{m-1}$ можно преобразовать в равный ему по значению фактор $d_э^{-(1-m)}$, который соответствует обратно пропорциональной зависимости от диаметра канала, это более отвечает физическим представлениям, так как показатель степени при числе Рейнольдса для случая теплоотдачи в каналах насадки доменных воздухонагревателей обычно меньше единицы ($m \le 1{,}0$). Также для обычного доменного дутья, не имеющего компонентов, обладающих способностью излучать и поглощать энергию излучения, кроме незначительного количества водяных паров, соответствующих естественной влажности воздуха, можно полагать $\alpha_2^{л} = 0{,}03\alpha_2^{к} \approx 0$. Подставив в (14) значения $\alpha_{1,2}$ из формулы (20), можно получить зависимость $æ_{id}$ от $d_э$ в явном виде:

$$æ_{id} = U_2 d^{m-1} \Big/ \left\{1 + U_2 d^{m-1} \Big/ \left(U_1 d^{m-1} + B_\delta \tau_1 d^{0,33} + B_\alpha \tau_1 d^{0,6}\right)\right\}, \quad (15)$$

где параметры $U_{1,2}$ означают:

$$U_{1,2} = (A\tau\lambda)_{1,2} \left(\rho w/\mu\right)_{1,2}^{m_{1,2}}. \quad (16)$$

Результаты расчета æ$_{id}$ по полученным зависимостям приведены в таблице 2.

Таблица 2

Коэффициент $æ_{id}$ в функции заданных технологических параметров

Заданный расход дутья, $v_Д$, м^3/мин, диаметр канала насадки, $d_э$, м		Число N_a = 2, τ_1 = 3240 с, τ_2 = 3600 с	Число N_a = 3, τ_1 = 6840 с, τ_2 = 3600 с	Число N_a = 4, τ_1 =10440 с, τ_2 = 3600 с
$v_Д$ = 5000 м^3/мин	$d_э$ = 0,030 м	87,137	122,550	140,240
	$d_э$ = 0,040 м	92,300	127,700	144,500
	$d_э$ = 0,500 м	98,610	136,400	154,800
$v_Д$ = 4000 м^3/мин	$d_э$ = 0,030 м	76,566	105,900	120,200
	$d_э$ = 0,040 м	78,020	104,740	117,210
	$d_э$ = 0,050 м	78,920	104,080	115,500
$v_Д$ = 3000 м^3/мин	$d_э$ = 0,030 м	65,370	88,120	98,785
	$d_э$ = 0,040 м	66,240	86,750	95,960
	$d_э$ = 0,050 м	65,550	83,930	91,280

Примечание: Для соответствия данным модельного примера вместо $d_э$ = 0,040 м в расчеты вводился диаметр $d_э$ = 0,041 м, что соответствует отклонению в 2,5 %

Приведенный выше материал является результатом разработки новой методической схемы предварительного расчета эффективности насадочной матрицы регенераторов. Эта схема с определенной степенью соответствия

может быть названа схемой инверсного теплового баланса, когда необходимые теплообменные характеристики аппаратов рассчитываются на основе требований технологии доменной плавки, в то время как процесс нагрева дутья идет в противоположном направлении, от подачи топлива и воздуха горения, а затем холодного дутья в аппараты.

Эта схема позволяет поставить задачу достижения определенного уровня интенсификации процессов теплообмена, которая должна быть достигнута при выполнении требований технологии; эта схема должна быть дополнена аэродинамическими расчетами тракта продуктов сгорания с определением резервов давления и характеристик тягодутьевых устройств. Получив по предлагаемой схеме коэффициент теплообмена $æ_{id}$ без учета термического сопротивления теплоаккумулирующего материала матрицы насадки, можно определить теоретический предел, который реально не может быть достигнут, так как наличие термического сопротивления теплоаккумулирующего материала снижает реальный коэффициент теплообмена: $æ=æ_{id}\xi$, где $\xi < 1{,}0$. Также требуемые для достижения рассчитанного $æ_{id}$ коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{1,2}$ могут быть названы минимально необходимыми, так как при «включении» термического сопротивления материала теплоаккумулирующей матрицы для достижения той же тепловой мощности потребуются более высокие коэффициенты теплоотдачи. Эта методика и расчетные формулы без изменений применимы для блочных насадок, насадок типа Каупера и Сименса.

Анализируя зависимости (15), (16) следует отметить, что процесс переноса теплоты за цикл работы аппаратов проходит по двум последовательно соединенным термическим сопротивлениям периода нагрева и периода охлаждения насадки, которые в общем случае не равны. Тогда определяющим или лимитирующим звеном в этой цепи в соответствии с правилом Кирхгофа будет звено с максимальным термическим сопротивлением, при этом нужно отметить, что коэффициент теплообмена не может быть больше интенсивности теплоотдачи в этом звене. При выборе способов интенсификации теплообмена необходимо обращать внимание в первую очередь на интенсификацию теплоотдачи в звене с максимальным термическим сопротивлением.

Библиографический список

1. Шкляр, Ф.Р. Доменные воздухонагреватели (конструкции, теория, режимы работы) / Ф.Р. Шкляр, В.М. Малкин, С.П. Каштанова, Я.П. Калугин, В.Л. Советкин. – М.: Металлургия, 1982. – 176 с.

2. Торопов, Е.В. Применение аппроксимаций для анализа эффективности регенеративного теплообмена / Е.В. Торопов, Д.К. Волкинд // Теория и практика тепловых процессов в металлургии: Сб. докладов Международной научно-практической конференции 18–21 сент. 2012 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 370–374.

3. Телегин, А.С. Тепломассоперенос: Учебник для вузов / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. – 2-е изд. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.

4. Сивухин, Д.В. Общий курс физики: Учеб.пособие: Для вузов. В 5 т. Т. 11 Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин. – 5-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 544 с.

К содержанию

УДК 536.24:51

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕЧЕНИЯ СРЕДЫ В СЛОЖНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

В.Ю. Шашкин

По математической модели течения среды в сложных многоканальных системах разработан алгоритм, на основе которого создана прикладная программа. Приводится порядок расчета, структура программы.

Ключевые слова: математическое моделирование, алгоритм, программа.

Для расчета течения среды по сложным многоканальным системам разработана модель расчета стационарного состояния многоканальной системы последовательно-параллельных каналов произвольной заданной структуры с автоматизированным отображением структуры системы [1].

Модель расчета течений в системе последовательно-параллельных каналов строится на следующих основных положениях:

– ставится задача определения параметров (давление, массовый расход, энтальпия) стационарного режима сложной многоканальной системы произвольной заданной структуры, состоящей из набора типовых элементов;

– главными элементами системы считаются каналы, которые объединяются в систему с помощью определенного набора соединительных элементов (местные сопротивления, узлы);

– при задании конкретной структуры системы используется естественный способ описания, удобный для пользователя программного комплекса;

– отображение структуры системы производится с помощью формализованного алгоритма путем формирования матриц краевых и внутренних граничных условий;

– формирование указанных выше матриц производится на основе обобщенных линеаризованных моделей соединительных элементов.

Модели процессов в каналах строятся на основе уравнений неразрывности, сохранения количества движения и энергии, записанных в гидравлической форме.

Данный метод отображения структуры системы и исследования течений теплоносителей в системе последовательно-параллельных каналов принципиально предполагает возможность модернизации. Применение новой модели соединительного элемента приведет к коррекции элементов матриц краевых и внутренних граничных условий, тогда как общий алгоритм останется прежним. Тем самым, повышается область исследуемых систем.

Разработан алгоритм, на основе которого создана прикладная программа, позволяющая определять параметры (величину массового расхода, энтальпию теплоносителя в каналах, направление его течения, давление в каналах) стационарного состояния системы каналов произвольной заданной структуры и оперативно исследовать, как всю систему в целом, так и отдельные ее подсистемы на этапе проектирования и в процессе эксплуатации.

1. Порядок расчета

Производится описание структуры исследуемой системы. Каналы и узлы нумеруются последовательно от входа в систему к выходу. Задается предполагаемое направление течения в каждом канале. Для каждого канала задается диаметр, длина в метрах и коэффициент сопротивления трения на единицу длинны канала. Описывается характер каждого узла (местное сопротивление, вход в канал, выход из канала, простой узел соединения каналов), номера каналов, для которых данный узел является началом и номера каналов, для которых этот узел является концом. В зависимости от характера узла задается диаметр проходного сечения местного сопротивления в метрах, давление в Па и энтальпия в Дж/кг среды на входе каждого из подводящих каналов, давление на выходе каждого из отводящих каналов в Па. Величина давления и энтальпии на входе зависит от исследуемого процесса. Так как, расчет ведется итерационно, задается начальное приближение массового расхода в каналах, кг/с.

Программа формирует матрицы краевых условий. На основании описания каждого узла, заполняются необходимые элементы этих матриц. Это осуществляется путем последовательного, по ходу нумерации узлов, вычисления заполняемых строк матриц и в зависимости от уравнений описывающих конкретный узел и нумерации каналов входящих в этот узел вычисления заполняемых столбцов.

Методом прогонки численно решается однородная краевая задача. Численное решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями (задачи Коши) осуществляется методом Рунге-Кутта.

Полученные на текущей итерации значения массовых расходов в каналах системы сравниваются с массовыми расходами с предыдущей итерации. Если расхождение больше заданной точности, то с найденными значениями вновь формируются матрицы краевых условий и повторяется расчет. Итерационный процесс продолжается до сходимости.

В результате определяются давление в Па и энтальпия в Дж/кг на входе и выходе каждого канала, массовый расход в каждом канале системы в кг/с.

2. Подпрограммы

Программа состоит из следующих подпрограмм:

MAIN – ввод исходных данных, задание начальных приближений расчета, проверка окончания итерационного процесса, вывод результатов расчета в файл, обращается к подпрограммам PROG, MATRPRCH.

MATRPRCH – построение матриц краевых условий

PROG – реализация метода прогонки (сведения к задаче Коши), решение задачи Коши, обращается к подпрограммам RKGS, SIMQ.

RKGS – решение системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными значениями, обращается к подпрограммам FST, OUTP.

SIMQ – решение неоднородной системы линейных алгебраических уравнений.

FST1 – вычисление правых частей (производных вектора Y в точке X) системы дифференциальных уравнений для данных значений X и Y при реализации метода прогонки, обращается к подпрограмме INTRP.

FST2 – вычисление правых частей (производных вектора Y в точке X) системы дифференциальных уравнений для данных значений X и Y при решении задачи Коши, обращается к подпрограмме INTRP.

OUTP – запись промежуточных значений получаемых в ходе работы программы и необходимых для последующих итераций.

INTRP – интерполирование значений давления, энтальпии, массового расхода и их производных по длине канала.

Графическое изображение структуры программы приведено на рисунке 1.

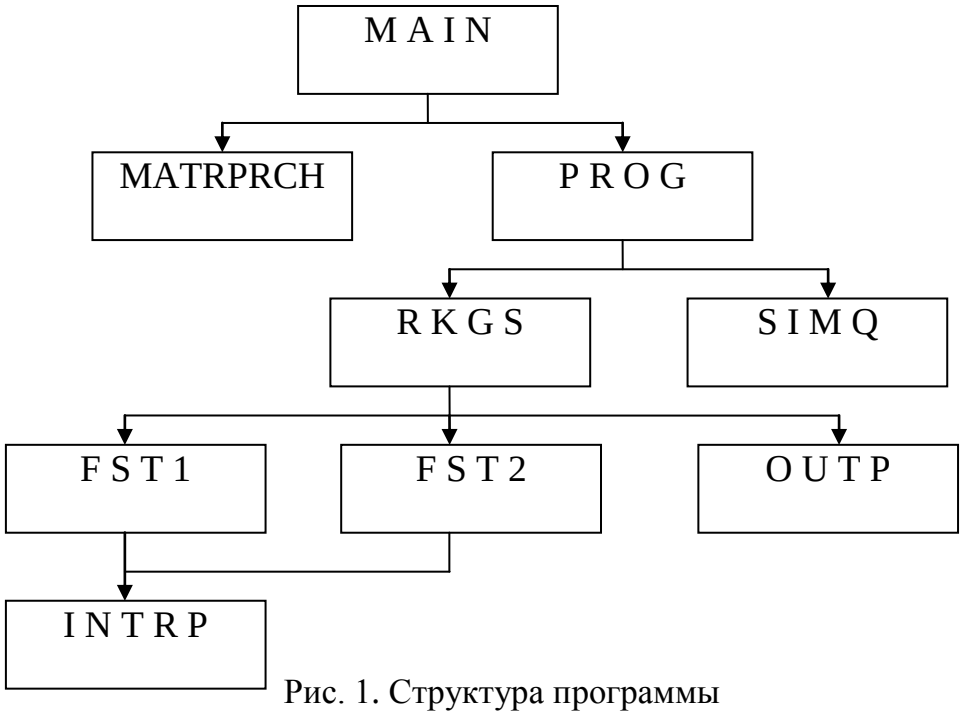


Рис. 1. Структура программы

Программа работает в диалоговом режиме. Ввод исходных данных осуществляется либо с клавиатуры, либо из специально создаваемого файла исходных данных и определяется структурой рассчитываемой системы каналов. Вывод результатов расчета производится в файл. Язык программирования Fortran.

Выводы

1. Разработан алгоритм описания сложной многоканальной системы – порядок нумерации каналов и узлов многоканальной системы. При этом количество каналов водящих в систему может превышать 1000, а схема их соединения быть любой сложности.
2. Программа применена для расчета течения теплоносителя по насадке с горизонтальными каналами регенеративного теплообменного аппарата.

Библиографический список

1. Шашкин, В.Ю. Математическое моделирование течения среды в сложных многоканальных системах / В.Ю. Шашкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 12. – № 34(167). – С. 41–44.

К содержанию

УДК 621.3.011

УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГООБМЕНОМ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

А.К. Вязовский, И.Е.Киеси

Предлагается анализ процессов энергообмена в электрических цепях синусоидального тока при изменении параметров и частоты. Результаты анализа приводят к реализации ряда параметрических устройств: параметрических усилителей мощности, параметрических источников тока и напряжения, а также параметрического избирательного фильтра. Теоретические выводы подтверждаются результатами экспериментов.

Ключевые слова: энергообмен, изменение параметров, параметрические устройства.

Идеализированные элементы электрической цепи индуктивность L и емкость C являются накопителями, соответственно, магнитной и электрической энергии электромагнитного поля. При определенном соотношении параметров возникает обмен между ними и другими элементами цепи.

Управление процессом энергообмена можно осуществить за счет изменения параметров цепи или частоты источника. Управление энергообменом позволяет реализовать свойства цепи, представляющие практический интерес.

Проанализируем работу принципиальной схемы цепи синусоидального тока (рис. 1), в которой возникает энергообмен.

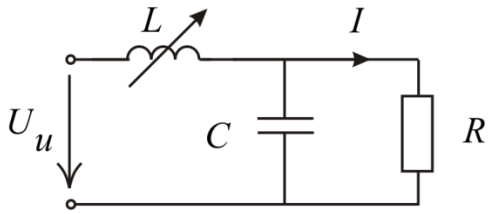


Рис. 1

Уравнение круговой диаграммы тока $\dot{I}(X_L)$ при изменении сопротивления $X_L = \omega L$ за счет параметра индуктивности L, определяется формулой [1]:

$$\dot{I}(X_L) = \frac{\dot{I}_k}{1 + \frac{X_L}{Z_\Gamma} e^{j(90^\circ - \psi_\Gamma)}}; \qquad (1)$$

где:

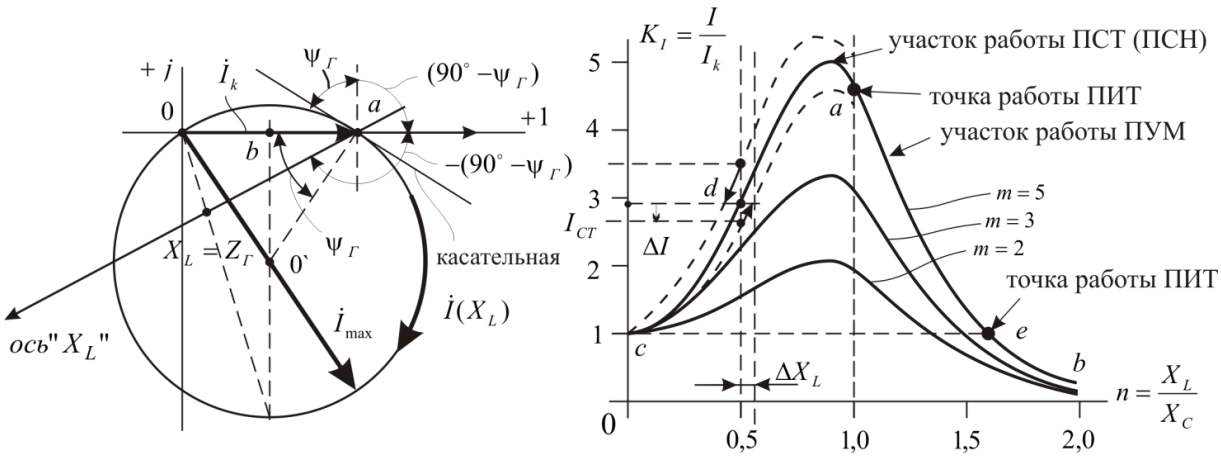
$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_u}{R}$ – ток при индуктивности $L = 0$;

$\underline{Z}_\Gamma = \frac{R(-j X_C)}{R - j X_C} = Z_\Gamma e^{j\psi_\Gamma}$ – сопротивление эквивалентного генератора по отношению к ветви «L»;

$Z_\Gamma = \frac{R X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$; $\psi_\Gamma = -90^\circ + \text{arctg}\frac{X_C}{R} = -\text{arctg}\frac{R}{X_C}$.

Круговая диаграмма тока $\dot{I}(X_L)$ представлена на рис. 2а. Из треугольника «abo`» видно, что максимальная величина тока (диаметр окружности) определяется формулой: $I_{\max} = \frac{I_k}{\cos\psi_\Gamma}$. На рис. 2б. приведены графики зависимостей коэффициента усиления тока $K_I = \frac{I}{I_k}$ в зависимости от $n = \frac{X_L}{X_C}$, при различных значениях $m = \frac{R}{X_C}$.

Максимальный коэффициент усиления тока $K_{I\max} = \frac{1}{\cos\psi_\Gamma}$, а мощности $K_{P\max} = \frac{P_{\max}}{P_k} = \frac{1}{\cos^2\psi_\Gamma} = 1 + \text{tg}^2 m$.



а) б)

Рис. 2

Увеличение тока и мощности нагрузки R в рассматриваемой цепи при изменении индуктивности L можно объяснить физически за счет процесса энергообмена между элементами. Анализ временных зависимостей мгновенной мощности $p(t)$ источника, элементов L, C и нагрузки R показывают: на первом этапе источник отдает энергию преимущественно в электромагнитное поле L и C, а на втором этапе электромагнитное поле передает энергию преимущественно в нагрузку. Чем больше энергоемкость элементов L, C, определяемая, в основном, емкостью конденсатора, тем большее усиление активной мощности можно обеспечить.

Таким образом, управляя энергообменом в цепи, можно существенно увеличить отбор мощности от источника, не изменяя его напряжения, при неизменном значении сопротивления нагрузки.

В качестве управляемой индуктивности в схеме рис. 1. можно использовать дроссель с подмагничиванием или управляемый гиратор [2]. Увеличение тока подмагничивания, как известно, приводит к уменьшению индуктивного сопротивления дросселя. Таким образом, на участке кривой "ab" рис.2б реализуется параметрический усилитель мощности (ПУМ). Изменяя, с помощью небольшого тока управления, индуктивное сопротивление дросселя в малом диапазоне $X_L = X_C \div 2X_C$, можно управлять мощностью нагрузки, практически от нуля ($4\%\ P_{\max}$), до максимальной величины $P_{\max} = I_{\max}^2 R$, существенно превышающей P_k.

После подстановки в уравнение (1) $X_L = X_C = X$ получаем $\dot{I}(X) = \dfrac{\dot{U}_u}{jX}$, не зависящей от сопротивления R. В точке "a" характеристики рис. 2б схема рис. 1 работает как параметрический источник синусоидального тока (ПИТ). Из рис. 2б видно, что неизменность тока достигает-

ся, практически, при максимальном значении коэффициента усиления тока, в режиме, близком к резонансу.

Участок характеристики "ac" (рис.2б) используется для реализации параметрического стабилизатора тока (ПСТ), который обеспечивает его неизменность при колебаниях входного напряжения U_u. Для этого необходимо завести обратную связь от напряжения U_u на обмотку подмагничивания управляемого дросселя. При номинальном напряжении источника $U_u = U_н$ устанавливают величину X_L, обеспечивающую работу схемы в т. "d" при токе $I_{ст}$. Снижение напряжения источника на ΔU привело бы к уменьшению тока на ΔI, однако, при этом уменьшается ток подмагничивания дросселя за счет обратной связи, что приводит к увеличению X_L на ΔX_L, и ток $I_{ст}$ поддерживается неизменным. Увеличение входного напряжения отрабатывается аналогичным образом в обратном порядке. Реализация ПСТ требует соответствующей инженерной проработки и подбора элементов устройства.

После добавления в схему рис.1 дополнительной индуктивности L_1 (рис.3) получаем цепь, которая работает подобно предыдущей, но в отношении выходного напряжения U. Условия работы схемы рис.3:

$$R > X_{L1};\ \ K = \frac{X_{L1}}{X_C} > 1;\ \ m = \frac{R}{X_C} > 1.$$

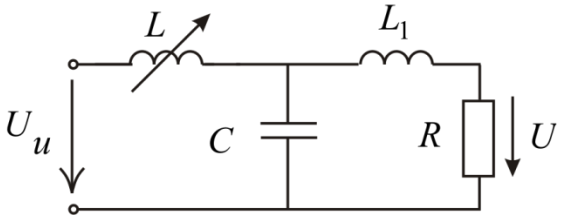


Рис. 3

Используя уравнение круговой диаграммы напряжения $\dot{U}(X_L)$, можно получить характеристики коэффициента усиления напряжения $K_U = \frac{U}{U_k}$, в зависимости от $n = \frac{X_L}{X_C}$, подобные рис.2б.

При этом: $U_k = \frac{U_u R}{\sqrt{R^2 + X_{L1}^2}}$; $\operatorname{tg}\psi_Г = -\left[m + \frac{K(K-1)}{m}\right]$. По аналогии с предыдущими рассуждениями, схема рис.3 на участке "ab" работает как параметрический усилитель мощности (ПУМ). При условии $X_L = \frac{X_{L1} X_C}{X_{L1} - X_C}$, напряжение нагрузки $\dot{U} = -\dot{U}_u$, и не зависит от сопротивления R, то есть цепь является параметрическим источником напряжения (ПИН).

На участке "ac" можно реализовать по схеме рис.3 параметрический стабилизатор напряжения (ПСН), подобно ПСТ.

Работа схемы рис.3 также объясняется управляемым (за счет изменения индуктивности L) процессом энергообмена между источником, реактивными элементами и нагрузкой. Анализ функций мгновенной мощности схемы рис. 3 подтверждает, что энергия источника не передается непосредственно нагрузке, а предварительно накапливается в электромагнитном поле. Эффекты стабилизации напряжения и увеличения активной мощности, отбираемой от источника, являются следствием физического процесса энергообмена в цепи.

Рассмотрим частотные свойства схемы рис. 1. Зависимость величины тока в сопротивлении от частоты определяется выражением:

$$I(\omega) = \frac{U_u}{R\sqrt{(1-\omega^2 LC)^2 + (\frac{\omega L}{R})^2}}. \qquad (2)$$

На частоте $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ и на резонансной частоте $\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{R^2C^2}}$ ток $I = \frac{U_u}{\rho}$, где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$, и не зависит от сопротивления R, то есть схема работает как ПИТ.

Семейство зависимостей $I(\omega)$ при различных значения $m = \frac{R}{\rho}$ имеет такой же вид, как и кривые на рис.2б. Таким образом, схема рис.1 является параметрическим избирательным фильтром (ПИФ). Величина $m = \frac{R}{\rho}$ выполняет роль добротности контура ($Q = \frac{\rho}{r}$) при сравнении с последовательным резонансным контуром r, L, C [3].

Продолжая аналогию, можно рассмотреть понятия полосы пропускания и граничных частот полосы пропускания схемы рис.1. Анализ показывает, что формула, определяющая квадраты относительных граничных частот δ_1 и δ_2 полосы пропускания, имеет вид:

$$\delta_{2,1}^2 = 1 - \frac{0{,}5}{m} \pm \frac{1}{m}\sqrt{\frac{0{,}25}{m^2} + 1} \qquad (3)$$

При сравнении с аналогичной формулой для r, L, C – контура [3], можно сделать вывод, что полоса пропускания предлагаемой схемы, при тех же значениях добротности практически одинакова. Однако, выходное напряжение схемы рис.1 в "m" раз больше, чем на входе, а для r, L, C – контура оно не может превышать входное. При реализации рассматривае-

мого ПИФ целесообразно включить на выходе операционный усилитель, обладающий большим входным сопротивлением, а в качестве индуктивности использовать гиратор [2].

Все описанные выше свойства схем рис.1 и рис.3 подтверждены экспериментально на высокой частоте ($f = 8\ кГц$) источника, обеспечивающей достаточную добротность индуктивных элементов ($\omega L >> r$). Параметры схем: $L = 0 \div 1{,}5\ мГн$; $C = 0{,}9\ мкФ$; $L_1 = 0{,}9\ мГн$; $R = 100 \div 1000\ Ом$. Изменение индуктивности L производилось дискретно с помощью магазина индуктивностей.

В заключение следует заметить, что схема рис.1 при реализации ПИТ не допускает режима холостого хода ($R \to \infty$), а схема рис. 3 при реализации ПИН – режима короткого замыкания ($R = 0$), так как в этих случаях входные сопротивления цепей стремятся к нулю.

Библиографический список

1. Вязовский, А.К. Анализ энергетических процессов в электрических цепях при помощи уравнений круговых и эллиптических диаграмм / А.К. Вязовский, В.И. Сафонов // Вестник ЮУрГУ. серия «Энергетика». – 2011. – № 34(251). – С. 75–80.

2. Петин, Д. Применение гиратора в резонансных усилителях и генераторах / Д. Петин // Радио. – 1996. – № 11. – С. 1–3.

3. Теоретические основы электротехники. Том I / под ред. Ш.Н. Хусаинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 186–188.

К содержанию

УДК 621.316.1

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЛАВНЫХ ВЕТВЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ЛОКАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОНТУРНЫХ ТОКОВ

Ш.Н. Хусаинов, И.Е. Киеси

Рассмотрено влияние отклонения параметров главных ветвей от номинальных на погрешности определение параметров остальных ветвей. Определены параметры ветвей подверженных износу в предположении, что параметры главных ветвей имеют небольшое отклонение от номинальных.

Ключевые слова: электрическая схема, точность.

В предыдущих статьях [1, 2] была рассмотрена локальная диагностика электрической цепи с помощью метода главных величин, а именно метода напряжений главных сечений и метода главных контурных токов. Проводился анализ электрической цепи и определены параметры ветвей подверженных износу. На основании чего, определялась степень повреждения.

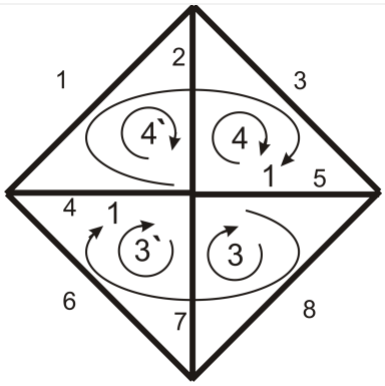


Рис. 1

В данной статье метод главных контурных токов использован для исследования влияния отклонения параметров главных ветвей (не подверженных износу) от заданных параметров на погрешность определения параметров остальных ветвей.

Ранее предполагалось, что параметры второй и седьмой ветви (рис. 1) неизменны. Рассчитаем влияние отклонения параметров этих ветвей на определение параметров оставшейся части схемы.

В качестве примера выберем контуры, удовлетворяющие требованиям метода главных контурных токов [3]. Первый вариант выбора контуров представлен на рис.1. Используя правила метода контурных токов, для цепи на рис. 1 получаем уравнение:

$$\begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3` \\ 4` \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc} 1 & 2 & 3 & 4 \end{array} \\ \begin{bmatrix} r_{4568} & -r_{45} & r_{58} & -r_5 \\ -r_{45} & r_{1345} & -r_5 & r_{35} \\ r_{64} & -r_4 & 0 & 0 \\ -r_4 & r_{41} & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \cdot \begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \\ I_{k3} \\ I_{k4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{k1} \\ E_{k2} \\ Ek_3 - U_7 \\ Ek_4 - U_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

После переноса в котором, напряжения общих ветвей U_7 и U_2 перенесены в правую часть. Уравнение (1) имеет в общем случае следующую структуру:

$$\begin{matrix} & 1 & 2 \\ 1` & \mathbf{R}_{11}^{k} & \mathbf{R}_{12}^{k} \\ 2` & \mathbf{R}_{21}^{k} & \mathbf{0} \end{matrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{k1} \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_{k1} \\ \mathbf{E}_{k2} - \mathbf{U}_2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Для схемы, представленной на рис. 1, подматрицы сопротивлений можно записать как:

$$\mathbf{R}_{12}^{k} = \begin{bmatrix} r_{58} & -r_5 \\ -r_5 & r_{35} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{R}_{21}^{k} = \begin{bmatrix} r_{64} & -r_4 \\ -r_4 & r_{41} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

а подматрицы Э.Д.С:

$$\mathbf{E}_{k1} = \begin{bmatrix} E_4 + E_5 + E_6 + E_8 \\ E_1 + E_3 - E_5 - E_4 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_{k2} = \begin{bmatrix} E_4 + E_6 - E_7 \\ E_1 - E_2 - E_4 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Из уравнения (2) получаем:

$$\mathbf{I}_{k1} = (\mathbf{R}_{11} - \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{G}_k \cdot \mathbf{R}_{21})^{-1} \cdot (\mathbf{E}_{k1} - \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{G}_k \cdot \mathbf{E}_{k2}), \quad (7)$$

$$\mathbf{I}_{k2} = \mathbf{G}_k \cdot (\mathbf{E}_{k2} - \mathbf{R}_{21} \cdot \mathbf{I}_{11}), \quad (8)$$

где $\mathbf{G}_k = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_7} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_2} \end{bmatrix}$. (9)

С использованием уравнений (2)-(9) были смоделированы два эксперимента при различных значениях ЭДС в ветвях и при следующих заданных параметрах: $r_1 = 2$ Ом; $r_2 = 3$ Ом; $r_3 = 2$ Ом; $r_4 = 3$ Ом; $r_5 = 2$ Ом; $r_6 = 3$ Ом; $r_7 = 2$ Ом; $r_8 = 3$ Ом. С учетом изменения сопротивления второй и седьмой ветвей в пределах погрешности p, сопротивления этих ветвей $r_{2E} = (1+p)r_2$; $r_{7E} = (1+p)r_7$.

С четом этой погрешности матрица $\mathbf{G}_k$ примет вид $\mathbf{G}_{kE} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r_{7E}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{r_{2E}} \end{bmatrix}$

1 эксперимент

При значении $\mathbf{E} = [0 \;\; 0 \;\; 150 \;\; 0 \;\; 100 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0]^T$ были получены следующие значения матриц $\mathbf{I}_{k1} = \begin{pmatrix} 13.53 \\ 31.431 \end{pmatrix}$ и $\mathbf{I}_{k2} = \begin{pmatrix} -6.428 \\ 38.093 \end{pmatrix}$.

2 эксперимент

При значении $\mathbf{E} = [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 100 \;\; 0 \;\; 0]^T$ были получены следующие значения матриц $\mathbf{I}_{k1} = \begin{pmatrix} 19.83 \\ -5.823 \end{pmatrix}$ и $\mathbf{I}_{k2} = \begin{pmatrix} -17.866 \\ 28.955 \end{pmatrix}$.

В пакете Matcad была разработана программа по расчету данной схемы, при изменении различных параметров цепи. В результате получили следующее:

$$R_{21E} = (E_{k2} - G_2^{-1} \cdot I_2) \cdot I_{k1}^{-1} = \begin{pmatrix} 5.97 & -2.979 \\ -2.941 & 4.902 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

При изменении сопротивлений второй и седьмой ветвей (на погрешность $p = 0{,}02$), получили сопротивления для первой, четвертой и шестой ветвей:

$$r_{4p} = -R_{21E_{1,2}} = 2{,}979 \quad (11)$$

$$r_{1p} = R_{21\,E_{2,2}} - r_{4p} = 1{,}923 \quad (12)$$

$$r_{6p} = R_{21E_{1,1}} - r_{4p} = 2{,}991 \quad (13)$$

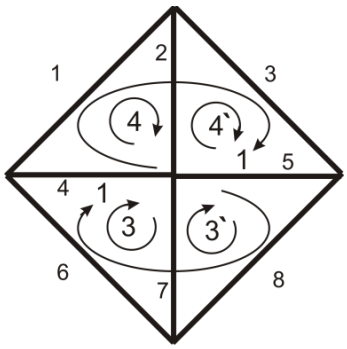


Рис. 2

Рассмотрим второй вариант выбора контуров для исходной схемы. Для схемы, представленной на рис.2, подматрицы сопротивлений можно записать как:

$$\mathbf{R}_{12}^k = \begin{bmatrix} r_{64} & -r_4 \\ -r_4 & r_{41} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{21}^k = \begin{bmatrix} r_{58} & -r_5 \\ -r_5 & r_{35} \end{bmatrix}.$$

А подматрицы Э.Д.С как:

$$\mathbf{E}_{k1} = \begin{bmatrix} E_4 + E_5 + E_6 + E_8 \\ E_1 + E_3 - E_5 - E_4 \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{E}_{k2} = \begin{bmatrix} E_5 + E_7 + E_8 \\ E_2 + E_3 - E_5 \end{bmatrix}.$$

Решение уравнения(2)примет вид:

$$\mathbf{I}_{k1} = (\mathbf{R}_{11} - \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{G}_{kE} \cdot \mathbf{R}_{21})^{-1} \cdot (\mathbf{E}_{k1} - \mathbf{R}_{12} \cdot \mathbf{G}_{kE} \cdot \mathbf{E}_{k2}),$$

$$\mathbf{I}_{k2} = \mathbf{G}_{kE} \cdot (\mathbf{E}_{k2} - \mathbf{R}_{21} \cdot \mathbf{I}_{11}).$$

Так же было проведено два эксперимента при различных значениях ЭДС в ветвях при тех же заданных параметрах:
$r_1 = 2\,\text{Ом};\ r_2 = 3\,\text{Ом};\ r_3 = 2\,\text{Ом};\ r_4 = 3\,\text{Ом};\ r_5 = 2\,\text{Ом};\ r_6 = 3\,\text{Ом};\ r_7 = 2\,\text{Ом};$
$r_8 = 3\,\text{Ом}$. Погрешность второй и седьмой ветвей изменяется в пределах $p = 0{,}02$; т.е. $r_{2E} = (1+p)r_2;\quad r_{7E} = (1+p)r_7$.

1 эксперимент

При значении $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 150 & 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ были получены следующие значения матриц $\mathbf{I}_{k1} = \begin{pmatrix} 19.958 \\ -6.662 \end{pmatrix}$ и $\mathbf{I}_{k2} = \begin{pmatrix} -6.428 \\ 38.093 \end{pmatrix}$.

2 эксперимент

При значении $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$ были получены следующие значения матриц $\mathbf{I}_{k1} = \begin{pmatrix} 1.964 \\ 23.133 \end{pmatrix}$ и $\mathbf{I}_{k2} = \begin{pmatrix} 17.866 \\ -28.955 \end{pmatrix}$.

В пакете Matcad был произведен расчет данной схемы:

$$R_{21E} = (E_{k2} - G_2^{-1} \cdot I_2) \cdot I_{k1}^{-1} = \begin{pmatrix} 4.998 & -1.969 \\ -1.913 & 3.918 \end{pmatrix}$$

При изменении сопротивлений второй и седьмой ветвей (на погрешность $p = 0{,}02$), получили для третьей, пятой и восьмой ветвей получили:

$$r_{5p} = -R_{21E1,2} = 1{,}969$$

$$r_{3p} = R_{21E_{2,2}} - r_{5p} = 1{,}949$$

$$r_{8p} = R_{21E1,1} - r_{4p} = 3{,}029$$

С учетом всех расчетов, погрешности в процентном соотношении для всех ветвей станут следующие:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{r_1 - r_{1p}}{r_1} \\ \dfrac{r_3 - r_{3p}}{r3} \\ \dfrac{r_4 - r_{4p}}{r_4} \\ \dfrac{r_5 - r_{5p}}{r_5} \\ \dfrac{r_6 - r_{6p}}{r_6} \\ \dfrac{r_8 - r_{8p}}{r_8} \end{bmatrix} \cdot 100 = \begin{bmatrix} 3.85 \\ 2.569 \\ 0.701 \\ 1.555 \\ 0.294 \\ -0.954 \end{bmatrix}$$

Данные погрешности находятся в пределах нормы.

Рассмотренная методика была использована в пакете Matcad для исследования влияния отклонений параметров ветви не подверженных износу, от заданных параметров, на погрешность определения параметров остальных ветвей. Расчет приведены в таблице:

$r_1 = 2$ Ом; $r_2 = 3$ Ом; $r_3 = 2$ Ом; $r_6 = 3$ Ом; $r_7 = 2$ Ом; $r_8 = 3$ Ом; $p = 0{,}02$.

Таблица

Изменяемые параметры	Погрешности сопротивления ветвей					
	1	3	4	5	6	8
$r_4 = 3$ Ом; $r_5 = 2$ Ом.	4,298	1,961	2,454	1,961	2,076	1,961
$r_4 = 30$ Ом; $r_5 = 20$ Ом.	7,076	1,961	5,449	1,961	3,109	1,961
$r_1 = 10$ Ом; $r_2 = 15$ Ом.	7,487	1,961	2,214	1,961	2,095	1,961
$r_1 = 20$ Ом; $r_2 = 30$ Ом.	11,636	1,961	2,178	1,961	2,108	1,961
$r_1 = 30$ Ом; $r_2 = 45$ Ом.	15,8	1,961	2,165	1,961	2,115	1,961
$r_8 = 30$ Ом; $r_6 = 30$ Ом.	12,603	1,961	2,392	1,961	2,033	1,961
$r_8 = 20$ Ом; $r_6 = 20$ Ом.	9,534	1,961	2,54	1,961	2,06	1,961
$r_8 = 10$ Ом; $r_6 = 10$ Ом.	6,485	1,961	2,788	1,961	2,111	1,961
$r_7 = 20$ Ом; $r_8 = 30$ Ом.	2,613	1,961	0,877	1,961	1,846	1,961
$r_1 = 10$ Ом; $r_3 = 10$ Ом.	1,131	1,961	2,434	1,961	1,863	1,961
$r_1 = 15$ Ом; $r_3 = 15$ Ом.	0,741	1,961	2,397	1,961	1,801	1,961
$r_1 = 20$ Ом; $r_3 = 20$ Ом.	0,547	1,961	2,374	1,961	1,765	1,961
$r_1 = 25$ Ом; $r_3 = 25$ Ом.	0,432	1,961	2,359	1,961	1,742	1,961

Выводы

1. Исследовано влияние отклонений действительных параметров главных ветвей от заданных на погрешность определения параметров ветвей подверженных износу.

2. Исследования показали, что отклонение параметров ветвей, сопротивления и проводимости которых считаются заданными от действительных значений на 2 %, позволяет определить параметры остальных ветвей с точностью 3,85.

3. Точность определения параметров зависит также от выбора системы независимых сечений. При неудачном выборе погрешности увеличиваются до десятков процентов.

Библиографический список

1. Хусаинов, Ш.Н. Локальная диагностика электрических цепей / Ш.Н. Хусаинов, И.Е. Киесш // Вестник ЮУрГУ, серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 103–106.

2. Хусаинов, Ш.Н. Локальная диагностика электрических цепей. Метод главных контурных токов / Ш.Н. Хусаинов, И.Е. Киесш // Сборник материалов 63-й научной конференции «Наука ЮУрГУ», секция технических наук. Т. 2. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – С. 260–264.

3. Хусаинов, Ш.Н. Топологические формулы для матриц проводимостей сечений и контурных сопротивлений электрических цепей с многополюсными элементами / Ш.Н. Хусаинов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. – 17 с.

4. Хусаинов, Ш.Н. Теория электрических цепей с многополюсными элементами / Ш.Н. Хусаинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 307 с.

К содержанию

УДК 621.316.925 + 621.311.4:004

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ЦИФРОВОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИЙ

А.Н. Андреев, А.С. Гребеньков

Разработана физическая модель программно-аппаратного комплекса цифровой передачи данных на цифровых подстанциях, включающая алгоритмические модели основных узлов измерения, управления и защиты, выполненные в соответствии с требованиями стандарта МЭК-61850.

Ключевые слова: цифровая подстанция, IEC 61850, GOOSE, SV, MMS-сервер, шина процесса, шина присоединения.

Переход на микропроцессорную элементную базу в комплексах релейной защиты и автоматики обуславливает необходимость постепенного перехода на цифровую форму передачи сигналов измерений и управления, фактически к новому поколению комплексных электроэнергетических объектов – цифровым подстанциям.

В основе работы цифровой подстанции лежит иерархическая система связи интеллектуального первичного оборудования и сетевого вторичного оборудования, при этом реализовано совместное использование информации и взаимные операции между интеллектуальным оборудованием [1]. Если соотносить новую цифровую подстанцию с традиционной, можно выявить следующие изменения: новый интерфейс связи и коммуникационная модель на уровнях ячейки и подстанции, а на уровне процесса замещение традиционных ТТ и ТН на электронные ТТ и ТН. Теперь информация во вторичных цепях передаётся по помехоустойчивому оптоволокну, либо по витой дифференциальной паре.

Таким образом, система передачи сигналов измерений и управления на цифровой подстанции представляет собой совокупность нескольких информационных сетей с передачей данных в двоичной форме. Разработанная модель передачи данных содержит три уровня сети. Верхний уровень, представляющий локальную сеть предприятия и реализованный на интерфейсе Ethernet, предназначен для реализации функций чтения данных текущих измерений, чтения/записи уставок защит, настройки параметров устройств, дистанционного управления коммутационными аппаратами посредством протокола МЭК-9506 MMS [2] (Manufacturing Message Specification), являющегося основой стандарта передачи данных на цифровых подстанциях МЭК-61850. Реализация данных функций требует наличия MMS-серверов в каждом интеллектуальном устройстве стенда МЦП-СК. При этом, стандарт МЭК-61850 предусматривает возможность реализации

нескольких логических устройств в одном физическом устройстве, что позволяет интегрировать в модель цифровой передачи данных по МЭК-61850 практически любые цифровые устройства, поддерживающие один из существующих протоколов передачи данных. Данная особенность стандарта МЭК-61850 использована в качестве основы для разработки модели цифровой передачи данных в стенде МЦП-МЭК61850-СК. В соответствии с этой моделью, функции MMS-серверов всех устройств подстанции объединены в одном физическом устройстве – MMS-сервере, выполненном в соответствии с требованиями и стандартами МЭК-61850, а взаимодействие интеллектуальных устройств (трансформаторов тока и напряжения, выключателей, защит, приборов учета электроэнергии) осуществляется по закрытым протоколам передачи данных. Для обеспечения интеграции комплекса интеллектуальных устройств стенда МЦП-СК с промышленными устройствами релейной защиты и автоматики, поддерживающими протоколы передачи данных МЭК-61850, MMS-сервер , входящий в состав стенда выполняет функции преобразования информационных пакетов, передаваемых между интеллектуальными устройствами стенда по закрытым протоколам в стандартные пакеты управления по протоколу GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) и пакеты текущих измерений по протоколу SV (Sampled Values). Соответствующая структурная схема модели передачи данных представлена на рисунке.

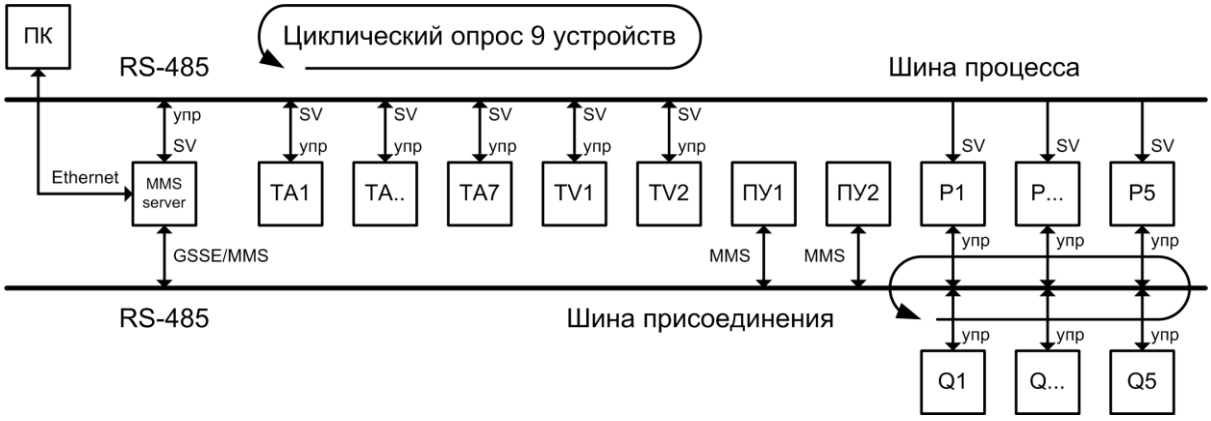


Схема передачи данных в стенде МЦП-СК

Передача данных осуществляется по трем уровням сети: 1 уровень – «Шина процесса», выполненная на базе интерфейса RS-485; 2 уровень – «Шина присоединения», выполненная на базе интерфейса RS-485; 3 уровень – «Локальная сеть предприятия», выполненная на базе интерфейса Ethernet.

«Шина процесса» предназначена для передачи данных текущих измерений от измерительных трансформаторов тока и напряжения к устройствам цифровой защиты и автоматики. Поскольку передача данных в сети RS-485 требует наличия мастер-устройства, одной из функций MMS-

сервера стенда МЦП-СК является управление процессом передачи данных (циклический опрос). При отсутствии команд управления по сети Ethernet сервер отсылает в шину процесса информационный пакет «Опрос состояния» адресованный текущему устройству из списка опрашиваемых. Список опрашиваемых устройств содержит только трансформаторы тока TA1..TA7 и напряжения TV1..TV2. Устройство, получившее пакет «Опрос состояния» формирует выходной пакет типа «Данные с трансформатора тока/напряжения». Данный пакет получают все устройства релейной защиты P1..P5, а также MMS-сервер. Устройства защиты в соответствии с заданными параметрами могут использовать полученные данные как сигналы для пусковых органов. MMS-сервер запоминает полученные данные в соответствующих атрибутах SCL-модели трансформатора тока/напряжения, связанной с данным физическим трансформатором, и затем, переходит к опросу состояния следующего устройства на шине процесса.

При получении команды на изменение уставок трансформаторов тока/напряжения по сети Ethernet (MMS-запрос типа «write request») MMS-сервер вместо опроса состояния текущего устройства на шине процесса отправляет пакет типа «Изменение уставок», адресованный одному из трансформаторов. При получении ответного пакета типа «Выполнено», сервер заносит полученные уставки в SCL-модель данного трансформатора, формирует ответ успешного выполнения команды по сети Ethernet (MMS-ответ типа «write respounse»), и переходит к опросу текущего устройства в списке. В случае отсутствия ответа (в течение заданного интервала времени), сервер формирует ответ ошибки выполнения команды по сети Ethernet без изменения данных в SCL-модели трансформатора.

«Шина присоединения» обеспечивает передачу цифровых сигналов между устройствами релейной защиты P1..P5 и моделями трехфазных выключателей Q1..Q5. Так как в рассматриваемой модели шина присоединения также реализована на базе интерфейса RS-485, управление процессом передачи данных (циклический опрос) осуществляется MMS-сервером стенда МЦП-СК. При отсутствии команд управления по сети Ethernet сервер отсылает в шину присоединения информационный пакет «Опрос состояния» адресованный текущему устройству из списка опрашиваемых. Список опрашиваемых устройств содержит только выключатели Q1..Q5 и устройства защиты P1..P5.

Если текущим устройством в цикле опроса является устройство защиты P1..P5, в ответ на пакет «Опрос состояния» ожидается формирование выходного пакета типа «Текущее состояние». Однако, в случае срабатывания, защита формирует выходной пакет типа «Управление выключателем», адресованный одному из выключателей Q1..Q5, и только после получения от выключателя ответного пакета типа «Выполнено», защита формирует вы-

ходной пакет «Текущее состояние». При этом, в данном пакете содержится информация о сработавших ступенях защиты. В случае отсутствия ответа от выключателя в течении заданного интервала времени, а также при не сработавшем состоянии, защита формирует выходной пакет «Текущее состояние», содержащий информацию о наличии сигналов пуска защиты. MMS-сервер запоминает полученные в пакете «Текущее состояние» данные в соответствующих атрибутах SCL-модели защиты, и затем, переходит к опросу состояния следующего устройства на шине присоединения. При этом, если полученные от защиты данные входят в набор данных (DataSet) блока управления GOOSE-сообщением [3] (GOOSE control block) и значения полученных данных отличаются от текущих значений соответствующих атрибутов SCL-модели защиты, MMS-сервер формирует в сеть Ethernet информационный пакет с данными текущего состоянии защиты в соответствии с протоколом GOOSE. Передача данного GOOSE-сообщения повторяется через заданное минимальное значение времени, которое удваивается при каждой следующей передаче сообщения до тех пор, пока не достигнет заданного максимального значения времени повторения сообщения. При отсутствии изменений состояния защиты, формирование GOOSE-сообщений от защит осуществляется через заданные максимальные значения времени повторения сообщения.

Если текущим устройством в цикле опроса является выключатель, в ответ на пакет типа «Опрос состояния» формируется выходной пакет типа «Данные с выключателя», содержащий текущее состояние блок-контактов выключателя и текущее состояние ключа управления выключателем (последняя команда локального или дистанционного управления). Данный пакет получают все устройства релейной защиты P1..P5, а также MMS-сервер. Устройства защиты в соответствии с заданными параметрами могут использовать полученные данные как сигналы для пуска/возврата логических функций автоматического управления. MMS-сервер запоминает полученные данные в соответствующих атрибутах SCL-модели выключателя, и затем, переходит к опросу состояния следующего устройства на шине присоединения. При этом, если полученные от выключателя данные входят в набор данных (DataSet) блока управления GOOSE-сообщением (GOOSE control block) и значения полученных данных отличаются от текущих значений соответствующих атрибутов SCL-модели выключателя, MMS-сервер формирует в сеть Ethernet информационный пакет с данными текущего состояния выключателя в соответствии с протоколом GOOSE. Периодичность передачи данного сообщения соответствует стандарту МЭК-61850 и аналогична организации передачи GOOSE-сообщений от устройств защит.

При получении команд на чтение или запись уставок защит по сети Ethernet (MMS-запросы типа «write request» и «read request») MMS-сервер

вместо опроса состояния текущего устройства на шине присоединения отправляет пакет типа «Изменение уставок», адресованный одной из защит. При получении ответного пакета типа «Выполнено», сервер заносит полученные уставки в SCL-модель данной защиты и формирует ответ успешного выполнения команды по сети Ethernet (MMS-ответ типа «write respounse» или «read respounse» соответственно), и переходит к опросу текущего устройства в списке. В случае отсутствия ответа (в течение заданного интервала времени), сервер формирует ответ ошибки выполнения команды по сети Ethernet без изменения данных в SCL-модели защиты. Приборы учета электроэнергии ПУ1, ПУ2 опрашиваются только при получении MMS-запросов на чтение текущих показаний по сети Ethernet. В этом случае основной цикл опроса приостанавливается и в шину присоединения отправляется пакет «Опрос состояния», адресованный одному из приборов учета электроэнергии. Ответный пакет типа «Данные с ПУ» используется для формирования MMS-ответа и основной цикл опроса продолжается.

Рассмотренные принципы построения модели передачи данных в стенде МЦП-СК полностью соответствуют требованиям действующего стандарта МЭК-61850. Это позволяет эффективно использовать полученную модель для таких целей как исследование взаимодействия микропроцессорных защит, совершенствования алгоритмов существующих и разработки новых алгоритмов защиты, учитывающих особенности и функциональные возможности микропроцессорной элементной базы и цифровой передачи данных, проведение исследований и разработка рекомендаций по совершенствованию/оптимизации протоколов передачи данных.

Библиографический список

1. IEC 61850-7-1.; Communication networks and systems in substations – Basic communication structure for substation and feeder equipment Principles and models, International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.

2. IEC 61850-8-1.; Communication networks and systems in substations – Specific Communication Service Mapping (SCSM) Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3, International Electrotechnical Commission (IEC), 2003.

3. Retonda J., Behardien S.; Simulation of an IEC 61850 Based GOOSE Message, and Analysis of its Structure, OMICRON Users Conference, 2010.

К содержанию

УДК 621.313.322

ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ ЭНЕГРГОБЛОКА «СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР – ОБЪЕДИНЕННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПОТОКОВ МОЩНОСТИ»

И.С. Егоров, А.И. Гаврилов, М.Е. Гольдштейн

Рассмотрены особенности режимов энергоблока синхронный генератор – объединенный регулятор потока мощности при изменении нагрузки и напряжения генератора

Ключевые слова: синхронный генератор, объединенный регулятор потоков мощности, система возбуждения.

Напряжение и реактивная мощность синхронных генераторов на электростанциях регулируется изменением их тока возбуждения. Номинальный коэффициент мощности генераторов обычно 0,8–0,9. Так как сечение обмотки статора рассчитано на полный ток, то в некоторых режимах загрузка генератора реактивной мощностью приводит к необходимости снизить его активную мощность. Эксплуатация генераторов с коэффициентом мощности близким к единице позволила бы увеличить на 10–20 % выдачу ими активной мощности. Общеизвестно, что система возбуждения сегодня является дорогостоящей и в то же время самой ненадежной системой генераторов [1]. Применение генераторов с нерегулируемым током возбуждения, существенно снижает затраты на систему возбуждения, увеличивает их надежность и облегчает эксплуатацию по сравнению с генераторами с регулируемыми системами возбуждения.

Функции регулирования напряжения и реактивной мощности можно переложить на объединенный регулятор потоков мощности (ОРПМ), который успешно реализует подобные функции на подстанциях и ЛЭП энергосистем [2–6]. При этом увеличивается и быстродействие регулирования напряжения и реактивной мощности на шинах станции, так как оно не зависит от постоянной времени контура возбуждения генератора, а определяется только быстродействием ОРПМ. Схема подключения ОРПМ к выводам статора генератора приведена на рис. 1.

Регулирование напряжения блока синхронный генератор – ОРПМ осуществляется вводом с помощью сериесного трансформатора Т1 добавочного напряжения ΔU. Это напряжение создается преобразователем напряжения ПН1, позволяющим изменять в широких пределах величину и фазу добавочного напряжения. Величина напряжения изменяется путем его широтно-импульсной модуляции, а фаза изменением момента подачи первых импульсов управления (при симметричном управлении вентилями). Напряжение на выводах блока – это векторная сумма двух напряжений: напряжения на выводах статора синхронного генератора и напряжения по-

следовательной обмотки трансформатора Т1. Преобразователь ПН2, связанный с выводами генератора трансформатором Т2, обеспечивает генерацию или потребление реактивной мощности блока (в зависимости от режима) а также создает контур для протекания активной мощности между преобразователями ПН1 и ПН2.

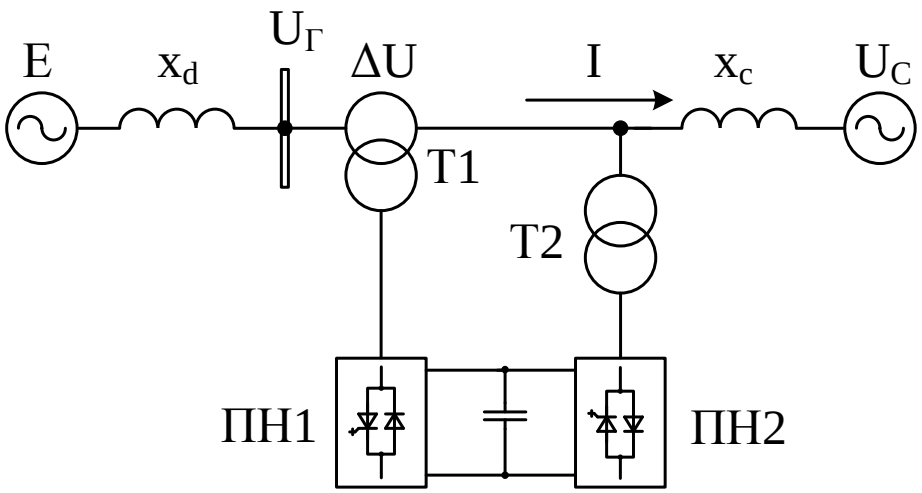


Рис. 1. Схема энергоблока синхронный генератор – ОРПМ

Преобразователь ПН1 является линейным звеном в диапазоне изменения коэффициента модуляции от нуля до единицы. По регулировочной характеристике преобразователя ПН1, связывающей величины коэффициента модуляции и выходного напряжения ПН1, определяются требования к диапазону изменения коэффициента модуляции при нормируемом диапазоне изменения напряжения ΔU. Увеличение напряжения на нагрузке осуществляется путем увеличения амплитуды входного сигнала блока ШИМ системы управления преобразователем ПН1. Если необходимо снижение напряжения блока до значений меньших чем напряжение генератора, следует изменить фазу входного сигнала блока ШИМ, для того чтобы в результате вектор выходного напряжения ПН1 стал противоположно направленным вектору напряжения статора генератора. Тогда результирующий вектор напряжения блока уменьшиться.

При работе генератора с $cos\varphi=1$ вектор тока статора I_1 совпадает по направлению с вектором напряжения на выводах статора генератора $U_{Г1}$, а вектор U_{C1} отстает от этих векторов на угол δ_1 (рис. 2). Так как при регулировании ток возбуждения не изменяется, то не меняется по величине и ЭДС генератора. Но, например, при увеличении мощности генератора увеличивается и его ток, а следовательно и падение напряжения на сопротивлении X_d (рис. 2). Увеличение нагрузки, например со значения P_1 до P_2, производится повышением момента, приложенного к валу генератора. При этом угол δ увеличится до значения δ_2 и при сохранении $cos\varphi=1$ необхо-

димо увеличить напряжение на выводах комплекса, вводя дополнительное напряжение ΔU с помощью преобразователя ПН1. Характерно, что такой режим сопровождается потреблением генератором реактивной мощности из сети, т.е. он переходит в режим недовозбуждения. Из векторной диаграммы (рис.2) следует, что ОРПМ позволяет сохранить режим с $cos\varphi=1$ для генератора с нерегулируемым током возбуждения, при изменениях его активной нагрузки.

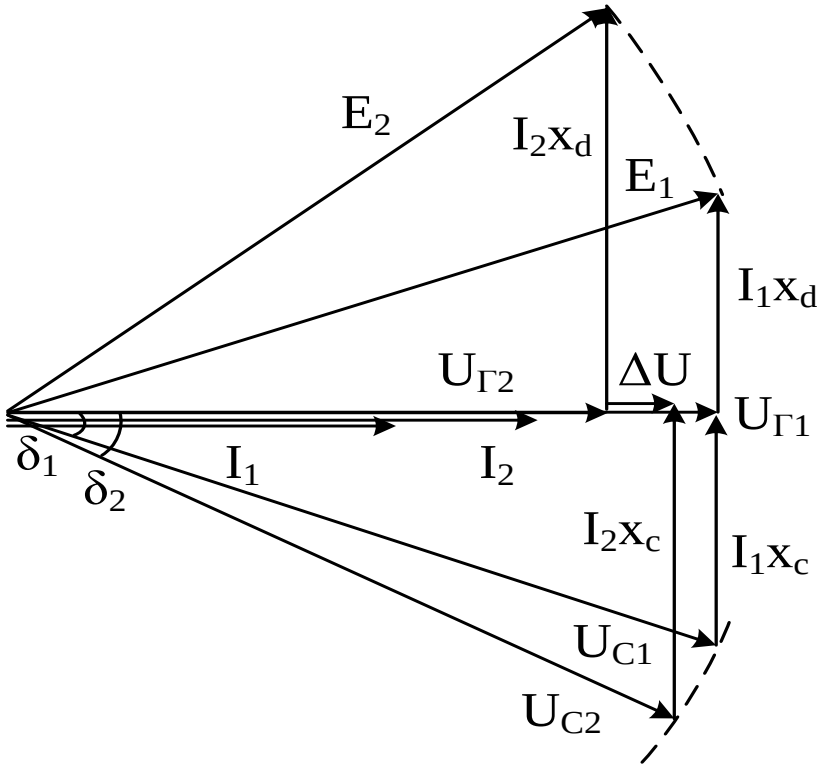


Рис. 2. Векторная диаграмма работы блока при увеличении активной нагрузки

Параметры основного оборудования ОРПМ (преобразователи и трансформаторы) определяются, прежде всего, мощностью, протекающей через ОРПМ. Диапазон изменения реактивной мощности ОРПМ определяется балансом реактивной мощности в точке подключения и зависит от режимов сети. Диапазон активной мощности ОРПМ зависит от глубины регулирования напряжения, т.е. от диапазона изменения величины ΔU, и от величины тока статора I_1. Например, для генератора ТЗВ-63-2 при изменении ΔU в пределах (0…0,1) номинального напряжения синхронного генератора ОРПМ должен пропускать 7.9 МВт. Параметры напряжений трансформаторов, преобразователей напряжения ПН1 и ПН2 зависят и от режима форсировки комплекса.

Заметим, что при аварийном отключении блока ускорять гашение поля нет необходимости, так как ЭДС генератора с неуправляемым возбуждением несущественно превышает его номинальное напряжение, и опасности

для изоляции не возникает. При повреждениях генератора или ОРПМ быстрое гашение поля генератора достигается вводом в работу устройства гашения поля. Но оно при этом выбирается только на ток возбуждения, соответствующий работе генератора с $cos\varphi=1$, т.е. в 2,5 раза меньшем чем у типовых синхронных генераторов.

Таким образом, рассмотренная схема блока позволяет переложить функции регулирования напряжения и создания и потребления реактивной мощности с генератора на статический преобразователь. Это дает возможность упростить систему возбуждения, повысить надежность схемы выдачи мощности, увеличить выдаваемую в сеть активную мощность, а также повысить быстродействие регулирования напряжения и реактивной мощности.

Библиографический список

1. Андреев, А.Н. Эксплуатационная надежность вентильных систем возбуждения синхронных генераторов / А.Н. Андреев, М.Е. Гольдштейн, Р.А. Шаипов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2009. – Вып. 11. – № 15. – С. 135–137.

2. Рыжов, Ю.Л. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения: учебник для вузов / Ю.Л. Рыжов. – М: Издательский дом МЭИ, 2007. – 488 с.

3. Гаврилов, А.И. О регулировании режимных параметров подстанций с объединенным регулятором потока мощности / А.И. Гаврилов, И.С. Егоров // Научные труды 3-ей международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Т. 1. – Екатеринбург, 2012. – С. 481–483.

4. Егоров, И.С. Средства регулирования режимов электрических сетей на базе силовой электроники / И.С. Егоров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 135–137.

5. Гольдштейн, М.Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асинхронными связями / М.Е. Гольдштейн, К.Ю. Филяев // Электричество. – 2008. – № 6. – С. 12–18.

6. Hingorani, Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

К содержанию

УДК 621.314.5

ПЕРЕДАЧА ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ КАК ЭЛЕМЕНТ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Н.В. Корбуков, Б.Г. Булатов, М.Е. Гольдштейн

Рассмотрены нормальный и послеаварийные режимы 7-узловой сети 220 кВ, содержащей передачу постоянного ока на базе преобразователей напряжения. Проанализировано влияние передачи на потери в сети при разных активных и реактивных мощностях преобразователей.

Ключевые слова: режимы электрической сети, электропередача постоянного тока, преобразователь напряжения.

Одно из ключевых требований, предъявляемых к энергосистеме, – это управляемость. Для его выполнения в энергосистеме должны быть активно-адаптивные элементы, способные с высоким быстродействием регулировать перетоки активных и реактивных мощностей. Одними из таких элементов являются передачи и вставки постоянного тока на базе преобразователей напряжения (ППТН), позволяющие независимо регулировать перетоки активных и реактивных мощностей как по величине, так и по направлению. Рассмотрим некоторые свойства ППТН при анализе как нормальных, так и послеаварийных длительных режимов энергосистемы, содержащей такие передачи.

Анализ проведем на базе 7-узловой сети 220 кВ с помощью программы расчета сети Networks, разработанной на кафедре ЭССиС ЮУрГУ (рис. 1). При интеграции модели ППТН в Networks была использована модель длительных режимов передачи с учетом базовых ограничений [1, 2, 3].

В нормальном режиме исследуемой энергосистемы (рис.1) наибольшая нагрузка узла 4 получает электроэнергию по ЛЭП 2-4, и в случае отключения этой линии мощность вынуждена протекать по пути 2-3-5-6-4, что приводит к недопустимому режиму по напряжениям в узлах. Поэтому узлы 3 и 4 должны быть связаны линией на переменном или постоянном токе. В случае с ППТН, по активной мощности она рассчитана на 100 МВт, и на двух преобразовательных подстанциях в узлах 3 и 4 принятые ограничения допускают генерацию в сеть до 50 МВАр реактивной мощности. Проанализируем послеаварийные режимы при отключениях ЛЭП № 4 (1 цепь), 5, 6, 7, 8 в случаях с включенными ППТН или ЛЭП № 9.

Результаты расчета потокораспределения и напряжений в узлах в различных нормальных и послеаварийных режимах сети приведены в таблице 1. При неизменной уставке по мощности передачи ее мощность не меняется при изменении режимов сети в широких пределах в то время, как ЛЭП № 9

загружается в зависимости от режима сети, от 51 до 146 МВт. Это говорит о большем потенциале по разгрузке линий при наличии в сети ППТН.

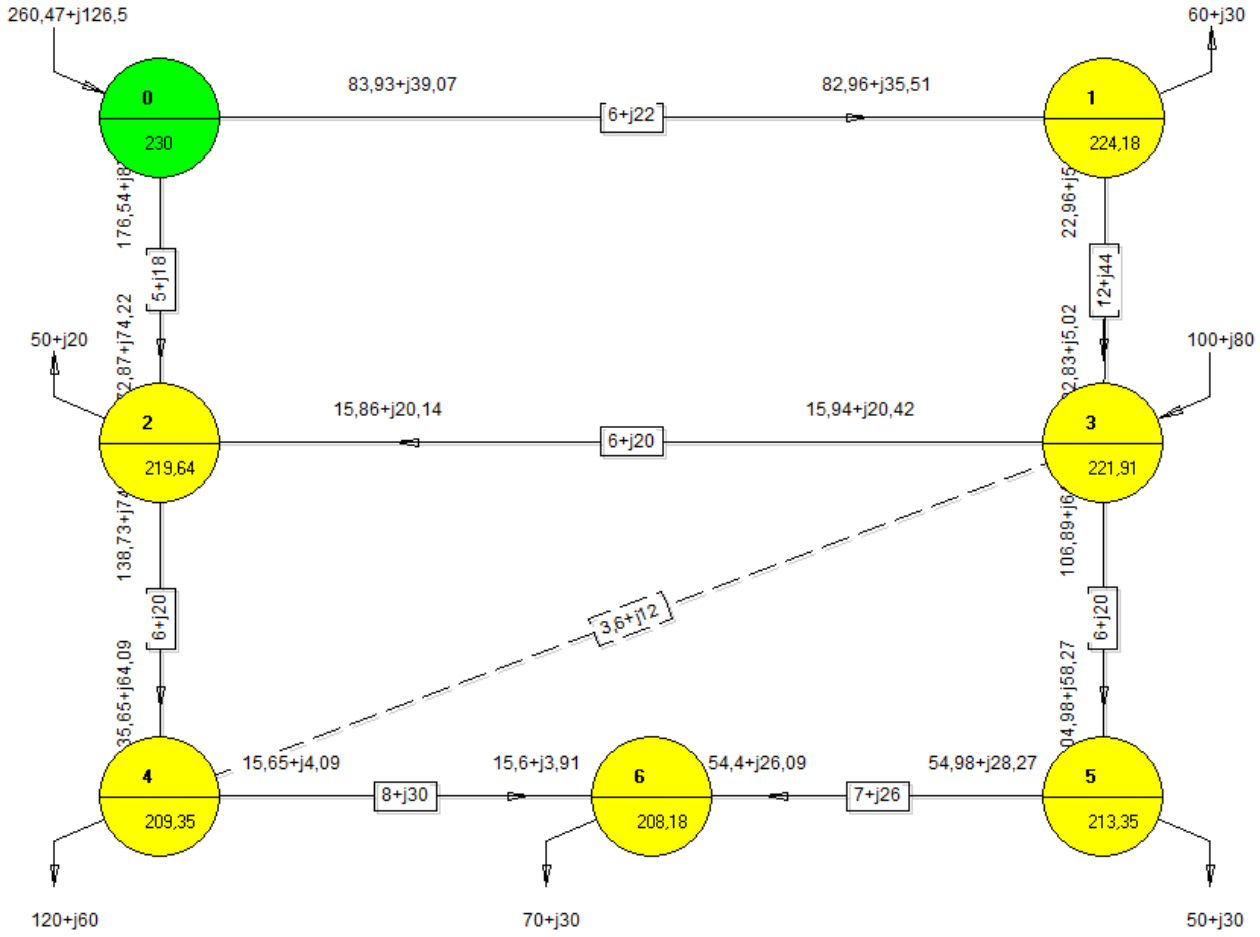


Рис. 1. Сеть в программе Networks

Кроме того, за счет генерации 50 МВар в узлах 3 и 4 ППТН обеспечивает более высокие уровни напряжений в сети. При проявлениях нарушения устойчивости энергосистемы преобразователи передачи могут форсировать выдачу реактивной мощности, снизив передаваемую активную мощность, таким образом еще больше поднимая сетевые напряжения.

Сравним величину потерь в ЛЭП №9 и ППТН, а также суммарные потери в сети в нормальном режиме. Потери в ППТН нелинейно зависят от мощности и складываются из потерь в преобразователях, трансформаторах, реакторах и потерь в вентилях – коммутационных и на интервале проводимости, эта зависимость представлена в модели в виде функции, аппроксимирующей реальную экспериментальную зависимость потерь передачи CrossSoundCable [4]:

$$\Delta P(P_d) = 0{,}0002P_d^{\,2} + 0{,}01P_d + 1{,}2.$$

Таблица 1

Нормальный и послеаварийные режимы сети

	S_4,MBA	S_5,MBA	S_6,MBA	S_7,MBA	S_8,MBA	S_{34},MBA	U_2,кВ	U_3,кВ	U_4,кВ	U_5,кВ	U_6,кВ
Нормальный режим без 3-4	139+j74	107+j65	16+j20	16+j4	55+j28	0	219,3	221,6	208,2	212,5	206,8
Вкл. ЛЭП №9	80+j36	79+j44	-30-j6	43+j21	28+j12	84	221,0	219,7	215,6	213,5	211,3
Вкл. ППТН	71+j22	74+j55	-39+j49	47+j10	24+j22	100	226,6	229,8	222,7	223,1	219,8
Откл.ЛЭП №4 (1 цепь)	120+j70	129+j80	-1+j9	-5-j6	76+j41	0	219,2	220,0	200,7	209,4	201,9
Откл.ЛЭП №4,вкл.ЛЭП №9	56+j26	82+j46	-50-j16	39+j19	31+j13	105	221,1	218,4	213,5	212,0	209,4
Откл.ЛЭП №4, вкл.ППТН	60+j20	86+j59	-48+j46	36+j7	34+j25	100	226,4	229,2	220,1	221,8	217,9
Откл.ЛЭП №5	259+j187		106+j83	126+j82	-50-j30	0	213,8	223,9	190,0	165,6	172,5
Откл.ЛЭП №5,вкл.ЛЭП №9	101+j51		-15+j1	124+j77	-51-j32	146	219,5	219,0	211,6	190,6	196,6
Откл.ЛЭП №5, вкл.ППТН	152+j101		24+j97	124+j77	-50-j30	100	223,0	231,9	209,2	184,9	191,9
Откл.ЛЭП №6	131+j64	115+j75		8-j4	63+j37	0	218,6	225,6	209,3	216,0	209,6
Откл.ЛЭП №6,вкл.ЛЭП №9	103+j41	76+j44		46+j21	25+j11	65	221,3	218,5	214,9	212,5	210,3
Откл.ЛЭП №6, вкл.ППТН	88+j4	58+j77		64-j10	7+j44	100	224,5	233,2	221,5	224,9	219,8
Откл.ЛЭП №7	122+j68	124+j72	3+j15		71+j34	0	219,8	221,2	210,4	211,5	205,2
Откл.ЛЭП №7,вкл.ЛЭП №9	70+j32	124+j72	-39-j13		71+j34	51	220,8	218,7	216,1	208,9	202,4
Откл.ЛЭП №7, вкл.ППТН	23+j11	123+j71	-78+j36		71+j33	100	226,2	226,6	224,5	216,4	209,2
Откл.ЛЭП №8	198+j117	50+j31	63+j50	71+j35		0	217,9	224,0	202,3	219,9	194,6
Откл.ЛЭП №8,вкл.ЛЭП №9	88+j40	50+j31	-24-j3	71+j34		106	220,8	219,8	214,8	215,6	207,6
Откл.ЛЭП №8, вкл.ППТН	95+j49	50+j31	-19+j68	71+j34		100	225,4	230,5	218,0	226,2	210,1

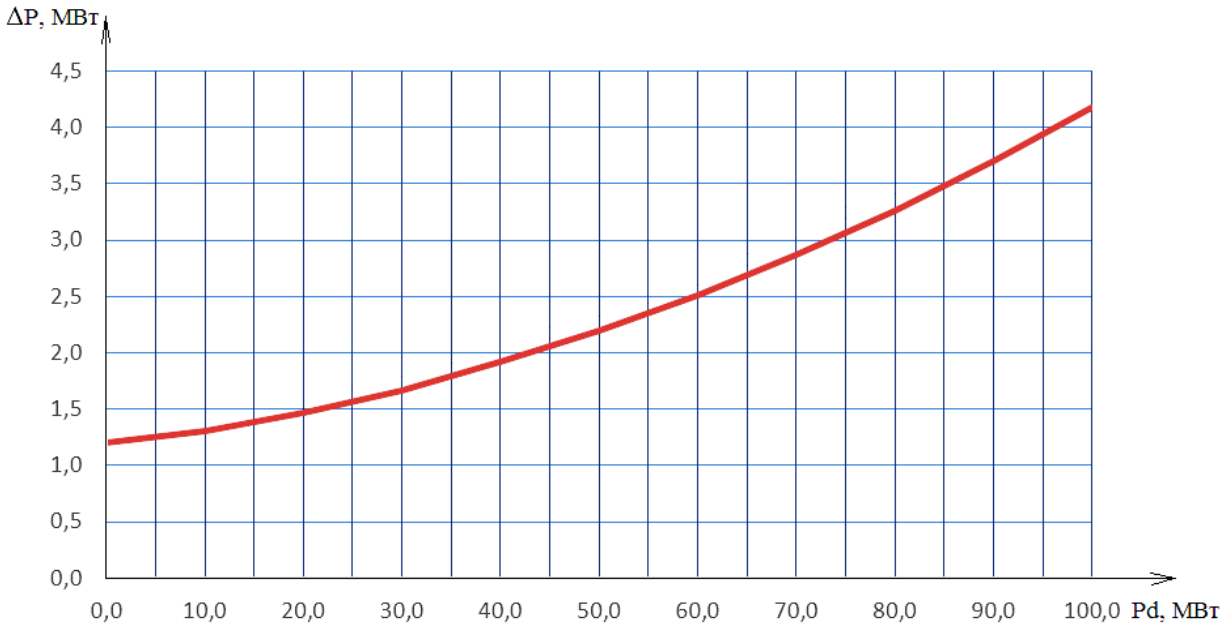


Рис. 2. Функция потерь в ППТН от активной мощности

На холостом ходу ППТН суммарные потери в преобразователях составляют 1,2 % от номинальной мощности передачи (рис. 2), а при полной нагрузке – 4,2 %. Таким образом, в нормальном режиме сети потери в ППТН составляют 4,2 МВт. Для ЛЭП № 9 потери при нагрузке 100 МВт составляют 1 МВт. Однако, благодаря возможности генерации ППТН реактивной мощности в сеть за счет более высоких уровней напряжений в нормальном режиме полные сетевые потери составляют 10,8 МВт. В случае работы сети с ЛЭП № 9 полные потери в сети – 10,2 МВт. Таким образом, несмотря на более высокие потери в ППТН чем в передаче переменного тока, полные сетевые потери оказались сопоставимы по сравнению с вариантом с ЛЭП № 9, а ППТН создает дополнительные функциональные свойства сети, превращая ее в активно-адаптивную сеть.

Выводы

На основе анализа нормальных и послеаварийных режимов 7-узловой сети 220 кВ, содержащей ППТН показано влияние передачи на полные потери в сети при разных активных и реактивных мощностях преобразователей.

Библиографический список

1. Гольдштейн, М.Е. Универсальная математическая модель системы с вентильными асинхронными связями / М.Е. Гольдштейн, К.Ю. Филяев // Электричество. – 2008. – № 6. – С.12–18.

2. Гольдштейн, М.Е. Математическая модель длительных режимов передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения / М.Е. Гольдштейн, Н.В. Корбуков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37. – С. 126–128.

3. Гольдштейн, М.Е. Допустимые длительные режимы передачи постоянного тока на базе преобразователя напряжения / Н.В. Корбуков, М.Е. Гольдштейн // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конф., г. Новочеркасск, 14–18 октября 2013 г. / Минво образования и науки РФ, Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т. 1. – С. 148–151.

4. Van Eeckhout, B. The economic value of VSC HVDC compared to HVAC for offshore wind farms, in Offshore (Conroe, TX)2008, K.U. Leuven.

К содержанию

УДК 621.315.2:537.6

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ КАБЕЛЯ 6(10) КВ НА ПРОЦЕССЫ В ИЗОЛЯЦИИ

А.В. Коржов

Рассмотреныотдельные результаты исследований по оценке влияния магнитного поля кабеля 6(10) кВ на процессы в изоляции по характеристикам частичных разрядов. Представлена схема разработанной экспериментальной установки для оценки влияния магнитного поля на параметры частичных разрядов в опытном кабеле.

Ключевые слова: кабель 6(10) кВ, магнитное поле, изоляция, частичные разряды.

В настоящее время передовым методом диагностирования состояния изоляции кабельных линий 6(10) кВ (КЛ) является оценка изменения параметров частичных разрядов в изоляции.

В материале [1] от компании Emerson рассказывается о возможностях диагностирования ЧР в силовых кабелях и принятых нормативах. Так, для КЛ с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ): при интенсивности ЧР от 0 до 3000 пКл разряды считаются в приемлемых рамках; от 3000 до 6500 пКл – некоторая обеспокоенность и рекомендуется мониторинг; от 6500 до 10000 пКл – некоторая обеспокоенность, необходим регулярный мониторинг; более 10000 пКл – рекомендован ремонт или замена. Для КЛ с изоляцией из сшитого полиэтилена при интенсивности ЧР: от 0 до 250 пКл разряды в приемлемых рамках; от 250 до 350 пКл – некоторая обеспокоенность, рекомендован мониторинг; от 350 до 500 пКл – некоторая обеспокоенность, необходим регулярный мониторинг; более 500 пКл – необходим ремонт или замена.

Однако не смотря на предложенные нормативы теория развития ЧР в полном объёме не разработана, по причине влияния множества физико-химических процессов, кроме того необходимо учитывать специфику стареющей кабельной сети в России и большой процент эксплуатации КЛ с бумажной пропитанной изоляцией более 95 % по городам Челябинск и Нефтекамск.

Одним из вероятно влияющих не учитываемых факторов на процессы формирования частичных разрядов в изоляции силовых кабелей 6(10) кВ является магнитное поле (МП). Для решения задачи по оценке влияния МПна парметрыЧР в изоляции нами в период с 2009 по 2013 год на 9 действующих и 7 опытных кабельных линиях 6(10) кВ межрайонного предприятия электрических сетей г. Нефтекамск (КЛАСБ, ААШв), выбранных в качестве объектов исследования, регулярно оценивались параметры ЧР.

Целью исследований было поставлено оценить влияние режима работы кабеля на параметры ЧР в изоляции на холостом ходе (КЛ под напряжением, без нагрузки) и при различной нагрузке.

Оценка процессов, происходящих в изоляции, проводилась по характеристикам и интенсивности частичных разрядов (амплитуда (Q02), мВ; интенсивность (PDI), мВт; количество импульсов) с применением диагностирующего устройства R-400 (Вибро-Центр, г. Пермь) [2]. Замер ЧР проводился на заземляющем проводнике оболочек КЛ высокочастотным датчиком RFCT-5 (№ 4, рис. 1), измерения сопротивления изоляции и величин токов утечки оценивались испытательной высоковольтной лабораторией типа АИП-70 и мегаомметром типа Ф 4102-2-1М.

Рис. 1. Схема экспериментальных исследований
по определению интенсивности ЧР в изоляции КЛ
(замеры в ячейке кабельного ввода в ТП 6/0,4 кВ)

На рис. 2 представлен характерный график изменения параметров ЧР в изоляции с учётом изменения тока нагрузки.

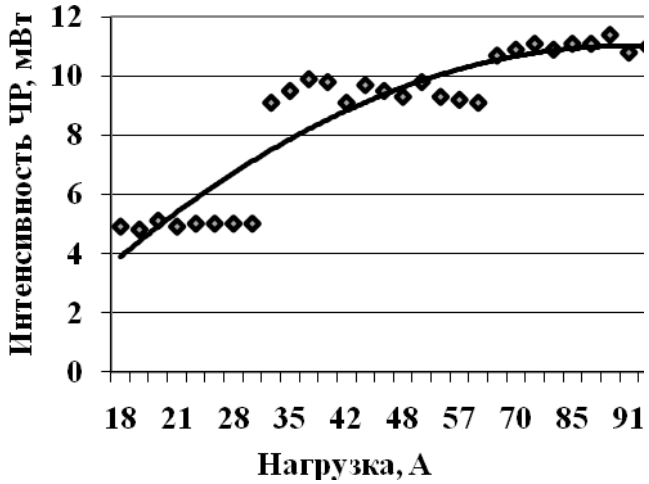


Рис. 2. График изменения интенсивности ЧР
от тока нагрузки КЛ типа ААШв 3×150 мм^2, 1350 м

Для исследования влияния магнитной составляющей электромагнитного поля кабеля на интенсивность ЧР и отсеивания предположения, встречающегося в литературе, где указывается, что, вероятно, данный процесс связан с нагревом изоляции от протекания тока нагрузки, нами была разработана экспериментальная установка (рис. 3)[3, 4].

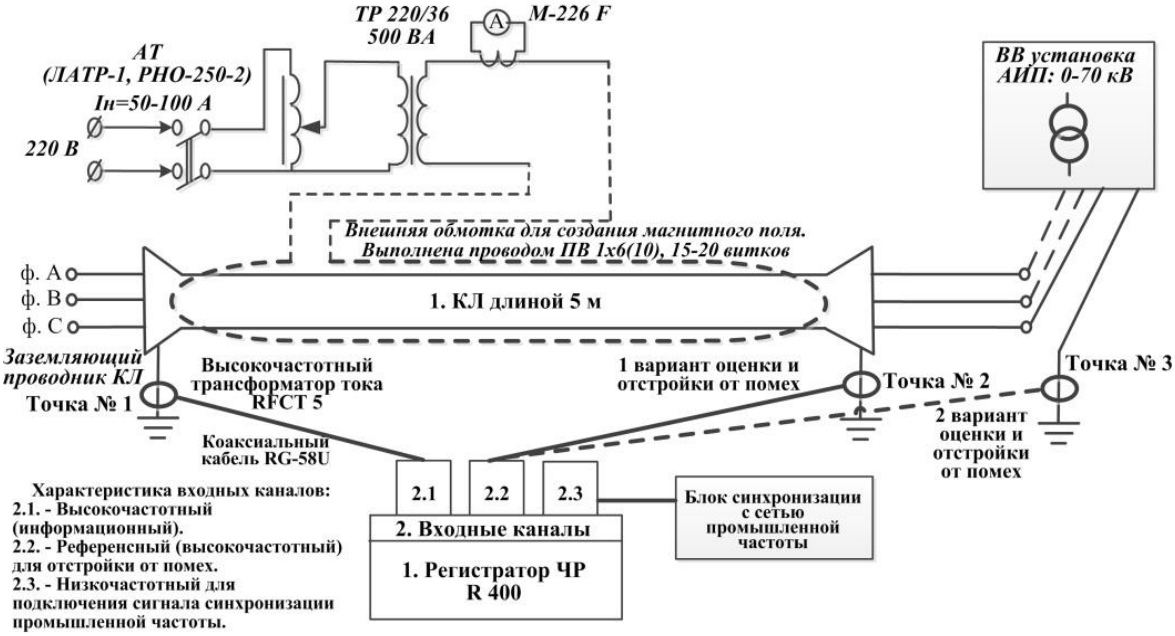


Рис. 3. Схема измерения параметров ЧР
в изоляции опытных кабелей и отстройки от помех

Экспериментальная установка состоит из: 1) КД длиной 5 м; 2) испытательной высоковольтной лаборатории типа АИП-70; 3) мегаомметра типа Ф 4102-2-1М; 4) измерителя и анализатора электрического и магнитного полей EFA-300 NARDA в диапазоне частот 1–32000 Гц; 5) токоизмерительных клещей типа – М266 F; 6) для создания магнитного поля использовались две внешние обмотки, намотанные вдоль кабеля по 15 и 21 витков проводом ПВ 1×6 мм^2. Обмотки были намотаны вдоль кабеля из условия, чтобы направление силовых линий МП совпадало с направлением магнитных линий, если бы ток протекал по жилам кабеля. Внешняя обмотка использовалась, чтобы исключить нагрев изоляции, который возникает при протекании тока нагрузки, и для возможности исследовать влияние на интенсивность ЧР, а значит, и на физико-химические процессы в изоляции, именно магнитного поля. Контроль температуры изоляции проводился с использованием термопары прибора для измерения температуры М 890G. Для прогрузки обмоток использовались трансформаторы 220/36 В, для изменения уровня магнитного поля (индукции) использовались два регулируемых вручную автотрансформатора ЛАТР – 0-230 В. Изменение тока во внешних обмотках позволяет изменять интенсивность магнитно-

го поля непосредственно над кабелем от 0 до 6 мТл, что соответствует индукции в слоях поясной изоляции при изменении тока нагрузки от ноля до длительно допустимого.

Выводы

1. В ходе проведённых исследований было установлено влияние магнитной составляющей электромагнитного поля кабеля на интенсивность частичных разрядов в изоляции (а как следствие и на физико-химические процессы и процесс старения изоляции) на примере действующей КЛ и КЛ в лабораторных условиях.

2. Доказано, что экспериментальные результаты изменения величины прироста интенсивности ЧР, при каждом значении индукции воздействующего переменного магнитного поля, в ходе статистической обработки полученных данных, подчиняются закону распределения Гаусса.

3. При протекании тока нагрузки происходи нагрев жил и изоляции кабеля, что приводит к повышению давления в изоляции, а как следствие к повышению напряжения при котором наблюдаются частичные разряды в воздушных включениях в изоляции. Таким образом, наблюдаются два конкурирующих процесса: 1. Нагрев изоляции и как следствие повышение давления,влияющие на параметры ЧР. 2. Влияние магнитного поля на процесс развития частичных разрядов.

Библиографический список

1. PartialDischargeTestingforCables // ElectricalReliabilityServices. ServiceDataSheetRef. No. PM-02-301-A. December 2008. – URL: http://www.assetweb.com/ers.

2. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Методическое пособие. – Пермь: Производственно-внедренческая фирма «Вибро-Центр», 2009. – 102 с. – URL: http://www.dimrus.ru; http://www.vibrocenter.ru/.

3. Коржов, А.В. Влияние электрического и магнитного полей силовых кабельных линий напряжением 6(10) кВ на интенсивность частичных разрядов в изоляции при различных режимах эксплуатации / А.В. Коржов // Кабели и Провода. – 2012. – № 1 (332). – С. 16–21.

4. Коржов, А.В. Исследование влияния магнитной составляющей электромагнитного поля на интенсивность частичных разрядов в кабелях с бумажной пропитанной и полиэтиленовой изоляцией / А.В. Коржов // Кабели и Провода. – 2012. – № 6 (337). – С. 10–15.

К содержанию

УДК 621.316.1.017 + 004.8 + 004.032.26

МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА С УЧЕТОМ МЕТЕОФАКТОРОВ И АЛГОРИТМОВ ЕЕ ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В.С. Павлюков, С.В. Павлюков, С.П. Сусанин

Приводятся результаты разработки и исследования модели элемента искусственного интеллекта с целью прогнозирования функций времени, влияющими на перспективный режим функционирования технических систем.

Ключевые слова: элемент искусственного интеллекта, нейронная сеть, алгоритм обучения, функции времени.

Разработка систем управления для различных электротехнических объектов в современных условиях является важной научной задачей, которая требует развития и применения новых методологий. До настоящего времени имеется еще много задач, которые ждут своего решения. Так например, узловые нагрузки, которые являются важным режимным параметром, могут моделироваться детерминированными данными [1], разложением графиков нагрузок рядом гармонических функций [2], с использованием факторного анализа [3], применением разложения Карунена-Лоэва [4], рассматривающего исходные данные на уровне случайных процессов, нестационарными вероятностно-статистическими способами [5] и др. Указанные подходы громоздки, требуют большую предварительную информацию, связанную с регулярными, объемными замерами режимных параметров и их сложной численной обработкой. Первостепенное значение при разработке новых технологий будет иметь повышение требований к точности моделирования текущих и перспективных процессов управления техническими коммуникациями и объектами электроэнергетики. К таким новым технологиям можно отнести использование элементов искусственного интеллекта. Указанное выше является актуальным и определяет направление исследований в области управления техническими системами.

В работе предлагается развитие математического моделирования функций времени или графиков мощностей нагрузок, позволяющее решать задачу оперативных расчетов режимов в разрезе суток, а также краткосрочного планирования режимов, повышая качество управления работой электротехнических систем. Перспективным направлением исследований для указанной задачи является применение аппарата элементов искусственного интеллекта.

Наиболее объемную режимную узловую информацию высоковольтной или питающей системы можно представить в виде вектора-функции графиков полных мощностей за некоторый дискретный интервал времени [6].

$$\mathbf{s}(t) = [s_i(t)] = [p_i(t) + jq_i(t)], \quad (1)$$

или с использованием режимной информации в виде узловых токов:

$$\mathbf{j(t)} = j_i'(t) + j_i''(t) \ . \quad (2)$$

Зависимости компонент узловых нагрузок рассматриваются в виде произведений $p_i(t) = p_i f_i^{\,p}(t)$, $q_i(t) = q_i f_i^{\,q}(t)$, $j_i'(t) = j_i' f_i^{\,j'}(t)$, $j_i''(t) = j_i'' f_i^{\,j''}(t)$ средних значений активных p_i, реактивных q_i мощностей, действительной j_i' и мнимой j_i'' составляющих узловых токов и соответствующих функций $f_i^{\,p}(t)$, $f_i^{\,q}(t)$, $f_i^{\,j'}(t)$, $f_i^{\,j''}(t)$, ($i = \overline{1,n}$, n – число независимых узлов электрической системы) математические ожидания, каждой из которых за период времени T равны единице.

Технические системы, в том числе электроэнергетическая, работают по определенному ритму, в котором внешнее и внутреннее ее состояние во многом повторяется через определенные промежутки времени. Используя наблюдение работы системы в момент времени *t,* можно предсказать ее работу в момент времени *t+d,* то есть ожидаемое в перспективе состояние. Подобные задачи можно решать с использованием элементов искусственного интеллекта, таких как Multiple layer perceptron–MLP[7] или многослойных нейронных сетей. Разработка нейронной сети зависит от типа задачи и ее сложности. Под конкретную задачу(например, прогноз среднего) разрабатывают необходимую архитектуру нейронной сети со всеми ее атрибутами. Нейронная сеть представляет собой математическую модель особой конструкции, под которой понимается ее определенная многослойная архитектура и способы ее обучения для решения задач.

Прежде чем использовать сеть для получения результатов, допустим прогнозирования функций времени, необходимо ее обучить. Для этого подготавливают определенные данные, с помощью которых необходимо обучить нейронную сеть, разделяя их на две группы: обучающую и тестирующую. Для целей прогнозирования берутся выборки данных ретроспективного характера и некоторых внешних эффектов. Рассматривались несколько вариаций данных. Например, данные почасовых мощностей графиков текущих суток, данные почасовых графиков текущих суток и предыдущих, данные почасовых графиков текущих суток и двух предыдущих суток. Все исходные данные были нормированы с учетом выбора функции активации. Входы сети синапсами соединяются с первым скрытым слоем, первый скрытый слой своими аксонами соединяется с синапсами следующего скрытого слоя, и т.д., последний скрытый слой с выходом сети. Все связи инициализировались весовыми коэффициентами случайным образом в интервале $\pm 1,0$, или используя генератор случайных чисел, распределенных в некоторой окрестности чисел, например, $[\pm 1,0]$ или $[+1,-1]$. Процесс обучения представляет итерационный характер. Каждая итерация на-

зывается эпохой, состоящей, в данной разработке, из двух этапов. Первый этап предназначен для развития вычислительного процесса от входа к выходу сети(эта часть алгоритма называется прямым функционированием сети) с выполнением соответствующих операций.

Входные сигналы скрытого слоя обрабатывались активационной сигмоидной функцией [7]:

$$\varphi\left(f_\nu^{sk}\right)=\frac{1}{1+\exp^{\left(-f_\nu^{sk}\right)}}, \quad (1)$$

где sk – номер слоя нейронов; ν –номер нейрона в соответствующем слое. После обработки сигналы предыдущего слоя передавались как входные сигналы для следующего слоя сети. Важным свойством функции (1) является ее дифференцируемость, производная которой имеет следующий вид:

$$f'\left(y_\nu^{sk}\right)=\frac{\exp\left(-y_\nu^{sk}\right)}{\left(1+\exp\left(-y_\nu^{sk}\right)\right)}=\frac{1}{1+\exp\left(-y_\nu^{sk}\right)}\cdot\left[1-\frac{1}{1+\exp\left(-y_\nu^{sk}\right)}\right]=$$

$$=f\left(y_\nu^{sk}\right)\cdot\left[1-f\left(y_\nu^{sk}\right)\right]. \quad (2)$$

На выходе сети проверяется правильность работы сети. Если ошибка будет больше заданной при обучении сети на обучающей выборки данных, то для решаемой задачи применялся алгоритм Backpropagation algorithm (процедура этой части алгоритма называется обратным функционированием). При втором запуске сети для того же примера привело к ошибке равной:

$$err==0{,}034. \quad (3)$$

Вторая итерация обучения сети дала снижение ошибки на 0,004. На сотой итерации ошибка составляла $1{,}763\cdot10^{-3}$, на тысячной $-1{,}333\cdot10^{-4}$, на десятитысячной $-1{,}072\cdot10^{-5}$, на стотысячной $-9{,}028\cdot10^{-7}$.

Тестирующий пример входных данных показал адекватность модели нейронной сети получением максимально близкого желаемого результата. Также были исследованы результаты работы сети с другими активационными функциями в режиме обучения. Результаты получены следующие: для функции $f(x)=th(x)$: на первой итерации ошибка составляла 0,037, на второй – 0,034, на сотой – $1{,}677\cdot10^{-3}$, на тысячной $-1{,}301\cdot10^{-4}$, на десятитысячной $-1{,}065\cdot10^{-5}$, на стотысячной $-9{,}061\cdot10^{-7}$; для функции $f(x)=e^x/\left(1+e^x\right)$: на первой итерации ошибка составляла 0,038, на второй – 0,034, на сотой – $1{,}763\cdot10^{-3}$, на тысячной $-1{,}333\cdot10^{-4}$, на десятитысячной – $1{,}072\cdot10^{-5}$, на стотысячной – $9{,}028\cdot10^{-7}$; для функции $f(x)=1/\left(1+x^2\right)$: на

первой итерации ошибка составляла 0,034, на второй – 0,033, на сотой – $3{,}152 \cdot 10^{-3}$, на тысячной $-1{,}608 \cdot 10^{-4}$, на десятитысячной – $1{,}075 \cdot 10^{-7}$, на стотысячной – $8{,}31 \cdot 10^{-7}$; для функции $f(x) = e^{-x^2}$: на первой итерации ошибка составляла 0,036, на второй – 0,035, на сотой – $3{,}137 \cdot 10^{-3}$, на тысячной $-1{,}588 \cdot 10^{-4}$, на десятитысячной – $1{,}065 \cdot 10^{-7}$, на стотысячной – $8{,}243 \cdot 10^{-7}$.

Пример, проиллюстрированный выше, далее развит для прогноза временных функций, с использованием режимных данных за прошедшие с G по G-3 годы для конкретных узлов региональной электрической сети. Анализ погрешностей результатов среднего суточного прогноза для рабочих суток в разрезе недели по данным указанных лет, варьировался от 3,9 до 2,8 % и, примерно, от 0,4 % до 0,6 % больше для нерабочих дней. При прогнозировании среднесуточной нагрузки узлов погрешность не превышала 1,63 % с использованием алгоритма обратного распространения для минимизации ошибки совместно с коэффициентом обучения сети. Проход осуществляется в противоположную сторону до первого скрытого слоя с выполнением корректирующих действий. Так как нейронная сеть обрабатывает только числовые данные, то исходные данные предварительно подвергались препроцессированию, для того, чтобы каждый элемент входного вектора принадлежал отрезку [0; 1] или [-1;1] в зависимости от используемой функции активации. Нейроны скрытого слоя, связанного с входом, получают комбинированные сигналы, которые моделируются следующим уравнением, записанным в общем виде:

$$ner_j^k = \sum_{j=1}^{n} w_{ji}^k pow_i, \qquad (4)$$

где w_{ji}^k – весовые коэффициенты связей нейронов с ячейками входных сигналов сети; $k = \overline{1, sl}$, sl – количество скрытых слоев сети; $j = \overline{1, m}$, m – число нейронов в скрытом слое; $pow(i)$ – сигналы входа, $i = \overline{1, n}$ – количество ячеек ввода сети. К этим сигналам добавляются сигналы $ec^k(cm)$ источников смещения: $nc^k(cm) = wc^k(cm) \cdot ec^k(cm), cm = \overline{1, kc}$, kc – количество связей с k слоем сети. Комбинированный сигналы слоя активируются с помощью специальных функций, например, $f(x) = 1/\left(1 + e^{(-x)}\right)$. После прямого прохода сигналов по сети проверяется ее реакция на ошибку. Ошибка работы сети проверяется согласно методу наименьших квадратов по выражению $err = 0{,}5\left(o_{ut} - out_1\right)^2$. Правильная реакция сети задается параметром o_{ut}. Реальное состояние выхода сети– out_1. Если результат не удовлетворяет поставленной задаче, то для уточнения или дальнейшего

обучения нейронной сети применяют специальные приемы, например, алгоритм Backpropagation algorithm – обратного распространения ошибки. Функции данного алгоритма будут представлять обратный ход текущей эпохи [7].

Для разработанной нейронной сети(подробности не приводятся) был запущен пример для прогнозирования среднего некоторой функции времени за период *T*. Реальное значение выходного сигнала рассчитанного сетью – $out_1 = 0{,}725$. Правильная реакция нейронной сети на входной сигнал задана o_{ut}=1. Ошибка сети составила $err = 0{,}038$. Параметры сети требуют корректировки, что и осуществляет разработанный алгоритм.

Достоинство предложенного подхода заключается в том, что при моделировании функций времени громоздкие методы указанные выше, заменены моделями, использующими элементы искусственного интеллекта, свободных от трудоемких вычислений, и теория о которых последнее время активно развивается.

Погрешность в расчетах прогноза потокораспределения электроэнергии, потерь мощности и энергии, а также и в других задачах, например, определения мест повреждений на линиях электропередач при ликвидации аварийных ситуаций вносят и параметры схем замещения воздушных линий электрических передач:

– погонные активное и реактивное сопротивления, Ом/км;

– погонные активная и реактивная проводимости (для линий длиной более 300 км), $1/(\text{Ом} \cdot \text{км})$. Градиент изменения указанных параметров зависит от сложных вариаций метеорологических условий(например, температуры окружающей среды, объемов осадков, механических напряженностей от скорости ветра и др.), типа дня недели и характера потребления нагрузки. Поэтому традиционный подход для расчета параметров схем замещения на основе погонных характеристик с использованием справочников для поставленной задачи сопровождается существенной погрешностью [8] при определении потерь мощности и энергии. Более точный учет параметров схем замещения решается с привлечением аппарата искусственных нейронных сетей [7]. Вопрос уточнения параметров и уменьшения погрешности решался на базе многослойной сети. В качестве активационной функции использовалась(2).

Обучение сети проводилось с помощью алгоритма обратного распространения ошибок. Выполнение алгоритма производилось, начиная со случайной генерации весов многослойной сети. Во время продвижения по сети от входа к выходу вперед рассчитываются комбинированные весовые суммы входных сигналов для текущего скрытого слоя нейронов и перевод данных сигналов к следующему слою с помощью обработки их функцией активации указанной выше. Для элементов выхода рассчитывается совокупный вводный и выводной сигналы. Начиная с выхода, выполняется об-

ратное движение через нейроны скрытых слоев, предварительно вычислив значение ошибки, сравнением реальных и целевых величин исследуемых переменных на выходе. Для коррекции весов в сети на обратном ходе используется значение среднеквадратичной ошибки для указанных переменных. Процесс обучения носит циклический характер в виде эпох, в ходе которых минимизируется ошибка для заданной переменной. После завершения обучения весовые коэффициенты фиксируются и проверяется работа сети на тестовых данных. Если требуется учет короны, то можно обратиться к [9]. Охлаждение проводов воздушных линий и изолированных жил кабелей имеет разную физическую природу и для обеспечения устойчивой и надежной работы питающих и распределительных сетей, регламентируемой «Правилами устройств электроустановок», для кабельных линий следует вводить дополнительные признаки, связанные с конструкцией, определяющих условия прокладки и свойства грунта, значения температуры поверхности земли (или перепада температур между жилой кабеля и поверхностью земли) при монтаже кабелей в траншеях. В процессе обучения учитывается разнохарактерность режимов отдельных нагрузок введением коэффициента относительного времени продолжительности включения параметром ПВ.

Проведенные исследования влияния климатических условий на режимные параметры показали, что наибольшее влияние на точность прогноза оказывает температурный фактор данной местности. Особенно при аномальных явлениях. Стабилизация факторов может иметь продолжительность до нескольких суток(чаще всего двое-трое суток по метеоданным для рассматриваемого материкового региона). Нейронная многослойная сеть, алгоритм работы которой был проиллюстрирован выше, имела входы, на которых не инициировался сигнал. При исследовании влияния метеофактора был инициирован сигнал, приведенный к выше описанным условиям. На первой эпохе работы алгоритма ошибка была $err = 0{,}864$, на тысячной итерации $err = 1{,}784 \cdot 10^{-4}$. Результаты превышают точность коррекции прогноза, так называемым интуитивным способом, на порядки. Исследуются влияния и других метеофакторов. Надо отметить, что при исключении из узловых режимных параметров составляющих, график нагрузки которых за сутки изменялся незначительно(например, непрерывный характер работы предприятия), адаптивность моделирования на первой итерации по погрешности была близка к выше приведенной.

В работе предложен подход на базе применения элементов искусственного интеллекта для краткосрочного прогнозирования режимных и схемных параметров, не требующий разработки сложных математических моделей и достаточно эффективный как для задач проектирования так и для анализа электроэнергетических процессов.

Библиографический список

1. Герасименко, А.А. Передача и распределение электрической энергии:Учебное пособие / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – Ростов-н/Д.: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2006. – 720 с.

2. Гамм, А.З. Статистические методы оценивания состояния электроэнергетических систем / А.З. Гамм.– М.:Наука, 1967. – 220 с.

3. Иберла, К. Факторный анализ / К. Иберла. – М.:Статистика, 1980. – 398 с.

4. Лоэв, М. Теория вероятностей / М. Лоэв. – М.: Ил. 1962.

5. Фокин, Ю.А. Экспериментальное исследование вероятностно-статистических характеристик нагрузок в энергосберегающей системе / Ю.А. Фокин, И.С. Пономоренко, В.С. Павликов // Электричество. – 1983. – № 9. – С. 9–15.

6. Фомин, Н.И. Метод определения потерь электроэнергии в питающей сети для задачи комплексной оптимизации схем распределительных электрических сетей / Н.И. Фомин, В.С. Павлюков // Электробезопасность. – 1999. – № 3–4. – С. 3–7.

7. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: ИД Вильямс, 2006. – 1104 с.

8. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др.; под ред. В.Н. Казанцева. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 368 с.

9. Справочник по проектированию электрических сетей / И.Г. Карапетян, Д.Л. Файбисович, И.М. Шапиро; под ред. Д.Л. Файбисовича. – М.: ЭНАС, 2005. – 313 с.

К содержанию

УДК 621.314.2

ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ КОМПЛЕКС РЗА ТИПОВОЙ КОМПЛЕКТНОЙ ПОНИЗИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ НА СВОБОДНО-ПРОГРАММИРУЕМЫХ ТЕРМИНАЛАХ С ИНТЕРФЕЙСОМ МЭК 61850

А.Н. Садовников

Рассмотрена возможность использования микропроцессорных свободно-программируемых терминалов с интерфейсом МЭК 61850 для создания централизованного комплекса релейной защиты и автоматики в распределительной сети с установками малой генерации.

Ключевые слова: алгоритм встречно-направленной логической защиты шин низкого напряжения типовой двухтрансформаторной подстанции.

В настоящее время распределительные сети 0,4, 6, 10 кВ предприятий оснащаются генерирующими устройствами, например газотурбинными, газопоршневыми установками, постоянно работающими в режиме параллельной работы с питающей энергосистемой. При этом меняется режим работы подстанций предприятия, выполненных чаще всего по схемам 4Н, 5Н, 5АН по [1] на двухстороннее питание (рис. 1). Устройства релейной защита и автоматики (РЗА) распределительной сети предприятия перестают соответствовать нормативным требованиям. Необходима реконструкция системы РЗА подстанций предприятия.

В соответствие с [2], [3] основными требованиями к РЗА двухтрансформаторныхподстанций, работающих в режиме двухстороннего питания являются:

- наличие быстродействующей защиты шин;
- обеспечение селективности выдержек времени максимальных токовых защит (МТЗ) при различном направлении мощности короткого замыкания (КЗ) через защиту.

Логическая защита шин 6–10 кВ, реализуемая в микропроцессорных терминалах, представленных на рынке для данного напряжения сети, непригодна в случае двухсторонней подпитки места КЗ.

Применение специализированной дифференциальной токовой защиты шин с торможением требует установки дополнительных терминалов на каждое присоединение, что ведет к росту затрат. Кроме того, на рынке устройств РЗА отсутствуют типовые, проработанные решения по установке дифференциальной защиты на шины низкого напряжения (6–10 кВ) понизительных двухтрансформаторных подстанций.

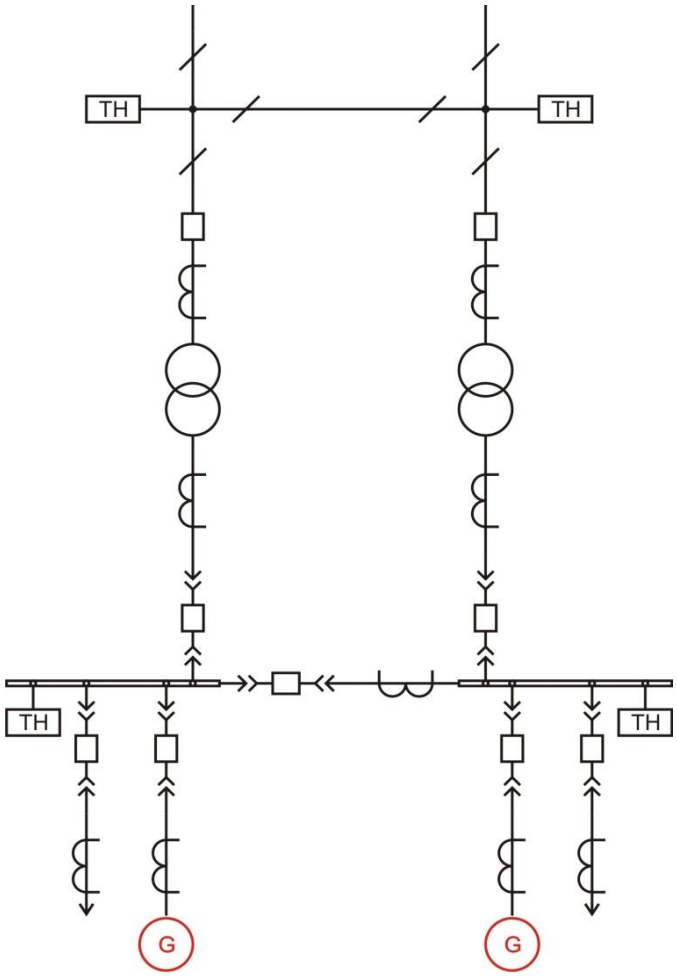


Рис. 1. Подключение генерирующих
устройств на стороне НН ПС

Создать логическую защиту шин в сети с двусторонним питанием можно применив централизованный комплекс РЗА, связав свободно программируемый контроллер, которые широко представлены на рынке, с входными/выходными сигналами отдельных устройств РЗА присоединений подстанции, как описано в работах [4–6].

За последние годы на рынке устройств РЗА появились терминалы с наличием не только свободно-программируемой логикой, позволяющей менять назначение дискретных входов/выходов и реализовывать простейшие логические функции и выдержки времени, но и с использованием гибких функций защиты, позволяющих изменять алгоритмы функционирования отдельных видов (ступеней) защит (автоматики). К подобным устройствам относятся серии РЗА присоединений 6–35 кВ:

- SIPROTEC Compact и SIPROTEC 5 фирмы Siemens;
- P60 Agile, P40 Agile P14N и P40 Agile P14D фирмыALSTOM;
- Multilin 850, F650и 350 фирмы GE Digital Energy;
- Relion670 фирмы ОО АББ Силовые и Автоматизированные Системы.

При выполнении РЗА подстанции на терминалах с подобной функциональностью, возможно, создать логическую защиту шин в сети с двусторонним питанием т.н. встречно-направленную логическую защиту, разработав алгоритмы отдельных терминалов и методику выбора их уставок. Рассмотрим поведение подобной защиты на примере рис. 2.

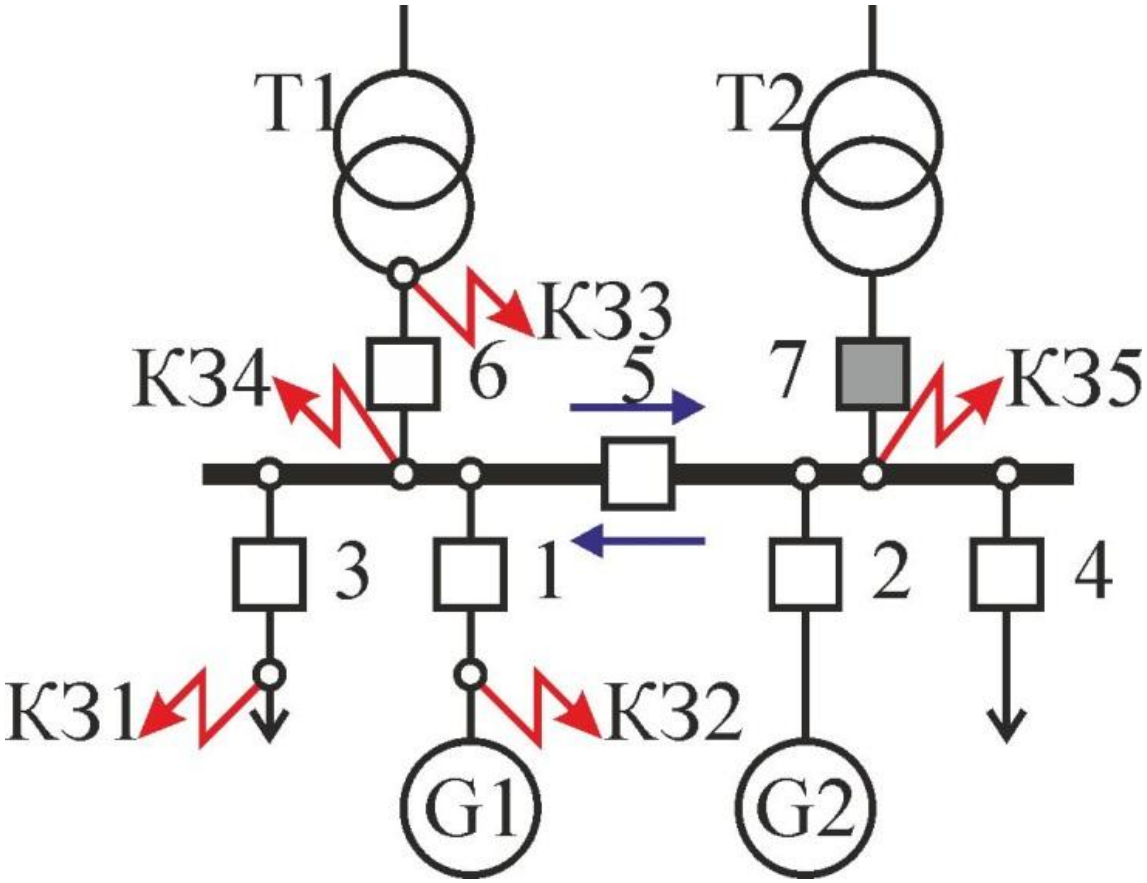


Рис. 2. Поведение ЛЗШ при наличии генераторов на шинах НН понизительной подстанции

При КЗ на отходящих линиях (точка КЗ1) действие ЛЗШ блокируется пуском МТЗ отходящей линии. При КЗ на линии к генератору (точка КЗ2) действие ЛЗШ блокируется пуском направленной МТЗ установленной в ячейке линии к генератору. При КЗ на вводе системы (точка КЗ3) ЛЗШ блокирует действие быстродействующей защиты питающего трансформатора (при мощности трансформатора 6,3 МВА и более, это дифференциальная защита (ДЗТ)). При КЗ на одной из секций (точки КЗ4, КЗ5) ЛЗШ срабатывает, отключая практически без выдержки времени выключатели питающих присоединений поврежденной секции. В случае КЗ4 это выключатели 1, 6, 5, а в случае КЗ5 это выключатели 2, 7, 5. Выбор поврежденной секции осуществляет двунаправленный орган направления мощности (ОНМ) терминала секционного выключателя (СВ).

Алгоритм встречно-направленной ЛЗШ реализованный с помощью графического языка программирования FlexLogic, входящий в пакет управления устройствами РЗА Multilinфирмы GEDigitalEnergy [7], выполняемый терминалом CB850серии представлен на рис. 3.

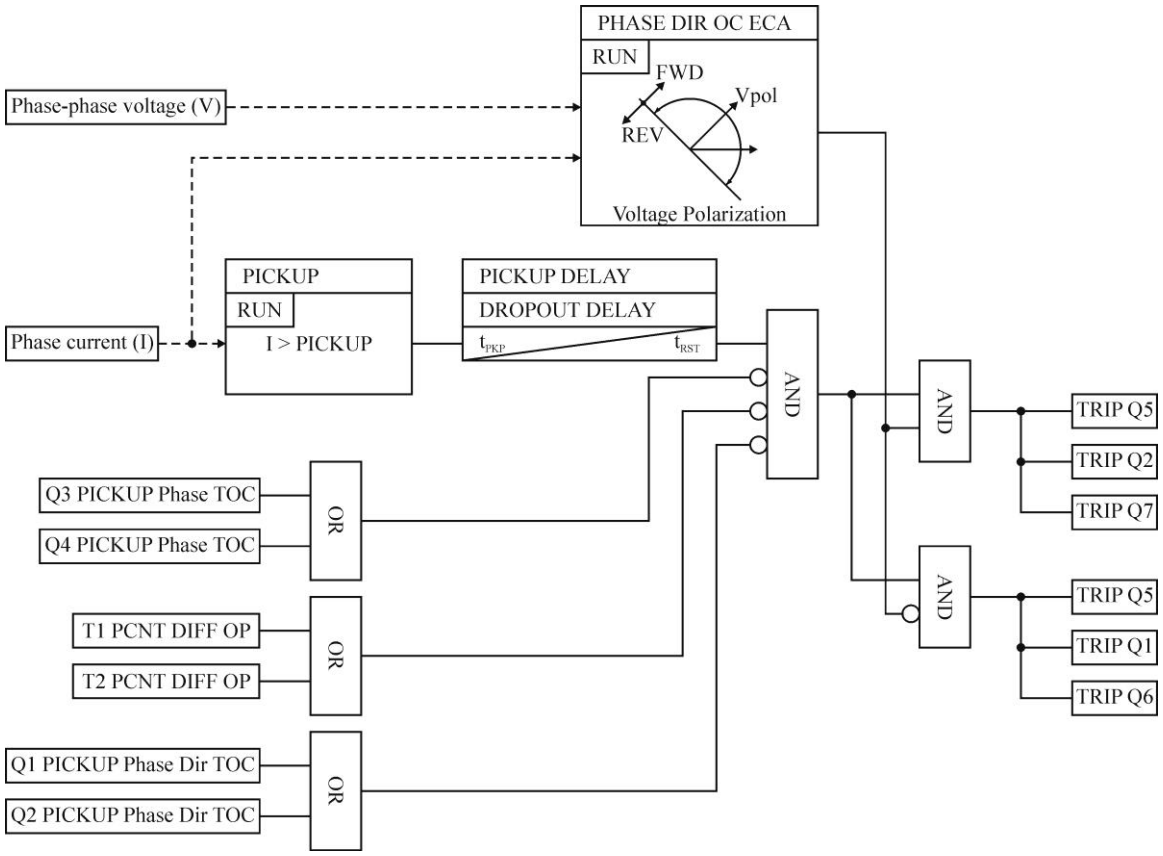


Рис. 3. Упрощенный алгоритм встречно-направленной ЛЗШ, реализуемый свободно-программируемым терминалом РЗА СВ

ЛЗШ запускается по срабатыванию пускового органа тока (PICKUP) при КЗ на шинах НН ГПП. При отсутствии блокирующих сигналов о пуске МТЗ отходящих присоединений (PICKUP Phase TOC), пуске направленных МТЗ линий к генераторам (PICKUP PhaseDir TOC), срабатывании дифференциальной защиты трансформаторов (PCNT DIFF OP) токовый орган действует с небольшой выдержкой времени (PICKUP DELAY) на отключение выключателей питающих присоединений поврежденной секции. Место повреждения локализуется с помощью ОНМ (PHASE DIR OC ECA).

При реализации встречно-направленной ЛЗШ вышеперечисленными свободно-программируемыми терминалами с поддержкой протокола МЭК 61850[8], возможна передача между терминалами дискретных сигналов не сухими контактами на оперативном напряжении, а цифровым способом через электрический RS485 или оптический интерфейс, что позволяет уменьшить количество дополнительных модулей дискретных входов/выходов в терминалах и повысить быстродействие алгоритма определение повреждения на шинах, рис. 4.

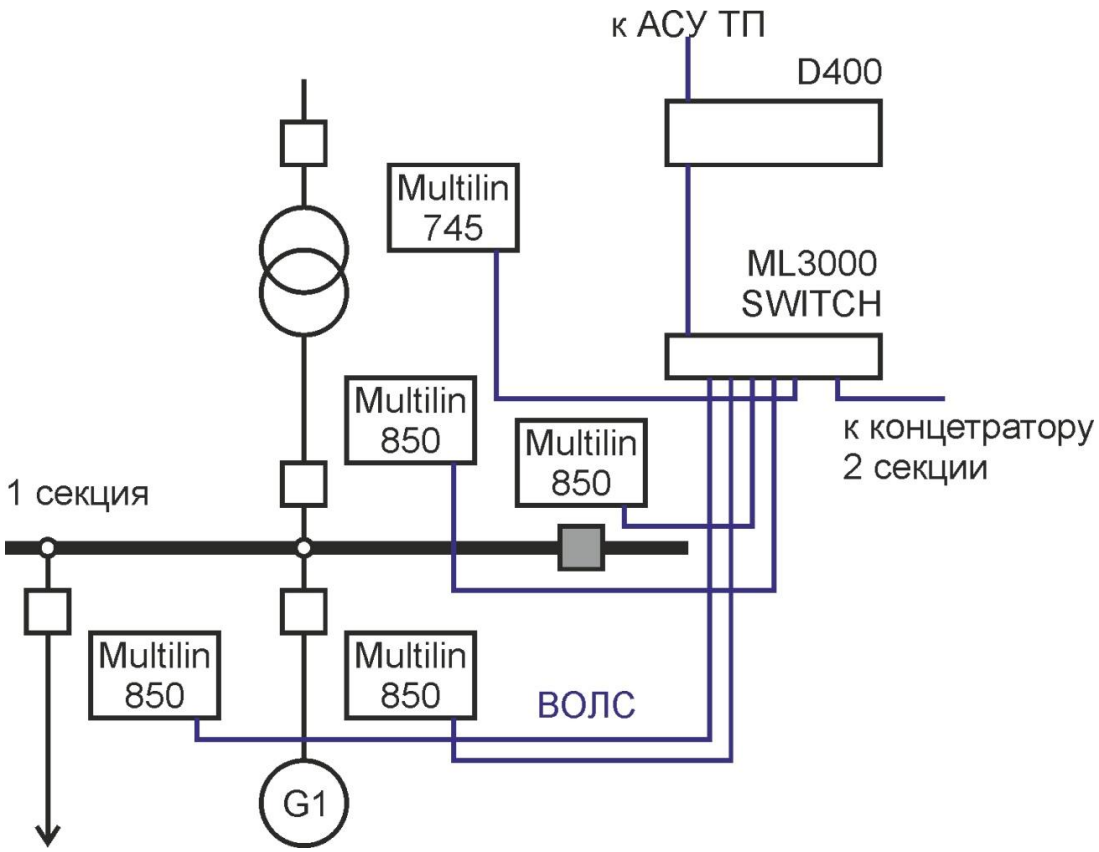


Рис. 4. Организация цифровой связи терминалов Multilin
по стандарту МЭК 61850

При выборе параметров встречно-направленной ЛЗШ оптимизации подлежат ток срабатывания пусковых органов отдельных терминалов, входящих в схему и выдержка времени центрального терминала ЛЗШ (в данном примере СВ). При выборе параметров уставок, учитывались требования [9]. Оптимизация уставок ЛЗШ проводилась на модели РЗА двухтрансформаторной подстанции [10, 11] реализованной с помощью пакета LabView.

Ток срабатывания пусковых органов ЛЗШ терминалов отдельных присоединений выбирается исходя из условия гарантированной чувствительности при минимально-возможном токе двухфазного КЗ на шинах НН подстанции:

$$I_{\text{по лзш}} = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} I^{(3)}_{\text{кз. мин. нн}}}{k_{\text{ч. н}}} k^{(2)}_{\text{от. ч. сх}},$$

где $I^{(3)}_{\text{кз. мин. нн}}$ – ток короткого замыкания в минимальном режиме работы энергосистемы на шинах НН подстанции; $k_{\text{ч. н}}$ – нормативный коэффициент чувствительности, по [12] равен 1,5; $k^{(2)}_{\text{от. ч. сх}}$ – коэффициент относительной чувствительности схемы к двухфазным КЗ, для схемы неполная звезда с дополнительным реле или полной звезды (типовым схемам соединения трансформаторов тока и аналоговых входов цифровых терминалов РЗА) равен 1.

Выдержка времени ПО ЛЗШ в терминале СВдолжна быть больше времени пуска направленных и ненаправленных МТЗ присоединений секций, а также времени срабатывания ДЗТ.

По данным [13, 14]:

- время пуска ненаправленной МТЗ составляет 0,015 с;
- время пуска направленной МТЗ составляет 0,025 с;
- время срабатывания ДЗТ составляет 0,035 с.

Таким образом, время срабатывания ПО ЛЗШ:

$$t_{ЛЗШ} = t_{МАКС} + t_{ЗАП} = 0{,}035 + 0{,}1 = 0{,}135,$$

где $t_{МАКС}$ – максимальное из времен пуска защит присоединений секций; $t_{ЗАП}$ – оптимальное время запаса, гарантирующее селективность действия ЛЗШ.

Алгоритм встречно-направленной ЛЗШ вводится в работу только при работе генераторов, подключенных к шинам НН подстанции. Если все генераторы отключены, питание потребителей осуществляется от системы и СВ нормально отключен. В этом случае для защиты от КЗ на шинах НН используются обычная ЛЗШ, которой стандартно оснащены все МП терминалы РЗА 6–35 кВ.

Кроме встречно-направленной логической защиты шин, терминалы со свободно-программируемой логикой и с использованием гибких функций защиты позволяют реализовать и прочие функции, присущие централизованным комплексам РЗА:

- резервирование отказов выключателей присоединений с учетом двустороннего питания;
- включение резерва (секционного выключателя низкого напряжения и высокого напряжения, при его наличии)с учетом синхронизации с генераторами, включенными на шины НН подстанции;
- ускорение МТЗ тупиковых присоединений;
- АПВ шин и отдельных присоединений с учетом вероятности возможного несинхронного повторного включения генераторов НН (особенности несинхронных АПВ в распределительных электрических сетях с малой генрацией подробно рассмотрены в работах [15, 16]);
- дуговая защита шин (ЗДЗ) (прием сигналов от световых и датчиков давления ячеек КРУ);
- АЧР/ЧАПВ.

Заключение

1. При подключении генераторов к шинам 6–10 кВ низкого напряжения типовых комплектных двухтрансформаторных подстанций в соответствии с нормативными требованиями требуется реализация быстродействующей защиты шин.

2. При реализации защит на подстанции терминалами со свободно-программируемой логикой с использованием гибких функций защиты в конфигурации, поддерживающей протокол МЭК 61850, возможно построение быстродействующей логической защиты шин низкого напряжения с учетом двустороннего питания.

3. Разработаны алгоритмы для терминалов РЗА подстанции, реализующие встречно-направленную логическую защиту шин.

4. Проведенный анализ работы встречно-направленной защиты шин на компьютерной модели РЗА двухтрансформаторной подстанции показал, что предложенные алгоритмы встречно-направленной логической защиты шин эффективны для всех режимов работы рассматриваемых подстанций.

5. Разработаны методы расчета уставок встречно-направленной логической защиты шин на отдельных терминалах РЗА. Исследовано их влияние на параметры селективности, быстродействия и чувствительности защиты.

6. Проработаны варианты аппаратной реализации встречно-направленной логической защиты шин.

Библиографический список

1. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения. – М.: Энергосетьпроект, 2011. – 144 с.

2. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2011. – 928 с.

3. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ. Стандарт организации. – М.: ФСК ЕЭС, 2012. – 110 с.

4. Садовников, А.Н. Централизованные комплексы релейной защиты и автоматики типовых комплектных двухтрансформаторных подстанций 35–220 кВ / А.Н. Садовников // Материалы 63-й научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов и сотрудников. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – 331 с.

5. Садовников, А.Н. Использование централизованных комплексов релейной защиты и автоматики при подключении генерирующих мощностей к шинам низкого напряжения понизительных двухтрансформаторных подстанций / А.Н. Садовников // Материалы XLI Всесоюзной научно-практической конференции (с международным участием) «Федоровские чтения». – М. Издательский дом МЭИ, 2011. – 210 с.

6. Садовников, А.Н. Централизованный комплекс релейной защиты и автоматики в распределительных сетях с малой генерацией / А.Н. Садовников // Релейщик. – 2013. – № 2. – С. 46–52.

7. Software EnerVista. – URL: http://www.gedigitalenergy.com/products/bro-chures/enervista.pdf/.

8. ГОСТ Р МЭК 61850-5 – 2011. Сети и системы связи на подстанциях. Часть 5. Требования к связи функций и моделей устройств. – М.: Изд-во стандартов, 2013. – 124 с.

9. СТО 56947007-29.120.70.109-2011. Методические указания по выбору параметров срабатывания устройств РЗА оборудования подстанций производства компании «GE Multilin». – URL: http://www.fsk-ees/about/standards_ organization.html.

10. Садовников, А.Н. Компьютерная модель релейной защиты и автоматики комплектной трансформаторной подстанции / А.Н. Садовников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2002. – Вып. 2. – № 7(16).

11. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 9693. Модель релейной защиты и автоматики двухтрансформаторной подстанции / А.Н. Садовников // Телеграф отраслевого фонда алгоритмов и программ. Инновации в науке и образовании. – № 12 (35).

12. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Изд-во ДЕАН, 2011. – 928 с.

13. 850 Feeder Protection System. Feeder protection and control. Instruction manual. 850 version: 1.1x. GE publication code: 1601-0298-A2 (GEK-119591A). – URL: http://www.gedigitalenergy.com/Protection_Control/Distribution-Feeder/850/850man-a2.pdf/.

14. 745 Transformer Protection System Instruction Manual. 745 revision: 5.20. GE publication code: 1601-0161-AC (GEK-106635L). – URL: http://www.gedigitalenergy.com/products/manuals/745/745man-ac.pdf/.

15. Гольдштейн, М.Е. Исследование несинхронного автоматического повторного включения в распределительных электрических сетях с газотурбинными установками / М.Е. Гольдштейн, А.Н. Садовников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2004. – Вып. 4. – № 1(30).

16. Гольдштейн, М.Е. Влияние алгоритмов РЗА на величину электродинамических нагрузок на валу ГТУ, работающей в «удаленном» узле энергосистемы / М.Е. Гольдштейн, А.Н. Садовников // Энергетика, экология, энергосбережение транспорт. Труды второй международной научно-технической конференции. Часть 1. – Тобольск. Новосиб. Гос. Акад. Водн. Трансп., 2004.

К содержанию

УДК 62-83-52 + 621.87:62-83-52

АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ СПУСКОПОДЪЕМНЫМИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ПОДЪЕМНЫХ МЕХАНИЗМОВ

А.М. Борисов, Н.Е. Лях, М.Ф. Фрик, Д.И. Беляев

Рассмотрено управление спускоподъемными операциями дизель-электрического крана и прежде всего автоматического перехода с силового спуска к спуску тормозному при спуске тяжелых грузов.

Ключевые слова: спуск силовой, спуск тормозной, переход с характеристики на характеристику.

На кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ЮУрГУ в содружестве с ООО «Горнозаводское объединение (г. Челябинск) был разработан способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором [1]. Он обеспечивает плавное регулирование скорости сопоставимое с плавностью регулирования скорости электродвигателей постоянного тока и плавностью регулирования скорости частотным преобразователем электродвигателей переменного тока. Такие электроприводы получили признание в основном при модернизации электроприводов крановых механизмов, как механизмов подъема, так и механизмов перемещения тележек и мостов кранов. Более 2000 таких приводов эксплуатируются на предприятиях России и стран ближнего зарубежья.

Челябинский механический завод при участии ООО «ЧелПривод» оснащает такими приводами механизмы 40 тонный гусеничный дизель-электрический кран ДЭК-401. Такие краны зачастую используются для работы в районах крайнего Севера.

Особенность электропривода механизма подъема крана заключается в том, что при спуске груза двигатель включается на подъем, а груз тянет его вниз. Двигатель при этом работает в режиме противовключения, а микроконтроллерная система управления (МСУ) регулирует скорость электродвигателя, поддерживая заданную положением джойстика управления скорость спуска. Проблемы возникают при спуске порожнего крюка или легкого груза, которые не могут преодолеть момент трения механизма. Спуск в этом случае производится на максимальной скорости, а для снижения скорости используется толчковый режим (включение/отключение контактора спуска). Для исключения толчкового режима устанавливается педаль, нажатие которой переводит двигатель в двигательный режим, и тогда обеспечивается плавное регулирование скорости, как и при спуске тяжелого груза. Однако здесь возникает проблема, что момент трения механизма подъема непостоянен. Момент трения покоя больше чем при движении механизма. Поэтому после трогания груза момент трения уменьшается, и

груз может потянуть вниз. В этом случае нужно немедленно отпустить педаль. А это уже зависит от крановщика. Нажатие этой педали крайне нежелательно при спуске тяжелого груза. В этой статье рассматривается решение задачи возложить на микроконтроллерную систему автоматическое определение тяжелого или легкого груза и автоматически обеспечивать переключение привода с режима противовключения на двигательный режим, т.е. убрать педаль и облегчить участь крановщика.

В существующем электроприводе управление статорными цепями всех двигателей механизмов крана возлагается на блок логического контроллера (БЛК) разработки ООО «Резонанс» (г. Челябинск). Решение этой задачи требует для механизма подъема передать управление статорными цепями его двигателя МСУ. В этом случае представленная на рис. 1 функциональная схема электропривода механизма подъема отличается от существующей только отсутствием педали и управлением статорными цепями от МСУ [2].

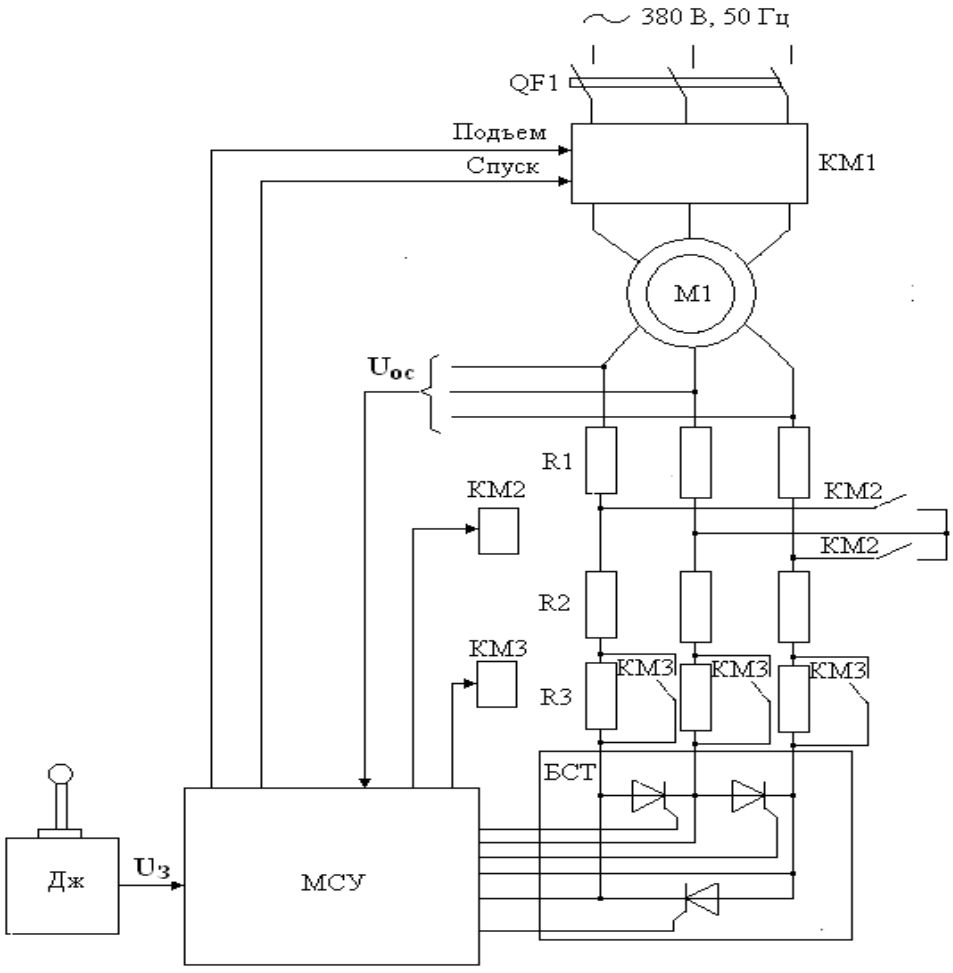


Рис. 1. Функциональная схема электропривода механизма подъема

В каждую фазу роторной цепи включены последовательно друг за другом три ступени резисторов. Первая ступень с резисторами *R*1 подключена к кольцам ротора. Вторые концы ее резисторов могут закорачиваться в звезду контактами контактора закорачивания КМ2 для получения характеристик близких к естественным. Вторая ступень с резисторами R2 включена для двигательного режима. Третья ступень с резисторами *R*3 используется в режиме торможения противовключением при спуске тяжелых грузов. В остальных режимах она зашунтирована контактами контактора КМ3. Она подключена к соединенным в треугольник тиристорам регулирования скорости блока силовых тиристоров (БСТ). Тиристоры блока БСТ управляются МСУ, к входу которой подключен джойстик Дж задания скорости. МСУ получает напряжение обратной связи $U_{ОС}$ непосредственно с колец ротора двигателя. Джойстик выдает напряжение задания $U_З$, уровень которого содержит информацию о требуемом направлении вращения электродвигателя и его скорости. МСУ анализирует $U_З$ и формирует команду реверсивному контактору КМ1 для работы электродвигателя на «Подъем» или «Спуск», а также управляет контакторами КМ2 и КМ3 и управляет тиристорами БСТ, обеспечивая регулирование скорости.

Принцип автоматизации управления поясняется на механических характеристиках привода для спускоподъемных режимов на рис. 2.

Характеристики *1n*, *2n* и *3n* соответствуют установке джойстика в положение на подъем. Жирными линиями выделены участки характеристик, участвующие в работе привода.

Характеристика *1n* – искусственная характеристика двигателя при работе на подъем, соответствующая включению в ротор (для уменьшения токов в роторе в динамических режимах) ступени резисторов *R*1 с сопротивлениями примерно равными активному сопротивлению фаз обмоток ротора. В дальнейшем изложении эта характеристика условно названа характеристикой близкой к естественной. На эту характеристику электродвигатель попадает только в случае, если электродвигатель имеет скорость $\omega > 0{,}5\omega_0$, где ω_0 – синхронная скорость электродвигателя. Характеристика *2n* ограничивает максимальное значение момента при плавном регулировании скорости подъема в диапазоне от $\omega = 0$ до $\omega = 0{,}5\omega_0$. Она соответствует случаю зашунтированной ступени сопротивления противовключения. Характеристика *3n* формируется при плавном регулировании скорости подъема.

Характеристики *1c*, *2c*, *3c* и *4c* соответствуют установке джойстика в положение на спуск. Характеристика *1c* как и *1n* – характеристика близкая к естественной, но при работе на спуск. На эту характеристику двигатель попадает только в случае, если электродвигатель имеет скорость в диапазоне от $\omega = -0{,}5\omega_0$ до $\omega = -\omega_0$. Характеристики *2c* и *3c* аналогичны и соответствуют включенной в цепь ротора ступени сопротивления проти-

вовключения. Характеристика *2с* во 2-м квадранте ограничивает тормозной момент режима торможения противовключением электродвигателя, продолжающего еще вращаться в направлении подъема при снижении скорости. В 3-м квадранте она ограничивает максимальное значение момента при плавном регулировании скорости спуска легкого груза в диапазоне от $\omega = 0$ до $\omega = -0{,}5\omega_0$.

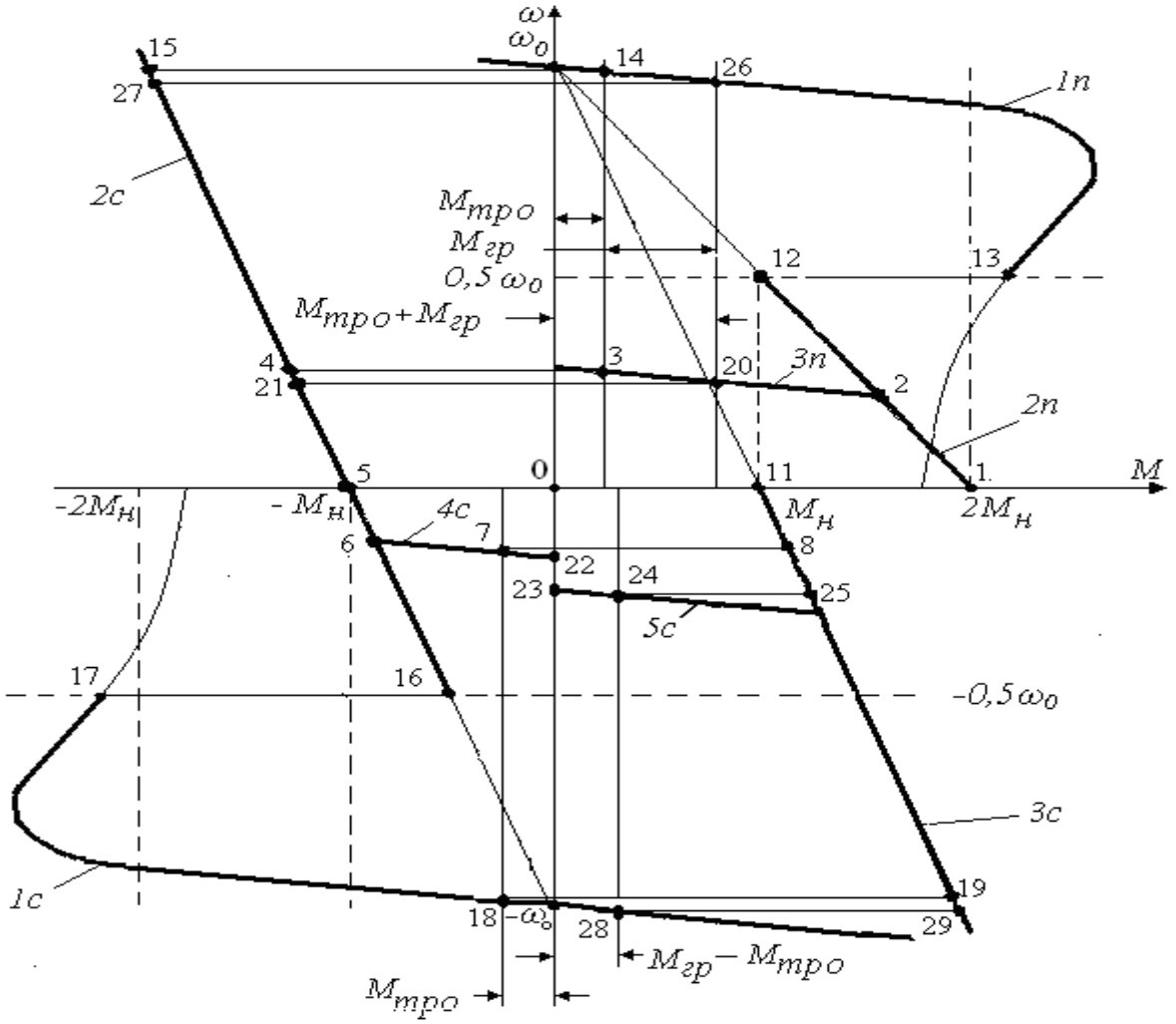


Рис. 2. Механические характеристики,
отражающие режимы работы привода при спуске/подъеме груза

Выделенная часть характеристики *3с* соответствует случаю, когда устройство задания скорости дает задание на спуск, а микроконтроллерная система управления определила, что груз тяжелый, и статорную цепь электродвигателя переключила на подъем. Характеристика *4с* формируется при плавном регулировании скорости спуска.

На рис. 2 представлены переходы с характеристики на характеристику при изменении задания скорости подъема и спуска груза. Рассмотрим

вначале работу с легким грузом, момент которого на спуск пренебрежимо мал по сравнению с моментом трогания механизма $M_{тро}$. Рассмотрены два случая изменения режимов работы.

В первом случае вначале дается ступенчатое задание скорости для работы на характеристике *3п*. При ω = 0 происходит создание пускового момента (точка 1) и двигатель разгоняется по характеристике *2п* до точки 2. Потом продолжается разгон по характеристике *3п* до точки 3, в которой момент двигателя $M = M_{тро}$ и разгон двигателя прекращается. Затем ступенчато изменим задание скорости на спуск груза со скоростью на характеристике *4с*. Переключается контактор статора на спуск и из точки 3 происходит переход в точку 4 на характеристике *2с*. Происходит торможение электродвигателя противовключением до точки 5, в которой изменяется направление вращения электродвигателя и по той же характеристике скорость спуска растет до точки 6, с которой происходит переход по характеристике *4с* до точки 7, в которой $M= M_{тро}$. В этой точке привод работает в двигательном режиме. Наконец, опять ступенчато задание скорости изменяется для подъема на характеристике *3п*. Происходит переход от характеристики к характеристике по точкам 7–8–11–1–2–3.

Во втором случае рассмотрен подъем и спуск легкого груза на максимальной скорости. При ступенчатом задании максимальной скорости подъема происходит переход от характеристики к характеристике по точкам 1–12–13–14, в которой $M= M_{тро}$. Если при работе в точке 14 ступенчато задать максимальную скорость спуска, то переход от характеристики к характеристике происходит по точкам 14–15–16–17–18. Спуск происходит в двигательном режиме в точке 18. Если затем вновь ступенчато дать задание на подъем с максимальной скоростью, то переход от характеристики к характеристике происходит по точкам 18–19–11–1–12–13–14. Таким образом, если груз легкий и не преодолевает при спуске момента трения, то никаких проблем со спуском и подъемом не возникает.

Проблемы возникают при спуске тяжелого груза, так как он осуществляется при включении статорной цепи электродвигателя на подъем. Пусть момент создаваемый грузом $M_{гр}$ превышает момент трения трогания $M_{тро}$. Дополнительно введена характеристика *5с,* используемая для тормозного спуска такого груза в режиме торможения противовключением двигателя.

Ниже рассматриваются при спуске тяжелого груза те же режимы, как и при спуске легкого груза.

Вначале дается ступенчатое задание скорости для работы на характеристике *3п*. Происходит создание пускового момента (точка 1) и двигатель разгоняется по характеристике *2п* до точки 2. Потом продолжается разгон по характеристике *3п* до точки 20, в которой момент двигателя $M = M_{тро} + M_{гр}$ и разгон двигателя прекращается. Пусть затем ступенчато изменяется задание скорости на спуск груза со скоростью на характеристике *4с*. Пере-

ключается контактор статора на спуск и из точки 20 происходит переход в точку 21 на характеристике *2с*. Происходит торможение двигателя противовключением до точки 5, в которой изменяется направление вращения двигателя и по той же характеристике скорость спуска растет до точки 6, с которой происходит переход по характеристике *4с* до точки 22. В точке 22 момент двигателя равен нулю и груз под действием своего веса разгоняется. Скорость спуска становится больше заданной. Микропроцессорная система управления по данным напряжения $U_{ОС}$ контролирует скорость спуска и при определенном значении превышения заданной скорости в точке 23 дает команду на переключение статорной цепи на подъем и задает задание на тормозной спуск по характеристике *5с*. В точке 24 момент двигателя $M= M_{гр}–M_{тро}$ и происходит спуск груза с установившейся скоростью. Наконец, пусть опять ступенчато задание скорости изменяется для подъема на характеристике *3п*. Происходит переход от характеристики к характеристике по точкам 24–25–11–1–2–20.

Рассмотрим случай, когда необходимо подъем и спуск тяжелого груза производить на максимальной скорости. При ступенчатом задании максимальной скорости подъема происходит переход от характеристики к характеристике по точкам 1–12–13–26. Если при работе в точке 26 ступенчато задать максимальную скорость спуска, то переход от характеристики к характеристике происходит по точкам 26–27–16–17–28. Двигатель будет работать в точке 28 в режиме рекуперативного торможения. Если затем вновь ступенчато дать задание на подъем с максимальной скоростью, то переход от характеристики к характеристике происходит по точкам 28–29–11–1–12–13–26.

Предложенный алгоритм работы автоматического перехода из силового режима спуска в тормозной и обратно экспериментально проверен на стенде ООО «ЧелПривод» и получен положительный результат. Предстоит его проверка на очередном монтируемом кране.

Библиографический список

1. Патент РФ № 2202850. Способ управления асинхронным двигателем с фазным ротором / А.М. Борисов, А.А. Васькин, О.Ю. Долгодворова, Г.И. Драчев, В.И. Ильинов, А.С. Калинин, С.П. Лохов, Н.Е. Лях. – № 99113396; заявл. 25.06.99; опубл. 20.04.03.

2. Патент на полезную модель № 130763 Устройство управления спускоподъемными режимами работы подъемных механизмов / Н.Е. Лях, М.Ф. Фрик, А.М. Борисов, Г.И.; опубл. 27.07.13, Бюл. 21.

К содержанию

УДК 621.65:62-83 + 62-83:681.515

МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ВОДЯНЫХ НАСОСОВ НА ОСНОВЕ МНОГОЗОННОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО РЕГУЛЯТОРА

О.Г. Брылина

Рассматривается модель системы водоснабжения с параллельноработающими каналами регулирования, выполненная на базе многозонного развертывающего преобразователя.Приведены структуры всех блоков, входящие в ее состав и показаны основные диаграммы, поясняющие их работу.

Ключевые слова: многозонный развертывающий преобразователь, диагностирование, резервирование, моделирование.

Как показали исследования, проведенные на кафедре электроприводаФГБОУ ВПО «ЮУрГУ» (НИУ), сравнительно новый класс информационно-измерительных устройств – многозонные развертывающие преобразователи (МРП)является весьма перспективным для комплексного решения задач в области повышения помехоустойчивости, ремонтопригодности и автоматического резервирования каналов передачи информации.

Структурная схема системы водоснабжения с накопительным резервуаром, в которой система управления выполнена на базе МРП, показана на рис. 1.

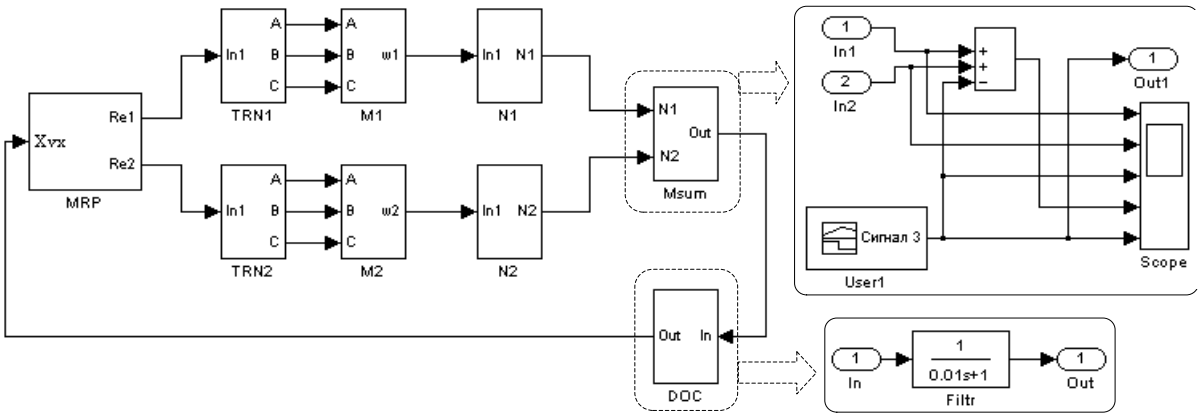


Рис. 1. Модель системы управления электроприводами с параллельными каналами регулирования на основе многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя

В ее состав входят непосредственно МРП (MRP) (подробно показан на рис. 2) структура которого соответствует базовой с нечетным числом РЭ, а также два идентичных канала состоящих из асинхронного двигателя с

короткозамкнутым ротором (M) (рис. 3), управляемого от тиристорного регулятора напряжения (TRN) (рис. 4), и насоса (N) (рис. 5). Каналы TRN – M – N работают на общую магистраль (Msum) (рис. 6).

Модель короткозамкнутого асинхронного двигателя соответствует библиотеке SimPowerSystems математического пакета Simulink. Исходные параметры моделирования ТРН для плавного пуска АД соответствуют приведённым в таблице. Примем, что в электроприводе отсутствует передача.

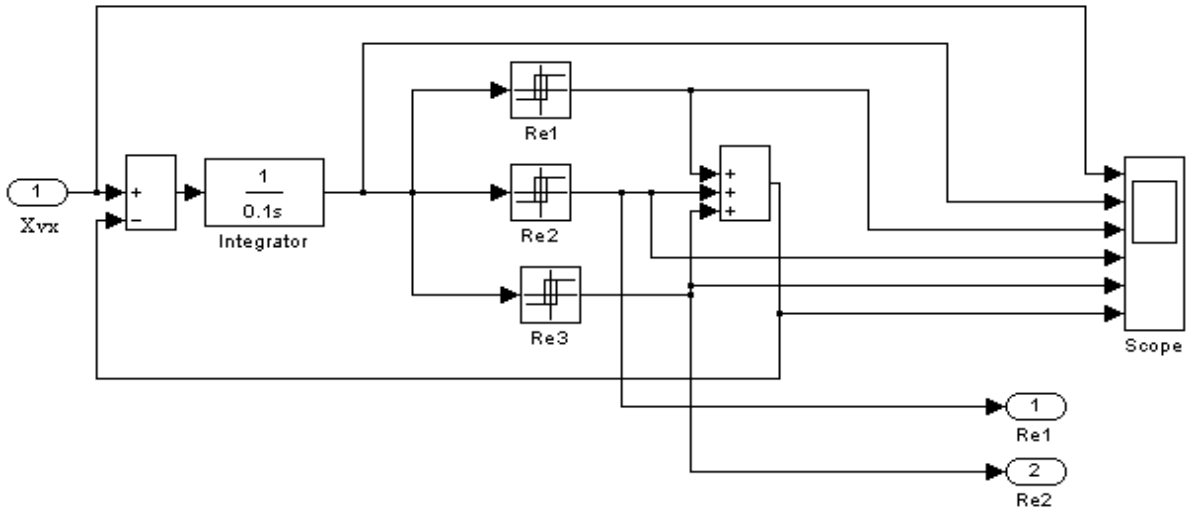


Рис. 2. Модель многозонного интегрирующего развертывающего преобразователя ($T_{\text{И}} = 0{,}1\text{с}$; $\bar{b}_1 = 0{,}1; \bar{b}_2 = 0{,}2$; $\bar{b}_3 = 0{,}3$)

Таблица

Исходные параметры короткозамкнутого асинхронного электродвигателя

$P_{\text{Н}}$, кВт	$U_{\text{Н}}$, В	$f_{\text{Н}}$, Гц	$s_{\text{Н}}$	J, кг·м^2	Число пар полюсов
3	380	50	0,053	0,058	
R_S, Ом	L_S, мГн	R_r, Ом	L_r, мГн	L_m, мГн	$2p = 4$
3,28	3,9	1,167	3,9	167,1	

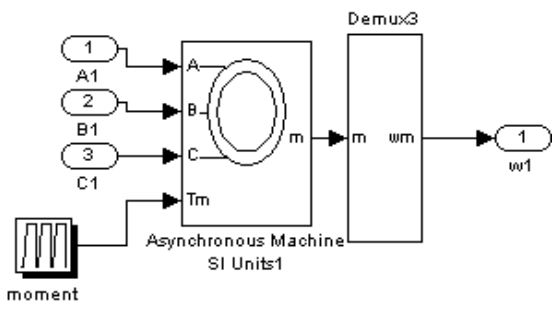


Рис. 3. Модель асинхронного электродвигателя и его параметры

Работа насоса описывается зависимостью $H = k_{\text{Н}} \cdot n^2$, где $k_{\text{Н}}$ – коэффициент, учитывающий характеристики турбосистемы (для упрощения расчетов $k_{\text{Н}} = 1$), n – частота вращения электродвигателя двигателя. Напор (H) измеряется в относительных единицах, поэтому на вы-

ходе магистрали $\overline{H} = H / H\max$, где $H\max = k_{\text{Н}} \cdot n_{\max}^2$ (см. рис. 5), где $H\max$ – максимальный напор в магистрали; $n_{\max}$ – максимальная частота вращения электродвигателя.

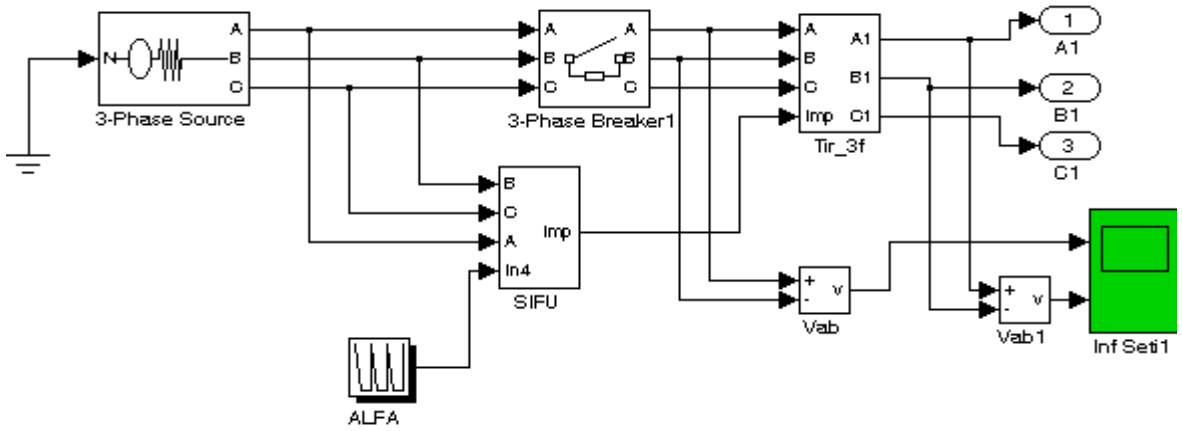


Рис. 4. Структурная схема модели тиристорного регулятора напряжения

Тиристорный регулятор напряжения (см. рис. 4, а) состоит из источника трехфазного напряжения (3-PhaseSource), системы импульсно-фазового управления (SIFU) и силового блока тиристоров (Tir_3f). SIFU выполнена по синхронной трехканальной схеме (см. рис. 5) и включает в себя устройство синхронизации для каждой фазы, генератор развертывающей функции (роль которого выполняет интегратор с периодической установкой нулевых начальных условий), ключевой (релейный) элемент, формирователь и распределитель импульсов. Блок силовых тиристоров (Tir_3f) (см. рис. 6) реализован по схеме «тиристор-тиристор».

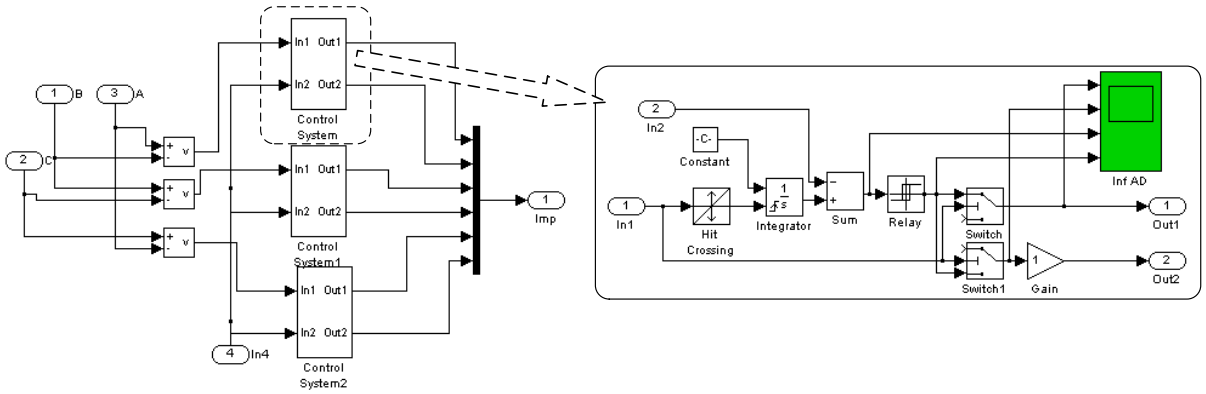


Рис. 5 Структурная схема модели системы импульсно-фазового управления тиристорами ТРН

Общая магистраль (Msum) представляет собой накопительный резервуар (см. рис. 1), где складываются выходные координаты насосов (N1+N2) и вычитается сигнал, характеризующий водоразбор потребителей с учетом времени суток (User) (рис. 7).

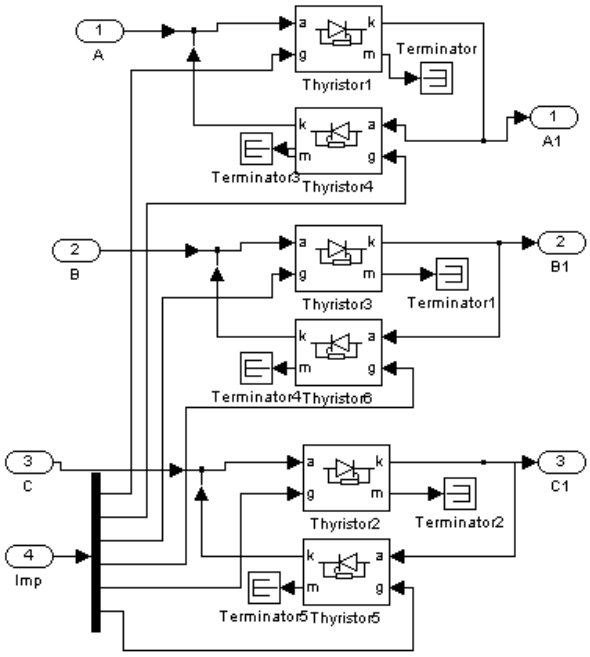


Рис. 6. Модель блока силовых тиристоров

Сигнал, пропорциональный уровню потребления воды в жилищно-коммунальном хозяйстве в течение суток (см. рис. 7), подается на вход МРП через датчик обратной связи (DOC). Под его действием МРП переходит из одной модуляционной зоны в другую (рис. 8, е), осуществляя тем самым включение/выключение соответствующих насосов. В частности, выходной сигнал РЭ2 равный $Y_{\text{Р2}} = A/3$ – соответствует логической «1» – разрешая «Пуск» N1, а $Y_{\text{Р2}} = -A/3$ – логическому «0», обеспечивая торможение М1 и вывод из работы N1.

Датчик обратной связи (DOC) (см. рис. 1) представлен в виде фильтра первого порядка с постоянной времени $T_{\Phi} = 0{,}01\text{с}$ (см. рис. 1).

Выходной сигнал РЭ3 характеризует работу канала TRN2 – M2 – N2 аналогичным образом.

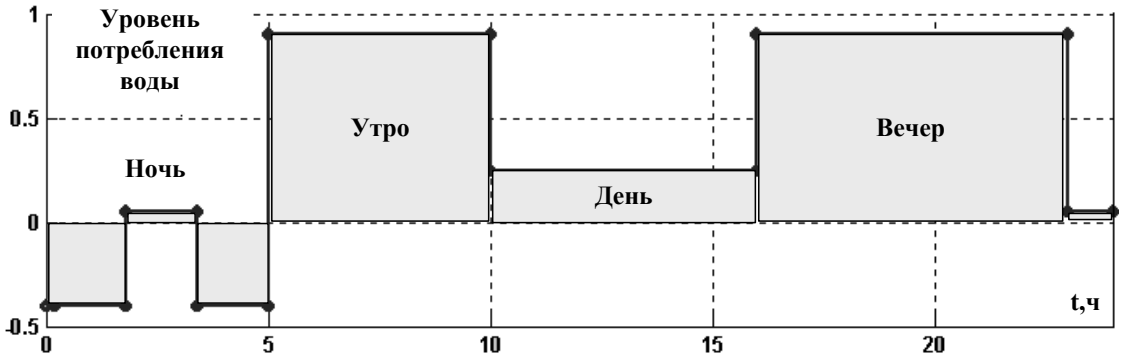


Рис. 7. График потребления воды в ЖКХ в течение суток

В утренние часы максимального водоразбора (см. рис. 8, $t = 5 - 10$ ч) для поддержания заданного давления в магистрали необходимо одновременное включение 2 насосов, поэтому МРП работает во 2-й модуляционной зоне ($\overline{X}_{\text{ВХ}} = 0{,}9$).

Затем, днем (см. рис. 8, $t = 10 - 16$ ч) потребление воды снижается, и МРП переходит в младшую модуляционную зону ($\overline{X}_{\text{ВХ}} = 0{,}25$).

Вечером повторяется аналогичная ситуация, что была утром (см. рис. 8, $t = 16 - 23$ч), поэтому МРП работает во второй модуляционной зоне.

И, наконец, ночью (см. рис. 8, $t = 0 - 5$ч и $t = 23 - 24$ч), когда потребление воды меньше, чем днем, один из насосов постоянно выключен, а другой работает в режиме «включен/выключен» (см. рис. 8). МРП при этом переходит из зоны «–2МЗ» в модуляционную зону «1МЗ».

На рис. 9 показана работа насосов N1, N2 (см. рис. 9, в, г) при переходе МРП во вторую модуляционную зону (см. рис. 9, а, б).

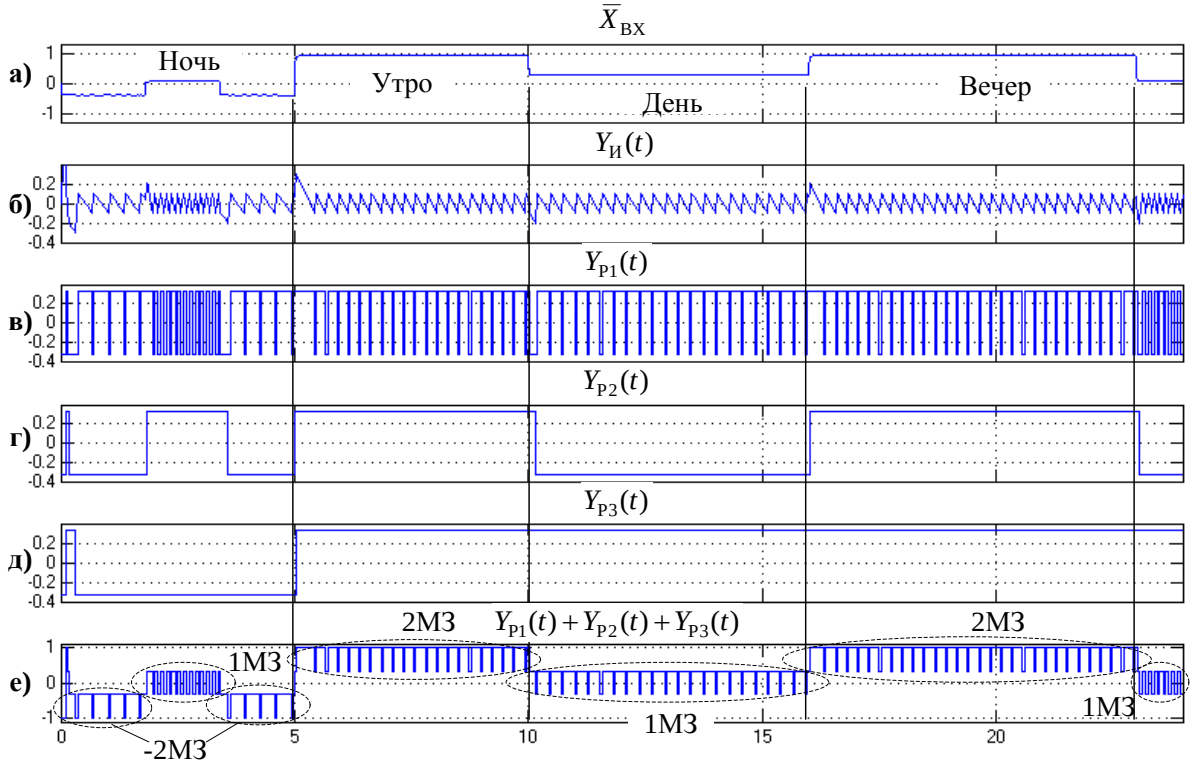


Рис. 8. Временные диаграммы работы МРП в дискретном режиме

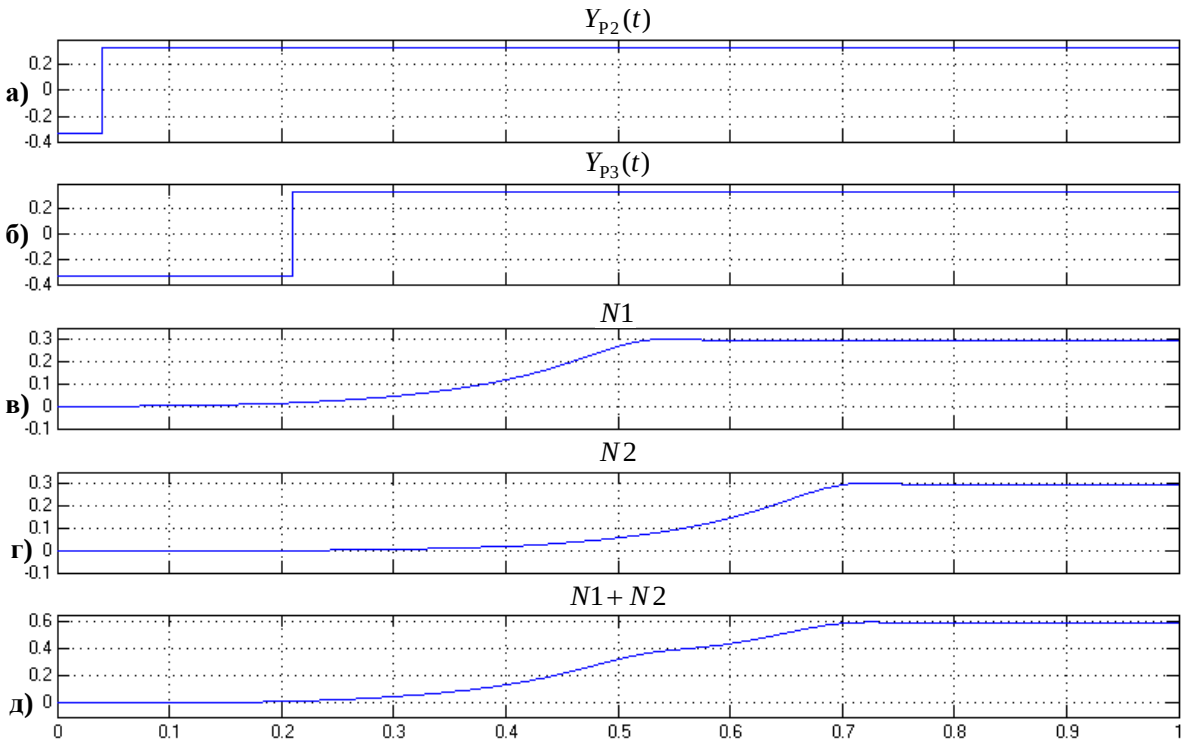


Рис. 9. Временные диаграммы работы насосов в дискретном режиме

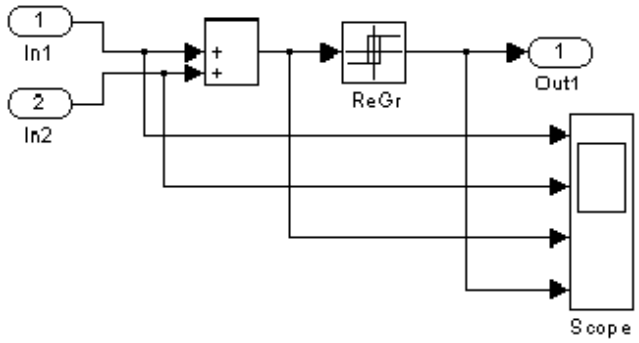


Рис. 10. Модель накопительного резервуара

Дополнительно для поддержания заданного давления в системах водоснабженияможет быть предусмотрен накопительный резервуар. Система управления для поддержания уровня воды в накопительном резервуаре реализована в соответствии со структурой исполнительного органа, показанной на рис. 10. В данной системе выходные сигналы насосов $N1$ и $N2$ поступают на сумматор, а затем на релейный элемент (датчик уровня воды) ReGr, пороги переключения которого соответствуют граничным областям регулирования (рис. 11, а). Выходной сигнал релейного элемента ReGr, равный $\overline{Y}_{\mathrm{ReGr}} = Y_{\mathrm{ReGr}} / A$, является сигналом задания для МРП.

Если при включении системы управления уровень воды в накопительном резервуаре ниже минимального значения, то МРП ориентируется таким образом, чтобы ввести в работу оба насоса $N1$ и $N2$ (см. рис. 11, а $t = 0 - 1\mathrm{c}$). Затем, при достижении суммарным сигналом $N1+N2$ верхне-

го граничного уровня воды (см. max на рис. 11, а), релейный элемент RelGr переключается в состояние $\bar{Y}_{\text{ReGr}} = 0{,}2$ (см. рис. 11, б), осуществляя перевод МРП в первую модуляционную зону (см. рис. 11, ж). Под действием выходного сигнала РЭ2 $\bar{Y}_{\text{P2}} = -A/3$ двигатель М1 и соответствующий ему насос Н1 выключаются (см. рис. 11, $t = 1-2\text{с}$).

В случае снижения уровня воды в накопительном резервуаре до нижней границы (см. min на рис. 11, а) релейный элемент ReGr переключается в состояние $\bar{Y}_{\text{ReGr}} = 0{,}4$ (см. рис. 11, б), и насос N1 вновь переводится в рабочее состояние на время, пока вода не достигнет верхней критической точки (см. рис. 11, $t = 2-3\text{с}$).

На рис. 12 показан режим адаптации МРП при выходе из строя одного из каналов регулирования, когда происходит катастрофический отказ какого-либо элемента данного канала управления. Предположим, защита сработала в канале 1. Тогда РЭ2 принудительно удерживается в выключенном состоянии, а переключение осуществляется РЭ3 (рис. 12, д).

Таким образом, неисправный канал 1 автоматически выводится из работы, а поддержание заданного уровня воды обеспечивается резервным, в данном случае, каналом 2.

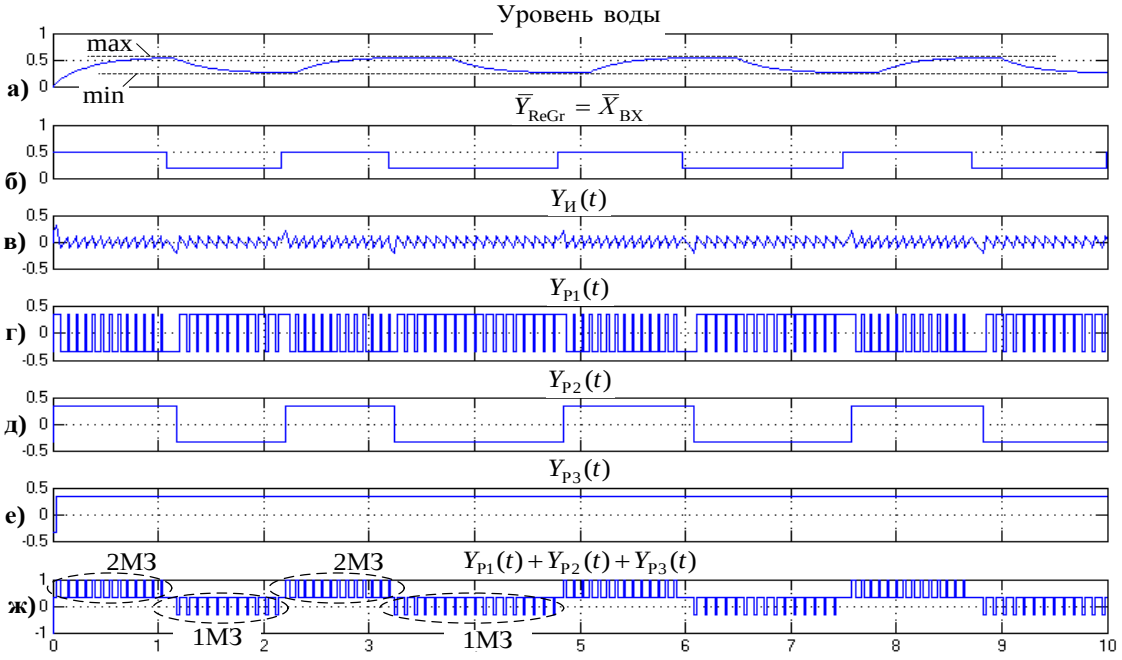


Рис. 11. Временные диаграммы работы МРП
в режиме поддержания заданного давления воды в магистрали

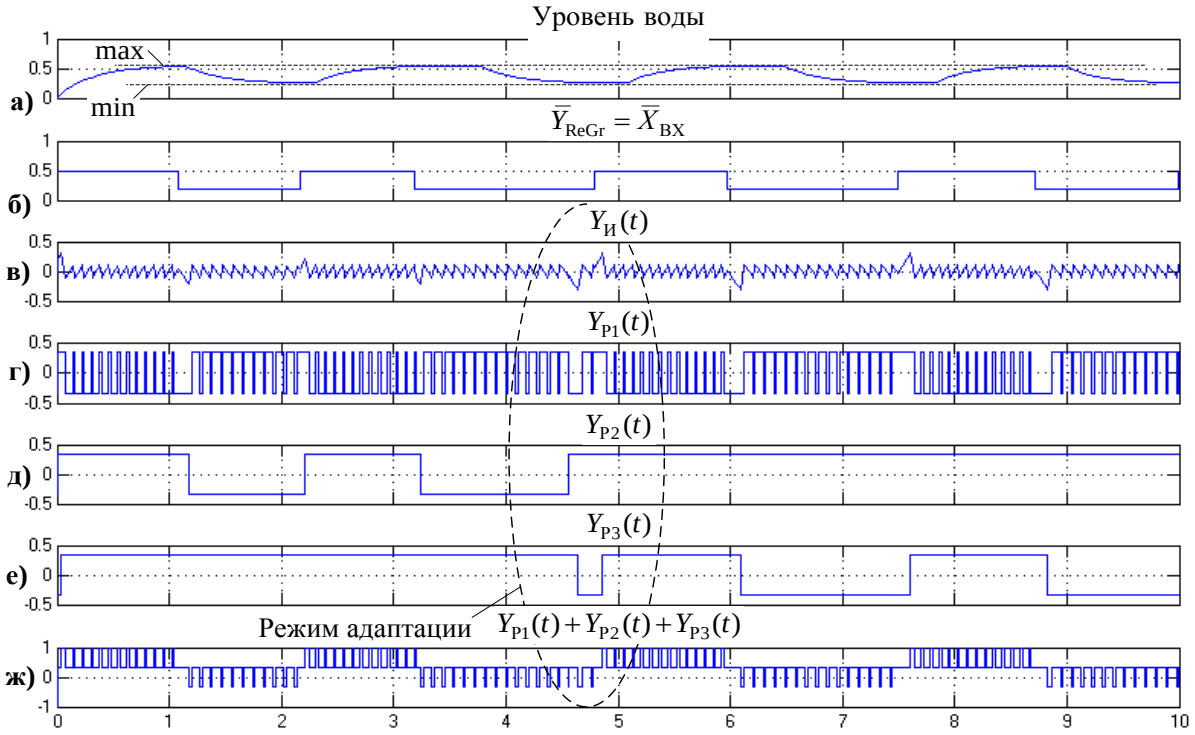


Рис. 12. Временные диаграммы работы МРП в режиме поддержания заданного давления воды в магистрали при отказе одного из каналов

Применение электроприводов с синхронными реактивными двигателями позволяет повысить надежность рассмотренных систем [1–6], и улучшить их энергетические показатели [7–13].

Библиографический список

1. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 46–51.

2. Григорьев, М.А. Система управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехника. – 2013 – № 10. – С. 29–35.

3. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47–51.

4. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 106–114.

5. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 111–117.

6. Grigorev, M.A. TheelectricDrivewithFieldRegulatedReluctanceMashine / M.A. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. –№ 1. – С. 118–123.

7. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 91–96.

8. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

9. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, С.П. Лохов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.

10. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.

11. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 40–45.

12. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

13. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

К содержанию

УДК 621.771.28:62-83

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЛЬГЕРСТАНА

А.Е. Бычков, С.Н. Золотушкин, И.М. Ефанова

В статье приводится анализ технологического процесса горячей прокатки труб. Дается описание процесса работы пилигримового стана (пильгерстана). Приводятся осциллограммы рабочего режима стана. Формулируются пути повышения технологических характеристик пильгерстана.

Ключевые слова:пилигримовый стан, горячая прокатка труб, электропривод прокатного стана.

В современное время одним из наиболее востребованных сортов труб, выпускаемых трубопрокатной промышленностью, являются бесшовные трубы. Этот тип труб характеризуется высокой надежностью и прочностью, при доступной цене [1–4]. Большинство бесшовных труб в настоящее время получают с помощью прокатки на пилигримовых станах [5–7].

Технологический процесс на установках с пилигримовым станом следующий. Нагретый до 1200–1220 °С в методической печи слиток транспортируется на прошивную валковую клеть с диаметром валков 450–1000 мм. Обычно один прошивной стан обслуживает два пилигримовых стана.На пилигримовом (периодическом) стане в гильзу вводится оправка (дорн); затем гильза вместе с оправкой подается в валки диаметром 600–1000 мм (в зависимости от диаметров прокатываемых труб). Частота вращения валков 40–90 об/мин.

Направление прокатки и вращения валков противоположно направлению подачи гильзы в валки, в связи с чем, каждый цикл разделяется на два периода: рабочий ход (собственно прокатку металла валками) и холостой обратный ход металла (благодаря действию подающего аппарата). За каждый оборот валков гильза подвергается обжатию между дорном и калибром на длине подачи, которая обычно не превышает 30 мм.

Валки при вращении образуют круглый калибр с переменными высотой и шириной. Форма ручья валка пилигримового стана показана на рис. 1. По периметру валка ручей делится на две части: рабочую, осуществляющую прокатку, ограниченную центральным углом θ; холостую часть (зев), не контактирующую с металлом.

Рабочая часть ручья включает три участка: боек, имеющий переменный радиус по вершине калибра, нарастающий от R_0 до Rп; полирующий (калибрующий) участок, на котором производится окончательное формирование размеров черновой трубы, имеющий постоянные радиус и высоту калибра; продольный выпуск с плавным уменьшением радиуса валка, благодаря чему происходит постепенный отрыв трубы от валка. На рис. 1 показана схема прокатки и обозначены элементы.

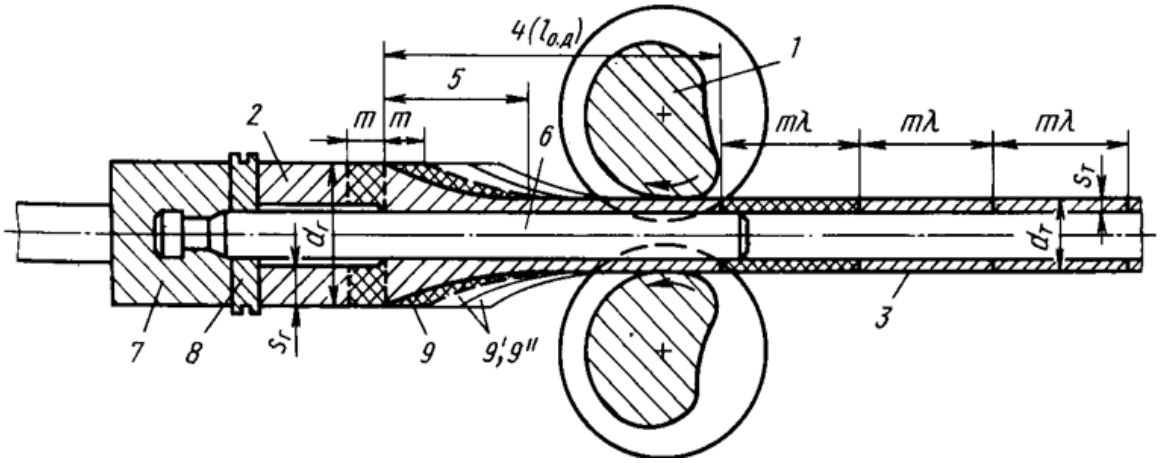


Рис. 1. Схема прокатки в пилигримовом стане: 1 – валок; 2 – гильза; 3 – труба; 4 – очаг деформации (рабочий конус); 5 – пильгерголовка; 6 – оправка (дорн); 7 – замок оправки и шток подающего аппарата; 8 – кольцо для упора гильзы при прокатке и удержания ее при извлечении оправки; 9, 9', 9'' – смещенный объем металла, в данном цикле (равный объему подачи)

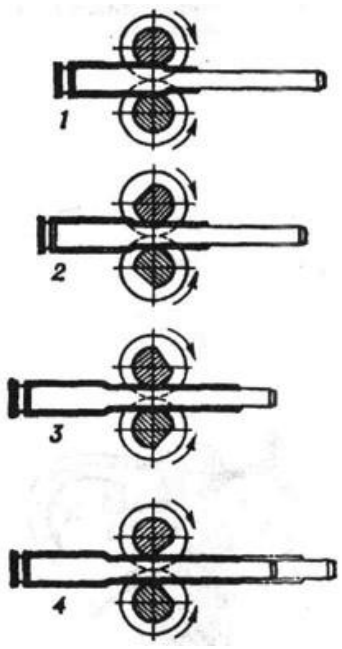


Рис. 2. Процесс прокатки на пилигримовом стане: 1 – рабочий участок калибра; 2 – полирующий (калибрующий) участок калибра; 3 – выходной участок; 4 – участок поворота гильзы и подачи ее в валок

Процесс прокатки на пилигримовом стане следующий (см. рис. 2). В положении 1 валки рабочими поверхностями начинают подвергать обжатию гильзу на длине подачи, при этом оправка вместе с гильзой смещается назад (положение 2). На первом участке происходит деформация гильзы с переходом ее в трубу, на втором – сглаживание неровностей на поверхности трубы и получение окончательных размеров диаметра и толщины стенки; на третьем – поворот гильзы с оправкой (дорном) и подача ее в валки.

Подвергаемый обжатию между калибром и дорном металл в виде готовой трубы сдвигается с оправки (дорна) в противоположном направлении. Затем происходит сглаживание поверхности участка сформованной трубы (положения 3), после чего она выходит из соприкосновения с валками, так как увеличивается ширина и высота калибра. В этот отрезок времени (положение 4) оправка с гильзой подается при помощи специального устройства вперед, поворачиваясь на 90° вокруг продольной оси для обеспечения равномерного обжатия по всей окружности. Вращение

валков стана и движение оправки с гильзой синхронизированы. Раскатка гильзы в готовую трубу происходит за несколько минут, суммарная вытяжка при этом составляет 8–12.

Такая значительная вытяжка объясняется обжатиями за каждый оборот валков сравнительно небольшого участка гильзы, равного величине подачи. Число подач при раскатке зависит от ряда факторов и составляет обычно 120–180.

Если трубы не подвергаются калибровке, тогда они проходят правку в горячем состоянии на правильном стане, имеющем два наклонных гиперболоидных валка. Дальнейшие операции сводятся к обрези концов труб, разрезке труб на длины, нарезке резьбы на концах труб, навинчиванию муфт, гидравлическим испытаниям и т. д.

Среди многообразия современных систем электроприводов, электроприводы пилигримового стана выполнены по классической структуре с электродвигателями постоянного тока, для примера на рис. 3 показаны осциллограммы работы главного привода пильгерстана.

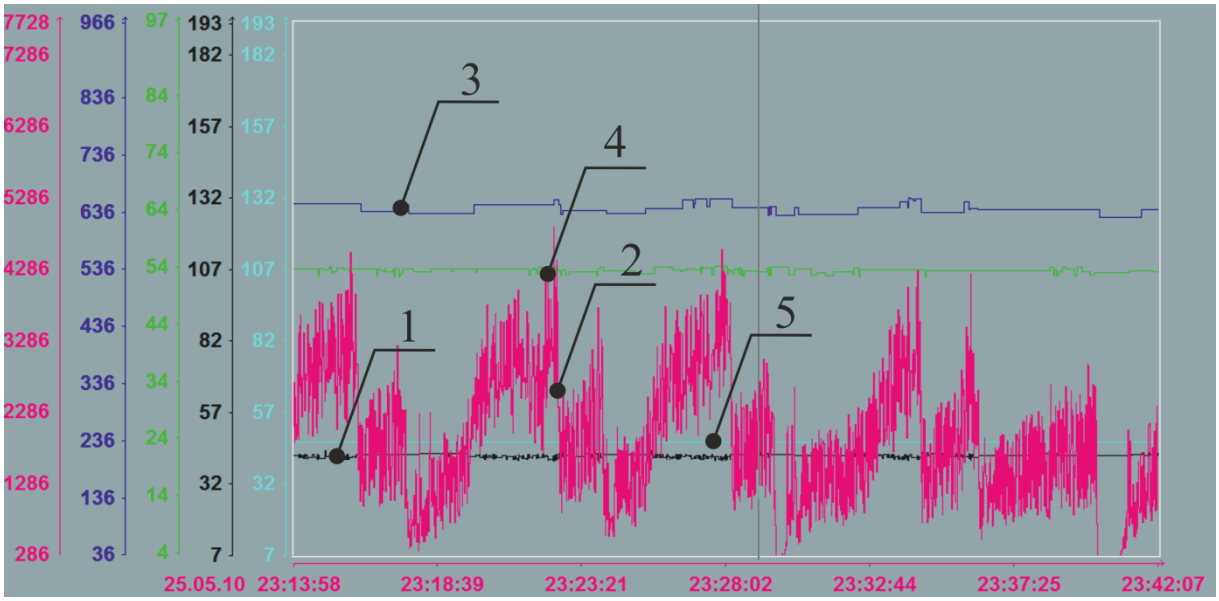


Рис. 3. Осциллограммы координат пилигримового стана: 1 – скорость, 2 – ток якоря, 3 – напряжение на якоре, 4 – ток возбуждения, 5 – задание скорости

В настоящее время ситуация меняется. Современные системы с электроприводами переменного тока не только достигли показателей регулирования уровня электроприводов постоянного тока, но также превзошли их за счет современных замкнутых систем с регулируемыми вентильными преобразователями и микропроцессорным управлением.

Помимо этого, за счет своей бесконтактности и высоким удельным показателям электропривод переменного тока может реализовывать высокодинамичные перегрузки, возникающие при обжатии и позиционировании

заготовок при их обработке на пилигримовом стане. Среди разработок в данной области можно выделить электроприводы с синхронными машинами традиционной [8–13] и нетрадиционной конструкции [14–16]. Анализ регулировочных и массогабаритных показателей таких электроприводов, позволяют сделать вывод, что именно у электроприводов данного класса наиболее высокие перспективы сменить электропривод постоянного тока в станах горячей прокатки.

Библиографический список

1. Цытович, Л.И. Частотно-широтно-импульсный терморегулятор сушильной камеры с непрерывным тестированием сопротивления изоляции электротехнического изделия / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2011. – № 34 (251). – С. 50–55.

2. Tsytovich, L.I. About the dynamics of some methods of integrating conversion of analog signal into digital code / L.I. Tsytovich, M.M. Dudkin, S.P. Lokhov, O.G. Brylina // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 80–91.

3. Цытович, Л.И. Интегрирующий аналого-цифровой датчик нулевого тока / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, В.П. Мацин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 93–96.

4. Цытович, Л.И.Многозонные интегрирующие системы управления каскадами «вентильный преобразователь исполнительный механизм» для объектов с параллельными каналами регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 36. – С. 23–30.

5. Цытович, Л.И. Многозонный частотно-широтно-импульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Патент на изобретение RUS 2408969 23.12.2009.

6. Цытович, Л.И. Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 53–61.

7. Цытович, Л.И. Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Патент на изобретение RUS 2320071 09.10.2006.

8. Цытович, Л.И. Многозонный частотно-широтно-импульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Патент на изобретение RUS 2408969 23.12.2009.

9. Цытович, Л.И. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.Ю. Мыльников, В.А. Тюгаев, А.В. Тюгаев // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 24–28.

10. Дудкин, М.М. Частотно-широтноимпульсный адаптивный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления / М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 45–52.

11. Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 5–18.

12. Лохов, С.П. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравновешиванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 97–106.

13. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 2. – С. 19.

14. Дудкин, М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 38. – С. 25–32.

15. Гельман, М.В. Комплексный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2007. – № 12 (84). – С. 19–24.

16. Брылина, О.Г. Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широтно-импульсной модуляцией / О.Г. Брылина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 70–79.

К содержанию

УДК 621.314 + 681.51.01

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРИРУЮЩИХ РАЗВЕРТЫВАЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМИ ЗАКОНАМИ МОДУЛЯЦИИ

М.М. Дудкин

Рассмотрены принципы построения и временные диаграммы сигналов интегрирующих развертывающих преобразователей (РП) с широтно-импульсной и частотно-широтно-импульсной законами модуляции для систем управления вентильными преобразователями (ВП). На основе полученных трансцендентных уравнений и их решения на ЭВМ дан анализ их динамических характеристик при воздействии гармонического сигнала помехи в широком частотном диапазоне. Показано, что интегрирующие РП являются эффективным средством повышения помехоустойчивости систем управления ВП.

Ключевые слова: интегрирующий развертывающий преобразователь, законы модуляции, помехоустойчивость, вентильный преобразователь.

В настоящее время для управления силовыми вентильными преобразователями применяются развертывающие преобразователи с выборкой мгновенных значений сигнала управления, которые обладают низкой помехоустойчивостью к сигналам внешних помех со стороны информационного входа [1–3], что неизбежно снижает уровень эксплуатационной надежности ВП. Указанного недостатка лишены интегрирующие развертывающие преобразователи.

Интегрирующий РП с широтно-импульсной модуляцией, например, первого рода (ШИМ-1) [4–6] представляет собой автоколебательную систему, состоящую из сумматора Σ, интегратора И и релейного элемента РЭ, а также генератора пилообразного напряжения ГПН, выполняющего роль источника внешней синхронизации (табл. 1, рис. 1). Сигнал $Y_{И2}(t)$ формируется как результат предварительного интегрирования суммы или разности выходного сигнала $Y(t)$ с входным воздействием $X_{ВХ}$ (табл. 1, рис. 2). Коэффициент заполнения импульсов на выходе системы изменяется линейно с входным воздействием $\gamma = t^{*}_{2n-1}/T_0 = 0{,}5(1+\overline{X}_{ВХ})$.

Интегрирующий РП с частотно-широтно-импульсной модуляцией (ЧШИМ) [7, 8] также представляет замкнутую автоколебательную систему, состоящую из сумматора Σ, интегратора И и релейного элемента РЭ (табл. 2, рис. 1). Коэффициент заполнения импульсов на выходе системы определяется также как и для интегрирующего РП с ШИМ-1, а частота уменьшается по квадратичной зависимости с ростом входного сигнала $\bar{f} = 1 - \overline{X}^2_{ВХ}$.

Таблица 1

Динамические характеристики интегрирующего РП с ШИМ-1

Структурная схема интегрирующего РП с ШИМ-1

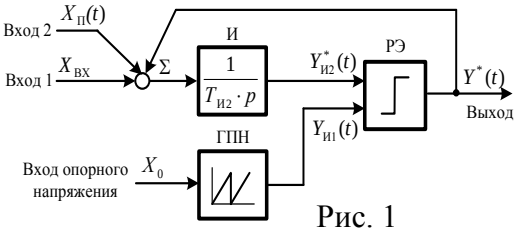


Рис. 1

Временные диаграммы сигналов

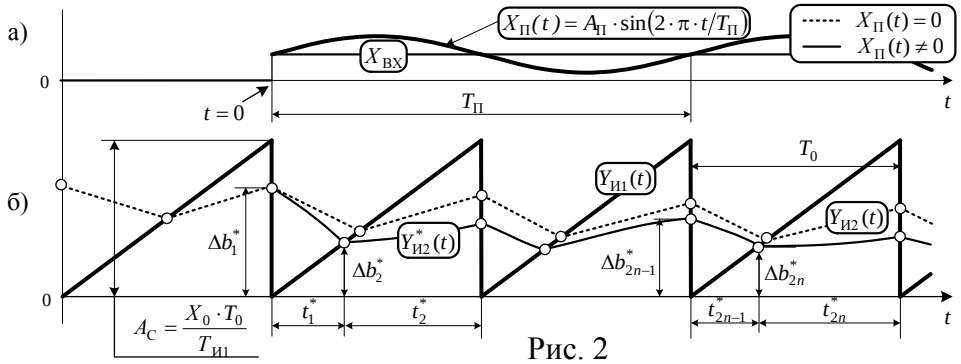


Рис. 2

Исходная система уравнений (1)

$$
\begin{cases}
t^*_{2n-1} = \dfrac{\overline{\Delta b^*_{2n-1}} \cdot T_{И2} - \dfrac{\overline{A}_{П} \cdot T_0}{\pi \cdot \overline{F}} \cdot \sin\left(\pi \cdot \overline{F} \cdot \left\langle 2(n-1) + \dfrac{t^*_{2n-1}}{T_0} \right\rangle\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \overline{F} \cdot \dfrac{t^*_{2n-1}}{T_0}\right)}{1 + \overline{X}_{ВХ} + \overline{T}_{И2}}; \\
t^*_{2n} = T_0 - t^*_{2n-1};\ \overline{\Delta b^*_1} = 0{,}5 \cdot T_0 \cdot (1 + \overline{T}_{И2}) / T_{И2};\ \overline{\Delta b^*_{2n}} = t^*_{2n-1} / T_{И1};\ \overline{X}_{ВХ} = |X_{ВХ} / A|;\ \ \overline{A}_{П} = |A_{П} / A|; \\
\Delta\bar{\gamma}_1[n] = \left|1 - t^*_{2n-1} / t_{(2n-1)|\overline{A}_{П}=0}\right|;\ n = 1,2,3,\ldots;\ \overline{F} = T_0 / T_{П};\ \overline{\Delta b^*_i} = |\Delta b^*_i / A;|;\ \overline{T}_{И2} = T_{И2} / T_{И1}; \\
\overline{\Delta b^*_{2n-1}} = \overline{\Delta b^*_{2(n-1)}} + \dfrac{1}{T_{И2}} \cdot \left[(1 - \overline{X}_{ВХ}) \cdot t^*_{2n-2} - \dfrac{\overline{A}_{П} \cdot T_0}{\pi \cdot \overline{F}} \cdot \sin\left(\pi \cdot \overline{F} \cdot \left\langle 2n - 2 - \dfrac{t^*_{2n-2}}{T_0} \right\rangle\right) \cdot \sin\left(\pi \cdot \overline{F} \cdot \dfrac{t^*_{2n-2}}{T_0}\right) \right].
\end{cases}
\tag{1}
$$

Пространства динамического состояния:

$\Delta\bar{\gamma}_1[1] = f(\overline{X}_{ВХ}, \overline{F}, \overline{A}_{П} = 0{,}1)$	$\Delta\bar{\gamma}_1[1] = f(\overline{T}_{И2}, \overline{F}, \overline{A}_{П} = 0{,}1)$

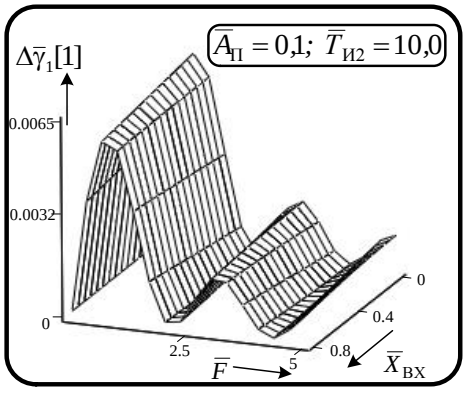
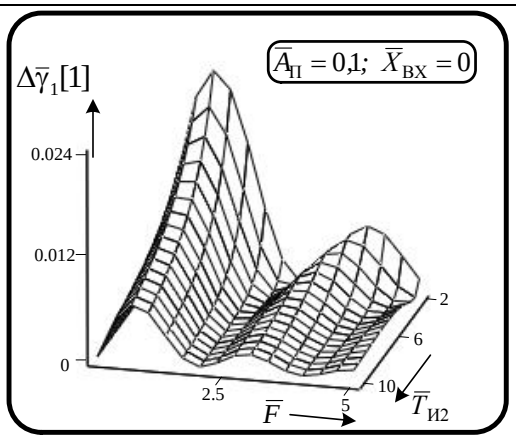

	

Рис. 3	Рис. 4

Таблица 2

Динамические характеристики интегрирующего РП с ЧШИМ

Структурная схема интегрирующего РП с ЧШИМ

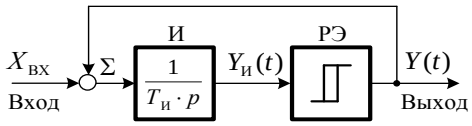


Рис.1

Временные диаграммы сигналов

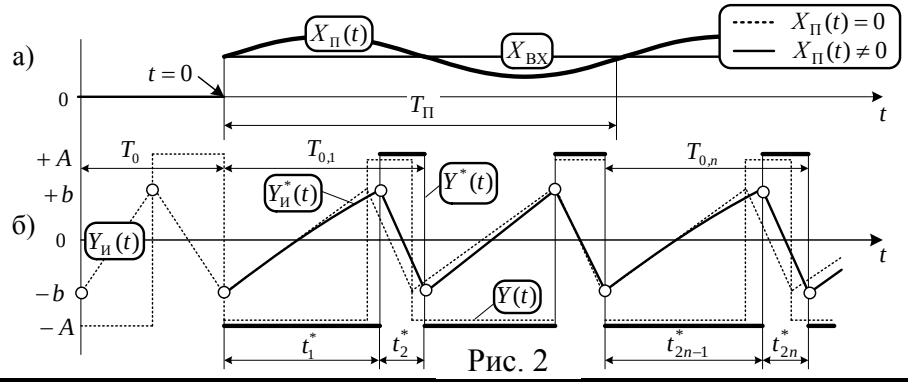


Рис. 2

Исходная система уравнений (1)

$$
\begin{cases}
t^*_{2n-1} = T_0 \cdot \left[0{,}5 + \dfrac{\overline{A}_{\text{П}}}{\pi \cdot \overline{F}} \cdot \sin\left(\dfrac{\pi \cdot \overline{F}}{T_0} \cdot \left\langle t^*_{2n-1} + 2 \cdot \sum\limits_{i=0}^{i=2n-2} t^*_i \right\rangle \right) \cdot \sin\left(\dfrac{\pi \cdot \overline{F}}{T_0} \cdot t^*_{2n-1} \right) \right] \Big/ \left(1 - \overline{X}_{\text{ВХ}}\right); \\
t^*_{2n} = T_0 \cdot \left[0{,}5 - \dfrac{\overline{A}_{\text{П}}}{\pi \cdot \overline{F}} \cdot \sin\left(\dfrac{\pi \cdot \overline{F}}{T_0} \cdot \left\langle t^*_{2n} + 2 \cdot \sum\limits_{i=0}^{i=2n-1} t^*_i \right\rangle \right) \cdot \sin\left(\dfrac{\pi \cdot \overline{F}}{T_0} \cdot t^*_{2n} \right) \right] \Big/ \left(1 + \overline{X}_{\text{ВХ}}\right); \\
\mathrm{T}^*_{0,\text{n}} = t^*_{2n-1} + t^*_{2n}; \gamma^*_n = t^*_{2n-1} / T^*_{0,n}; \ \overline{X}_{\text{ВХ}} = \left| X_{\text{ВХ}} / A \right|; \ \overline{A}_{\text{П}} = \left| A_{\text{П}} / A \right|; \ t^*_0 = 0; \\
\Delta\overline{\gamma}_2[n] = \left| 1 - \dfrac{\gamma^*_n}{\gamma^*_{n(\overline{A}_{\text{П}}=0)}} \right|; \ \overline{F} = T_0 / T_{\text{П}}; \ T_0 = 4 \cdot \overline{b} \cdot T_{\text{И}}; \ \overline{b} = |b/A|; \ n = 1,2,3,\ldots
\end{cases}
\qquad (1)
$$

Пространство динамического состояния $\Delta\overline{\gamma}_2[1] = f(\overline{X}_{\text{ВХ}}, \overline{F}, \overline{A}_{\text{П}} = 0{,}1)$

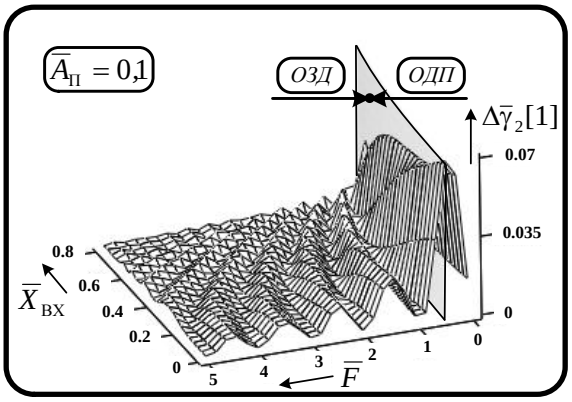
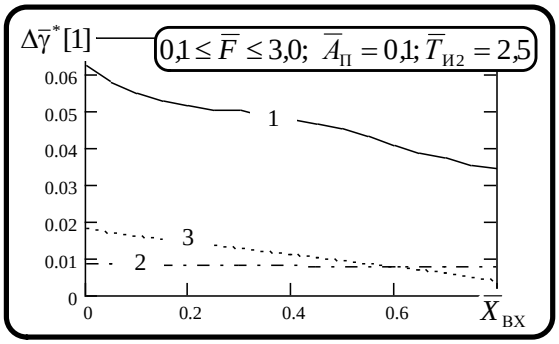


Рис. 3

Среднестатистическое отклонение $\Delta\overline{\gamma}^*[1] = f(\overline{X}_{\text{ВХ}})$



1 – РП с ШИМ-1 на основе выборки мгновенных значений;
2 – интегрирующий РП с ШИМ-1;
3 – интегрирующий РП сЧШИМ

Рис. 4

Особый интерес представляет поведение РП в области частот замедленной дискретизации (ОЗД), когда высокочастотный сигнал помехи преобразуется в низкочастотный [9–13], спектр которого находится в полосе рабочих частот системы управления. Это может явиться определяющим фактором не только ухудшения качества процесса регулирования, но и причиной отказов в работе всего технологического комплекса [14].

Анализ динамических характеристик интегрирующих РП с различными законами модуляции был проведем при воздействии на информационный вход гармонического сигнала помехи $X_{\text{П}}(t) = A_{\text{П}}\sin(2\pi t/T_{\text{П}})$ в широком частотном диапазоне и постоянной амплитуде $A_{\text{П}}$. На основе временных диаграмм сигналов РП (табл. 1–2, рис. 2), построенных с учетом гармонической составляющей $X_{\text{П}}(t)$, были получены системы уравнений (1), табл. 1–2, в которых приняты следующие обозначения: t^*_{2n-1}, t^*_{2n} – интервалы развертывающего преобразования с учетом динамической составляющей $X_{\text{П}}(t)$; $\Delta\bar{\gamma}[1]$ – нормированная динамическая ошибка коэффициента заполнения выходных импульсов модулятора для первого интервала дискретизации (n = 1); $\bar{A}_{\text{П}}$, $\bar{F} = T_0/T_{\text{П}}$ – нормированное значение амплитуды и частоты сигнала помехи $X_{\text{П}}(t)$ соответственно; $\bar{b} = |b/A|$ – нормированное значение порога переключения РЭ; $\bar{X}_{\text{ВХ}}$ – нормированное значение входного сигнала; n = 1, 2, 3 … – целые числа, соответствующие порядковому номеру интервала дискретизации $T_{0,n}$.

Решение систем уравнений (1), табл. 1–2 представлено в виде пространств динамических состояний объектов $\Delta\bar{\gamma}_{1..2}[1] = f(\bar{X}_{\text{ВХ}}, \bar{F}, \bar{A}_{\text{П}} = 0{,}1)$ (см. табл. 1–2, рис. 3), анализ которых позволяет сделать следующие выводы:

– частотная область «F» интегрирующих модуляторов, как и любой другой импульсной системы, делится на область достоверной передачи (ОДП) информации и область частот замедленной дискретизации, границей раздела которых является первый максимум пространств $\Delta\bar{\gamma}_1[1] = f(\bar{X}_{\text{ВХ}}, \bar{F})$ и $\Delta\bar{\gamma}_2[1] = f(\bar{X}_{\text{ВХ}}, \bar{F})$ (табл. 1–2, рис. 3). Причем для интегрирующего РП с ЧШИМ с ростом $\bar{X}_{\text{ВХ}}$ граница раздела ОДП и ОЗД смещается вправо по оси $\bar{F}$, т.к. уменьшается собственная частота несущих колебаний РП;

– в ОЗД с ростом нормированной частоты $\bar{F}$ сигнала помехи $X_{\text{П}}(t)$ ошибки $\Delta\bar{\gamma}_1[1]$ и $\Delta\bar{\gamma}_2[1]$ уменьшаются (см. табл. 1–2, рис. 3), что является признаком, присущим РП интегрирующего типа, характеризуя их повышенную помехоустойчивость. Режим, при котором наступает $\Delta\bar{\gamma}_1[1] = 0$ и $\Delta\bar{\gamma}_2[1] = 0$, является следствием того, что при определенном соотношении $\bar{X}_{\text{ВХ}}$, $\bar{A}_{\text{П}}$ и $\bar{F}$ ошибки преобразования на интервалах t^*_{2n-1} и t^*_{2n}, вызванные сигналом $X_{\text{П}}(t)$, имеют разные знаки и взаимно компенсируются за период автоколебаний $T^*_{0,n}$;

– для интегрирующего РП с ШИМ-1 ошибка $\Delta\bar{\gamma}_1[1]$ с ростом относительной постоянной времени интегрирования $\overline{T}_{И2} = T_{И2}/T_{И1}$ уменьшаются как в ОДП, так и в ОЗД (см. табл. 1, рис. 4). Это свидетельствует о росте инерционности РП. Областью оптимального значения параметра $\overline{T}_{И2}$ следует считать зону с пределами $2{,}2 \le \overline{T}_{И2} \le 3{,}0$, когда разрешается компромисс между помехоустойчивостью РП и его быстродействием.

Для объективного сравнения динамических характеристик РП различных классов в табл. 1, рис. 4 представлен график среднестатистического отклонения коэффициента заполнения $\Delta\bar{\gamma}^*[1] = f(\overline{X}_{ВХ})$, который подтверждает, что интегрирующие РП по сравнению с РП, построенного на основе выборки мгновенных значений сигнала управления, обладают повышенной помехоустойчивостью.

Библиографический список

1. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. –№ 2. – С. 91–96.

2. Григорьев, М.А. Линейная плотность поверхностного тока в энергосберегающих электроприводах с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев, А.Е. Бычков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14. – № 32(208). – С. 46–51.

3. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 106–114.

4. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов/ М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 111–117.

5. Grigorev, M.A. The electric Drive with Field Regulated Reluctance Mashine / M.A. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 118–123.

6. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

7. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, С.П. Лохов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.

8. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.

9. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, Г.В. Караваев, М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2001. – Вып. 1. – № 4(4) – С. 70–76.

10. Усынин, Ю.С. Частотные характеристики канала регулирования момента в синхронных электроприводах / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков // Электричество. – 2012. – № 4. – С. 54–59.

11. Потери в регулируемых электроприводах при разных законах управления / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 13. – № 14(190). – С. 47–51.

12. Энергосбережение в электроприводах тягодутьевых механизмов многосвязных объектов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.Е. Бычков, Д.И. Кашаев, Т.Т. Москов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 15. – № 15(232). – С. 40–45.

13. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

14. Григорьев, М.А. Система управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехника. – 2013 – № 10. – С. 29–35.

К содержанию

УДК 62-83:621.313.32

МАТРИЧНАЯ СТРУКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В.П. Мацин, Н.В. Савостеенко

Дана классификация существующих структур управления электроприводами переменного тока. Приведены результаты экспериментальных исследований на опытных образцах электропривода. Синтез системы управления электроприводом проводился посредством анализа числа степеней свободы, которые понимались как количество независимых управляющих воздействий. Анализ возможностей систем управления электроприводов с СРМНВ выполнялся в сопоставлении с традиционными регулируемыми асинхронными и синхронными электроприводами.

Ключевые слова:матричная структура СРМНВ, синтез математических моделей, синхронная реактивная машина независимого возбуждения.

В асинхронных электроприводах количество независимых управляющих воздействий равно двум. Для достижения высоких регулировочных показателей в системах векторного управления воздействуют на активную и реактивную составляющие тока. Такой подход создает иллюзию независимого управления полем возбуждения и активным током ротора.

При перегрузках усиливается влияние перекрестных связей, что вызвано увеличенным углом поворота вектора тока ротора относительно вектора магнитного потока и снижением электромагнитного момента в зоне закритических скольжений. Это вызывает значительные погрешности в классической модели асинхронного электропривода [1–4].

В электроприводе с СРД, подключенном к промышленной сети, число степеней свободы такое же, как и в асинхронном электроприводе, а векторные схемы управления строят так, что контуры регулирования возбуждения и активной составляющей предполагаются независимыми [5]. Между тем, эти составляющие связаны друг с другом общим уравнением связи, которое диктуется синусоидальной формой результирующего тока, так что рассматривать эти составляющие как независимые воздействия нельзя.

В идеальном электроприводе с СРМНВ за счет многофазности линейную плотность тока можно задать вдоль расточки статора любой формы [6–10]. В работах H. Wehэто представлено как дополнительное «управлениереакцией якоря». Данное обстоятельство можно трактовать как еще одну степень свободы, которая может эффективно использоваться при формировании управляющих воздействий в зоне перегрузок. Указанные рас-

суждения строятся из предположения, что электромеханический преобразователь имеет бесконечное число фаз, а источники тока являются идеальными (с бесконечно большой полосой равномерного пропускания частот).

В реальном электроприводе с СРМНВ статорные обмотки имеют *n*количество взаимных магнитных связей и питаются от источников с ограниченной полосой равномерного пропускания частот. Фазные зоны статорных обмоток при конечном числе фаз конечные, и при вращении ротора часть обмотки одной из фаз может находиться в зоне возбуждения, а часть - в зоне якоря. Это несколько снижает возможности независимого управления полем возбуждения и полем реакции якоря [11, 12].

В электроприводе с СРМНВ каждая фаза питается от индивидуального источника тока. Современные полупроводниковые преобразователи имеют широкую полосу равномерного пропускания, которая ограничивается либо несущей частотой (если $f_{шим}$<5 кГц), либо быстродействием микропроцессорной системы управления (конечным временем выполнения одного скана). В любом случае частота среза в контуре регулирования тока оказывается очень высокой и достигает 1300 рад/с. Контуры регулирования фазных токов выполняют роль внутренних корректирующих устройств и тем самым резко подавляют влияние межфазных связей.

Если в электроприводе зафиксировать токи статора и поворачивать ротор вокруг оси, то угловая характеристика (зависимость электромагнитного момента от угла поворота) будет иметь два периода на один электрический оборот. Если количество фаз ограничено, то система работает по огибающей угловых характеристик (рис. 1, кривая 2). Если принять число фаз в электрической машине $f > 6$, то можно считать что пульсации момента не превышают допустимый уровень.

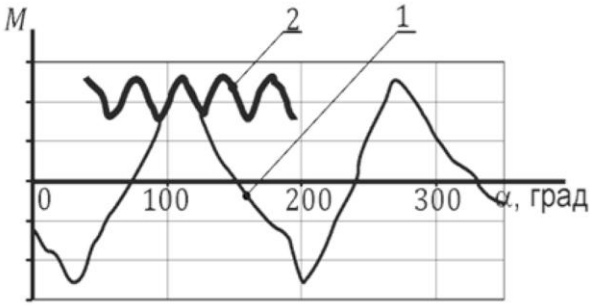


Рис. 1. Угловые характеристики СРМНВ (1), СРМНВ при переключении тока в функции угла поворота (2)

На рис. 2 представлена матричная структурная схема электропривода с СРМНВ. Основными управляющими воздействиями приняты составляющие токастатора $I_{ЗАДЯ}$, $I_{ЗАДВ}$. Кроме того, матрицей **В** осуществляется регулируемое смещение вектора результирующего тока относительно углового положения ротора. Матрицей **М**, учитываются составляющие электромагнитного момента, которые создаются каждой из фаз в электрической машине, а в преобразователе Trвыполняется суммирование элементов матрицы **М**, результатом которого является электромагнитный момент двигателя М.

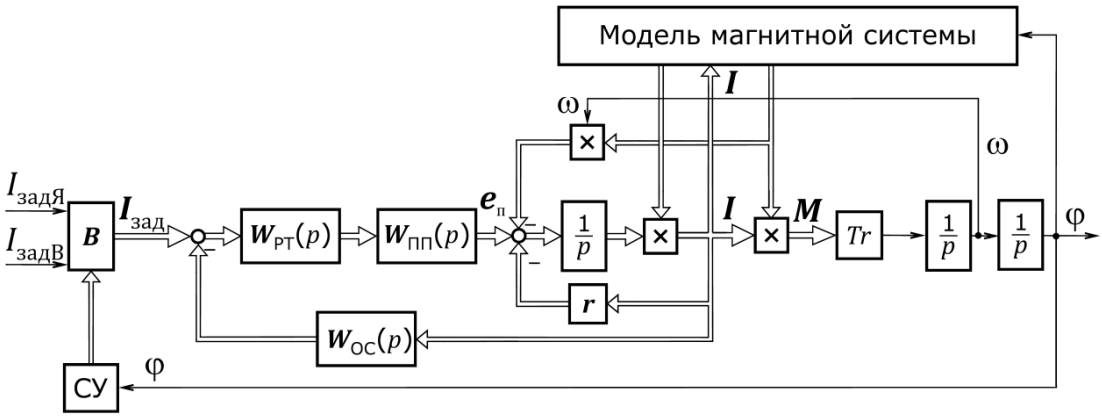


Рис. 2. Матричная структура системы управления электроприводом с СРМНВ

В электроприводах с СРМНВ, выполняемых по критерию минимальных затрат на компоненты электропривода, выгодно иметь стандартные трехфазные схемы силовых цепей. В этом случае при реализации предельных по быстродействию режимов новые качественные показатели дает схема управления с импульсно-векторным регулированием, более известная как схема с DTC-управлением, предложенная для асинхронных электроприводов. В схеме управления присутствует датчик положения ротора, который ограничивает предельные значения угла расхождения между пространственными составляющими результирующего вектора магнитного потока. Время изменения момента от 0 до $M_Н$ не превышает 10 мс [13]. Аналогичные результаты получаются в асинхронных электроприводах с DTC-управлением.

Библиографический список

1. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 106–114.

2. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 111–117.

3. Grigorev, M.A. Theelectric Drivewith Field Regulated Reluctance Mashine / M.A. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. –№ 1. – С. 118–123.

4. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 91–96.

5. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

6. Параметрическая оптимизация частотнорегулируемых электроприводов / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, А.М. Журавлев, С.П. Лохов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 30–33.

7. Синтез системы управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, С.П. Гладышев, А.Н. Горожанкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 18. – № 37(296). – С. 38–41.

8. Дудкин, М.М. Частотно-широтноимпульсный адаптивный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления / М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 45–52.

9. Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 5–18.

10. Цытович, Л.И. Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 53–61.

11. Tsytovich, L.I. About the dynamics of some methods of integrating conversion of analogsignalintodigitalcode / L.I. Tsytovich, M.M. Dudkin, S.P. Lokhov, O.G. Brylina // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 80–91.

12. Цытович, Л.И. Интегрирующий аналого-цифровой датчик нулевого тока / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, В.П. Мацин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 93–96.

13. Лохов, С.П. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравновешиванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 97–106.

К содержанию

УДК 621.3.018.782.3

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ПИТАНИЯ

Н.М. Сапрунова, А.И. Гребнев

Рассмотрены схемы замещения импульсного источника питания, у которого в качестве демпфирующей цепи применяются резистор и конденсатор. Для расчета используется операторный метод. Получено выражение тока в первичной обмотке выходного трансформатора для двух интервалов работы.

Ключевые слова: импульсный источник питания, транзистор, трансформатор, демпфирующая цепь, схема замещения, колебательный процесс.

Импульсные источники вторичного электропитания широко применяются в автономных и стационарных устройствах для питания различных электронных приборов [1–6]. Принципиальная схема одного из возможных исполнений источника питания приведена на рис. 1 [7–9]. Транзистор управляется прямоугольным сигналом, у которого изменяется ширина импульса, т.е. на затвор подается ШИМ–сигнал [10–14].

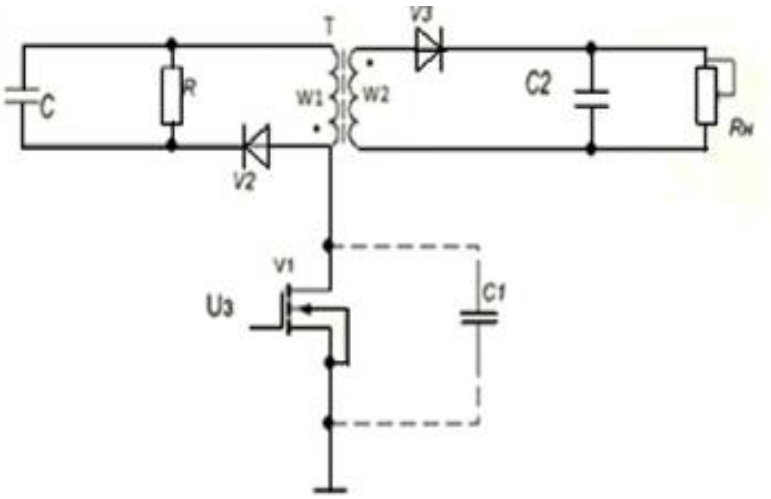


Рис. 1. Схема импульсного источника питания

При выключении транзистора на первичной обмотке w_1трансформатора T возникает ЭДС самоиндукции, которая ограничивается демпфирующей цепью. Целью исследования на первом этапе являются переходные процессы при выключении транзистора. Характер переходных процессов в дальнейшем позволит выбрать схему и параметры демпфирующей цепи.

Схема замещения при выключении транзистора и положительной полярности ЭДС самоиндукции приведена на рис. 2, где C_1 – эквивалентная емкость транзистора, Z– параллельное соединение резистора R и емкости C.

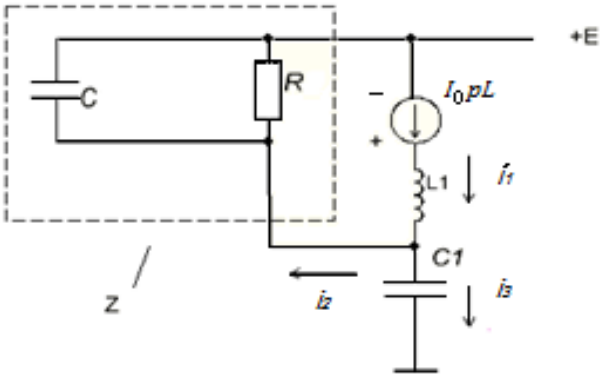


Рис. 2. Схема замещения на первом интервале работы

Тогда в схеме замещения получается 3 неизвестных параметра: i_1, i_2, i_3.
Согласно схеме замещения составлена система уравнений:

$$\begin{cases} I_1(p) = I_2(p) + I_3(p) \\ -I_0pL + I_1(p)\cdot pL = -I_2(p)\cdot Z(p) \\ E = -I_2(p)\cdot Z + I_3(p)\cdot \frac{1}{pC_1} \end{cases} \quad (1)$$

Решение системы (1) дает значение тока $I_1(p)$:

$$I_1(p) = \frac{pER\,C_1}{p^2LR(C+C_1)+pL+R} + \frac{p^2I_0LR(C+C_1)+pI_0L}{p^2LR(C+C_1)+pL+R}. \quad (2)$$

Знаменатель приводим к виду $(p^2 + ap + d)$:

$$I_1(p) = \frac{EC_1}{LC_\Sigma}\cdot\frac{p}{p^2+\frac{p}{RC_\Sigma}+\frac{1}{LC_\Sigma}} + \frac{I_0\left(p^2+\frac{p}{RC_\Sigma}\right)}{p^2+\frac{p}{RC_\Sigma}+\frac{1}{LC_\Sigma}}. \quad (3)$$

Общий знаменатель двух слагаемых имеет вид: $(p^2 + ap + d)$, где

$$a = \frac{1}{RC_\Sigma}, d = \frac{1}{LC_\Sigma}, C_\Sigma = C + C_1. \quad (4)$$

Временная функция $i_1(t)$ зависит от соотношения d и $a^2/4$. Предположим, что в схеме рис. 2 происходит колебательный процесс, тогда значение принимает вид:

$$i_1(t) = \frac{E}{\omega L}\cdot\frac{C}{C_\Sigma}\cdot e^{-\frac{at}{2}}\cdot\sin\omega t + I_0e^{-\frac{at}{2}}\cdot\left[\cos\omega t + \frac{1}{2RC_\Sigma}\cdot\sin\omega t\right]. \quad (5)$$

Для оценки влияния параметров схемы на характер изменения тока i_1 удобно воспользоваться относительными единицами:

$$\frac{t}{RC_\Sigma}, \frac{tR}{L}, at = \frac{t}{RC_\Sigma}, \omega t = \sqrt{\frac{tR}{L}\cdot\frac{tR}{L} - \frac{t}{RC_\Sigma}^2}. \quad (6)$$

Напряжение на индуктивности $u_L = i_1(t)\cdot\omega L$.

После прохождения одной полуволны тока полярность ЭДС самоиндукции изменяется. Кроме того, изменяется схема замещения (рис. 3), где R_1 – активное сопротивление обмоток трансформатора.

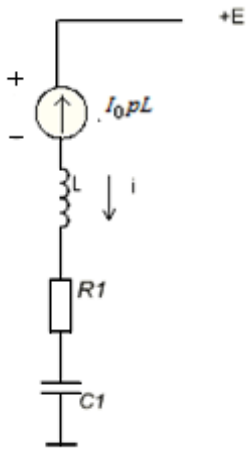


Рис. 3. Схема замещения на втором интервале работы

Значение тока $i_1(t)$ в случае колебательного процесса принимает вид [15–18]:

$$i_1(t) = \frac{E}{\omega_1 L} \cdot e^{-\frac{a_1 t}{2}} \cdot \sin \omega_1 t + I_0 e^{-\frac{a_1 t}{2}} \cdot \left[\frac{a_1}{2\omega_1} \cos \omega_1 t + \sin \omega_1 t\right]. \qquad (7)$$

По выражениям (5) и (7) рассчитаны и построены зависимости $i_1(t)/I_0$, причем $E/\omega L$ принято равным I_0. При расчете взяты значения параметров работающего макета источника питания [19–22]. Результирующая кривая переходного процесса тока первичной обмотки трансформатора приведена на рис. 4.

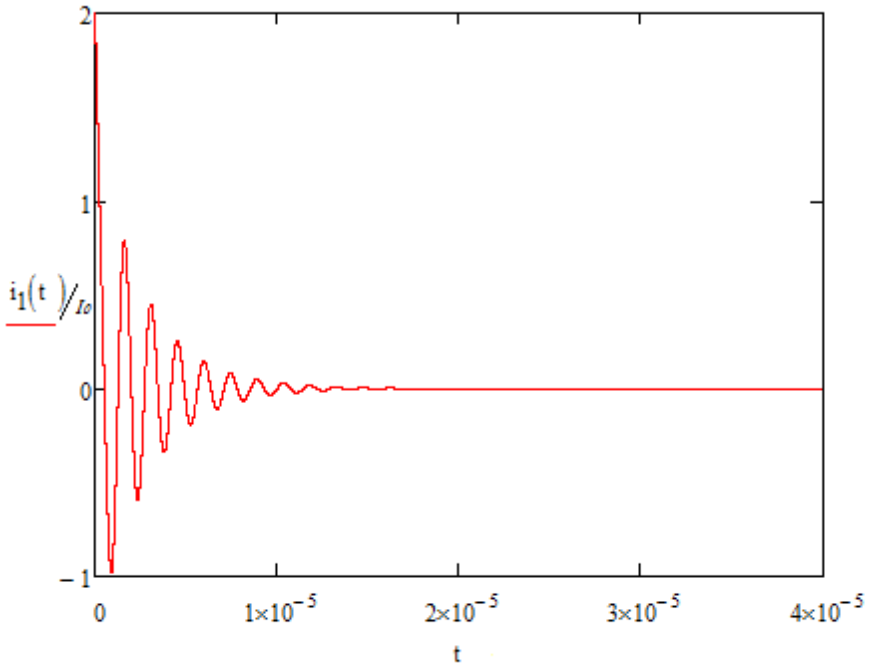


Рис. 4. Переходный процесс тока $i_1(t)$

Итак, для демпфирующей цепи (рис. 1) характерен колебательный процесс с затуханием в течение времени порядка 10–20 мкс. Это позволяет работать транзистору с ШИМ–сигналом на частотах $f \leq 40$ кГц.

Библиографический список

1. Брылина, О.Г. Статические и динамические спектральные характеристики многозонного преобразователя с частотно-широтно-импульсной модуляцией / О.Г. Брылина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 70–79.

2. Цытович, Л.И. Многозонные интегрирующие системы управления каскадами «вентильный преобразователь исполнительный механизм» для объектов с параллельными каналами регулирования / Л.И. Цытович, О.Г. Терещина // Практическая силовая электроника. – 2009. – № 36. – С. 23–30.

3. Цытович, Л.И. Многозонный частотно-широтно-импульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // Патент на изобретение RUS 2408969 23.12.2009.

4. Дудкин, М.М. Частотно-широтноимпульсный адаптивный регулятор переменного напряжения с интегрирующей системой управления / М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Л.И. Цытович, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 45–52.

5. Дудкин, М.М. Энергосберегающие технологии в испытательных стендах с использованием однофазных обратимых преобразователей / М.М. Дудкин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 5–18.

6. Цытович, Л.И. Интегрирующее устройство синхронизации с псевдоследящей фиксацией точек естественной коммутации напряжения сети / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 53–61.

7. Tsytovich, L.I. About the dynamics of some methods of integrating conversion of analogsignalintodigitalcode / L.I. Tsytovich, M.M. Dudkin, S.P. Lokhov, O.G. Brylina // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 80–91.

8. Цытович, Л.И. Интегрирующий аналого-цифровой датчик нулевого тока / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, В.П. Мацин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 93–96.

9. Лохов, С.П. О новом принципе интегрирующего аналого-цифрового преобразования с бестактовым поразрядным уравновешиванием / С.П. Лохов, Л.И. Цытович, М.М. Дудкин, О.Г. Брылина, Р.М. Рахматулин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2012. – № 37 (296). – С. 97–106.

10. Дудкин, М.М. Однофазные обратимые преобразователи напряжения для улучшения качества электрической энергии в сетях ограниченной мощности / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2012. – № 2. – С. 19.

11. Дудкин, М.М. Энергетические характеристики однофазных обратимых преобразователей напряжения с различными законами модуляции / М.М. Дудкин // Практическая силовая электроника. – 2010. – № 38. – С. 25–32.

12. Цытович, Л.И. Фазосдвигающее устройство / Л.И. Цытович, М.М. Дудкин // Патент на изобретение RUS 2320071 09.10.2006.

13. Цытович, Л.И. Многозонный частотно-широтно-импульсный регулятор переменного напряжения / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.В. Качалов // патент на изобретение RUS 2408969 23.12.2009.

14. Цытович, Л.И. Система непрерывного контроля сопротивления изоляции электротехнических изделий в процессе их термической сушки / Л.И. Цытович, Р.М. Рахматулин, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, А.Ю. Мыльников, В.А. Тюгаев, А.В. Тюгаев // Промышленная энергетика. – 2013. – № 1. – С. 24–28.

15. Гельман, М.В. Комплексный автоматизированный стенд для изучения физических основ электроники и преобразовательной техники / М.В. Гельман, Р.З. Хусаинов, М.М. Дудкин, О.Г. Терещина // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2007. – № 12 (84). – С. 19–24.

16. Цытович, Л.И. Частотно-широтно-импульсный терморегулятор сушильной камеры с непрерывным тестированием сопротивления изоляции электротехнического изделия / Л.И. Цытович, О.Г. Брылина, М.М. Дудкин, Р.М. Рахматулин, А.В. Тюгаев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2011. – № 34 (251). – С. 50–55.

17. Григорьев, М.А. Система управления электроприводом с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Электротехника. – 2013 – № 10. – С. 29–35.

18. Моделирование электропривода активного прицепа / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 106–114.

19. Григорьев, М.А. Удельные массогабаритные показатели электроприводов / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 111–117.

20. Grigorev, M.A. The electric Drive with Field Regulated Reluctance Mashine / M.A. Grigorev // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 118–123.

21. Григорьев, М.А. Системы с переменной структурой для синхронных реактивных электроприводов с независимым управлением по каналу возбуждения / М.А. Григорьев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 2. – С. 91–96.

22. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – № 16(275). – С. 107–110.

К содержанию

УДК 62-567

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ ЖЕСТКОСТИ

С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, С.В. Кондаков

С помощью математической модели исследована возможность регулирования жесткости амортизатора и возможность рекуперации механической энергии колебаний гидравлического амортизатора транспортного средства при установке в гидролинию шестеренного насоса, соединенного с электрическим генератором. Приведены результаты моделирования, рассчитаны параметры элементов модели, обеспечивающие требуемую динамику гидроэлектромеханической системы.

Ключевые слова: амортизатор, поршень, колебания, шестеренный насос, генератор.

При движении по неровностям дороги возникают колебания корпуса транспортной машины. Гашение колебаний обеспечивают амортизаторы, рассеивающие энергию в окружающую среду. Источником энергии колебаний, как это ни парадоксально звучит, является двигатель внутреннего сгорания (ДВС). До 30 % энергии ДВС рассеивается в амортизаторах. Рекуперация энергии колебаний корпуса является актуальной задачей. Основной характеристикой амортизатора является его жесткость, определяемая усилием, возникающим в ответ на перемещение поршня. Известно, что для получения требуемой устойчивости транспортной машины в различных условиях движения необходима различная жесткость амортизаторов. Таким образом, регулирование жесткости амортизатора также является актуальной задачей, одно из существующих решений которой – это приме-

нение жидкостей, изменяющих вязкость при воздействии магнитного поля. Рассматриваемый способ регулирования жесткости позволяет решать указанные выше актуальные задачи.

Для исследования возможности регулирования жесткости с рекуперацией энергии механических колебаний в электрическую энергию разработана математическая модель амортизатора с встроенным в гидравлическую линию шестеренным насосом, соединенным с генератором. В литературе имеется две математические модели нагружения подвески эквивалентными силами, используемые для оценки свойств подвески по плавности хода, для подбора параметров упругого и демпфирующего элементов [1, с. 121].

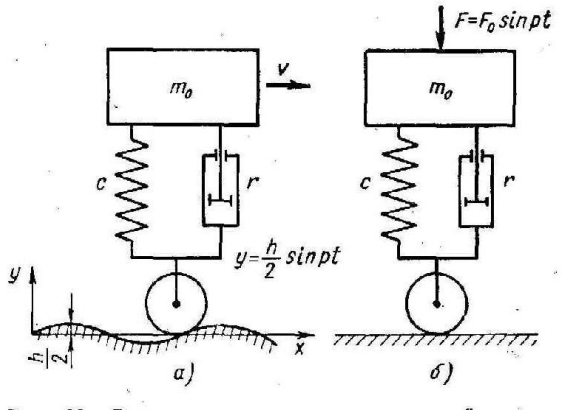


Рис. 1. Расчетная схема подрессоренной массы
при различных вариантах действия возмущающих сил

Уравнение движения для схемы а) имеет вид:

$$m_0\ddot{z} + r\dot{z} + cz = c\frac{h}{2}\sin pt + r\frac{h}{2}p\cos pt,$$

а при смещении начала отсчета на четверть периода вправо по рис а):

$$m_0\ddot{z} + r\dot{z} + cz = c\frac{h}{2}\cos pt + r\frac{h}{2}p\sin pt \qquad (1)$$

Уравнение движения для схемы б) имеет вид:

$$m_0\ddot{z} + r\dot{z} + cz = F_0\sin pt, \qquad (1^*)$$

где m_0 – подрессоренная масса, кг; r – коэффициент сопротивления амортизатора, Н/(м/с); c – жесткость подвески, Н/м; z – перемещение поршня, м; h – высота неровностей, p – частота внешнего возмущения.

Если рассматривать только нагрузки, действующие на амортизатор, то уравнения (1) и (1^*) принимают одинаковый вид:

$$m_0\ddot{z} + r\dot{z} = F_0\sin pt \qquad (2)$$

где $F_0 = r\frac{h}{2}p$, если возмущение формирует дорога, или просто независимая константа, равная максимуму приложенной гармонической силы по рис б).

Если соединить полости амортизатора не через клапана, а через шестеренчатый насос, к которому присоединен электропривод, как показано на рис. 2, то для шестерен насоса можно записать систему уравнений (3–6), по сути, являющуюся уравнением (2) с расписанным для электропривода сопротивлением амортизатора:

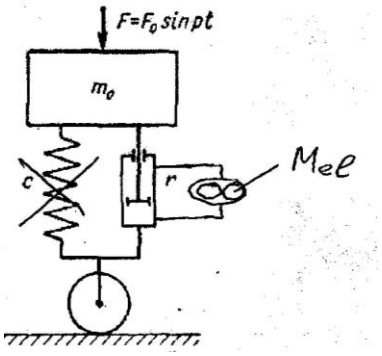


Рис. 2. Схема нагружения амортизатора с электроприводом

$$J_0\dot{\omega} = M_n - M_{el} \tag{3}$$

$$M_n = q_n F_0 \sin pt / S_n \tag{4}$$

$$M_{el} = k\omega \tag{5}$$

$$\dot{z} = q_n\omega \tag{6}$$

где J_0 – момент инерции шестеренного насоса, электропривода и приведенной массы поршня амортизатора, кг·м^2; ω – угловая скорость вращения шестерен насоса, рад/с; M_n – момент на шестерне насоса от силы $F_0 \sin pt$, Н·м; M_{el} – электрический момент, Н·м; q_n – объёмная постоянная насоса, м^3/р; S_n – площадь поршня, м^2; k – коэффициент пропорциональности механической характеристики электромашины, Н·м/(рад/с).

Математическая модель реализована в среде программирования VISSIM. Использованы параметры реального амортизатора – геометрические и функциональные. Масса m = 2,147 кг; d = 5 см; ход амортизатора – 20 см; длина сжатого – 32 см; разжатого – 52 см; запас хода амортизатора на сжатие – 15 см, запас хода амортизатора на разжатие – 5 см; величина коэффициента сопротивления амортизатора при открытых клапанах: при отбое = 400Нс/м, при сжатии = 300 Нс/м, относительная скорость перемещения штока и цилиндра = 0,8 м/с.

Основные зависимости, связывающие механические, гидравлические и электрические параметры «электрического амортизатора».

Для шестеренного насоса объемная постоянная определяется формулой:

$$q_0 = 2\pi m^2 bz,$$

где m – модуль шестерни; b – ширина шестерни; z – число зубьев шестерни.

Момент инерции зубчатого колеса:

$$J = 0.5MR^2 = 0.5V\rho R^2 = 0.5\pi R^2 b\rho R^2 = 0.5\pi R^4 b\rho,$$

где M, V – масса и объём шестерни; ρ – удельная масса материала шестерни; R – радиус делительной окружности шестерни.

Параметры НШ-10: объёмная постоянная 10 см^3/об (в системе СИ 1,6·10^{-6}м^3/рад); модуль 3 мм; ширина шестерни 15 мм; диаметр делительной окружности 30 мм; масса всего насоса, вместе с корпусом 2 кг; момент инерции 1,5·10^{-4}кг·м^2.

Параметры НШ-100: объёмная постоянная 100 см^3/об (в системе СИ 16·10^{-6}м^3/рад); модуль 5 мм; ширина шестерни 45 мм; диаметр делительной окружности 54 мм; масса всего насоса, вместе с корпусом 2 кг; момент инерции 3·10^{-4}кг·м^2. Соотношение постоянной времени электропривода от его момента инерции $T = 25 \cdot J$.

С помощью разработанной модели проведены расчеты для НШ-100 в нескольких вариантах: базовом, с уменьшенной длиной шестерни и при двух вариантах моментов инерции – с учетом и без учета инертности электропривода. Результаты расчетов при гармоническом воздействии на шток амортизатора внешней силы амплитудой 5000 Н и частотой 3 Гц представлены на рис 3.

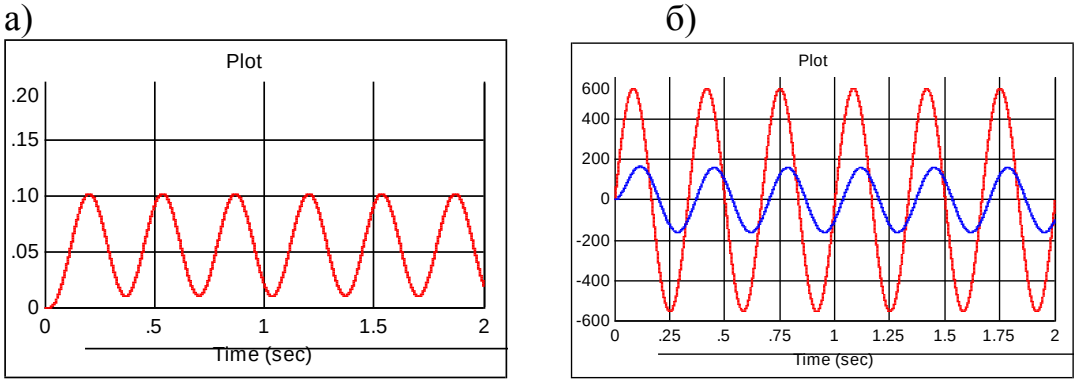


Рис. 3. Базовый вариант НШ-100: а) скорость вращения и приложенная сила; б) перемещение поршня

Недостатки НШ-100: маленькая скорость и перемещение. Для того чтобы это поправить, необходимо уменьшать объемную постоянную. А этого можно добиться уменьшением ширины шестерни, либо диаметра. Резуль-

таты расчетов для НШ-10 приведены на рисунках 4,5. На рис. 6 – результаты для уменьшенной шестерни НШ-100. На всех рисунках а) скорость вращения (рад/с) и приложенная сила (Н); б) перемещение поршня (м).

а) б)

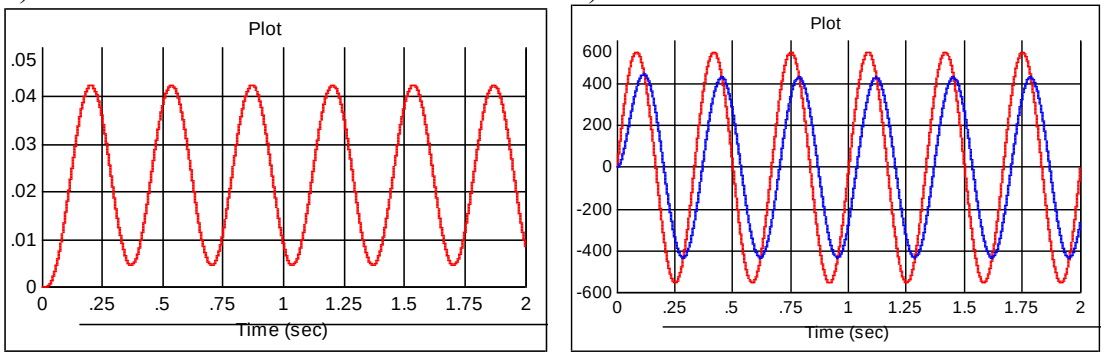


Рис. 4. Базовый НШ-10

а) б)

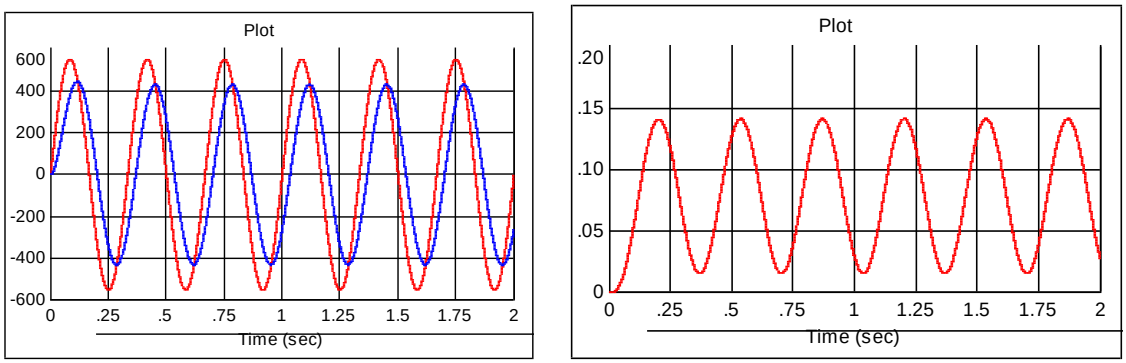


Рис. 5. НШ-10 с увеличенной до 60 мм длиной шестерни

а) б)

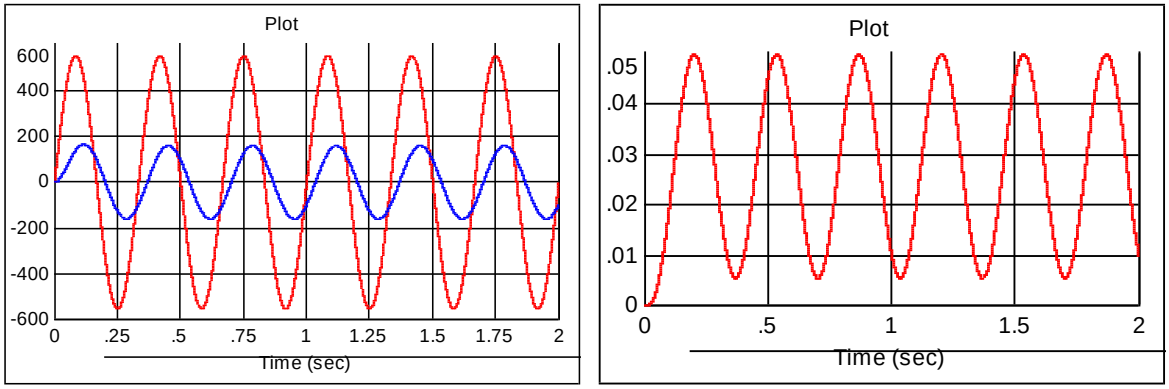


Рис. 6. НШ-100 с уменьшенной до 22 мм длиной шестерен

Обобщающие результаты сведены в таблицу.

Таблица 1

	q, $м^3/р$	J, $кг*м^2$	Скор вращ, р/с	Перемещение, м
Базовые модели насосов				
НШ-100 45 мм	0.0000105	0.00059	180	0,1
НШ-10 18 мм	0.0000016	0.000033	420	0,04
Измененные размеры				
НШ-10 60 мм 3 момента инерции	0.0000054	0.000112	420	0,14
Нш-10 60 мм 2 момента инерции	0.0000054	0.000075	650	0,2
НШ-100 22 мм 2 момента инерции	0.0000051	0.00029	180	0,05
Нш-100 22 мм 3 момента инерции	0.0000051	0.00043	100	0,03

На основе полученных данных сформулированы приведенные в выводах требования к геометрическим размерам шестерен гидронасоса, при которых обеспечивается частота среза 3 Гц.

Для уточнения параметров модели были определены главные размеры и момент инерции ротора для электрогенератора мощностью P_2=900 Вт, с номинальными частотами вращения 225, 450 и 900 рад/с. Расчет выполнялся «энергетическим» методом [5]. Результаты расчета приведены в таблице.

Таблица 2

ω, рад/с	$D_{р,}$ *м*	l_{δ}, *м*	$J \cdot 10^{-4}$, $кг \cdot м^2$
225	0,055	0,225	16,20
450	0,044	0,179	5,00
900	0,034	0,142	1,55

Далее было проведено сравнение моментов инерции двигателей с разными номинальными частотами вращения. Результаты сравнения показали, что при заданных параметрах генератора, которые были получены при моделировании, момент инерции ротора превышает установленное при моделировании значение почти в 3 раза. При этом невозможно обеспечить требуемую динамику системы, а именно, частоту среза в 3 Гц. Поэтому, было принято решение использовать генератор с номинальными параметрами, полученными для частоты вращения 900 рад/с, так как его момент инерции еще позволяет добиться желаемой динамики системы.

Регулирование жесткости обеспечивается путем изменения мощности, снимаемой с генератора при постоянном напряжении на его выходе, равном напряжению бортовой сети. Это возможно с применением соответствующих алгоритмов управления, описанных в [6].

Выводы

1. Оба базовые насоса НШ-10 и НШ-100 не удовлетворяют требованиям по перемещению поршня, а НШ-100 еще и требованиям электропривода по скорости.

2. Изменение длины шестерни насоса ведет к пропорциональному изменению производительности и момента инерции одной шестерни

3. Изменение присоединенного момента инерции электромашины ведет к изменению максимальной скорости вращения шестерен насоса и амплитуды перемещения поршня амортизатора.

4. Момент инерции электромашины для частоты вращения 450 рад/с оказался в 3 раза больше принятого при моделировании. При этом выполнение заданных требований невозможно.

5. Рекомендуемые размеры шестерен насоса для «электрического амортизатора»: диаметр шестерни 20 мм, модуль 3 мм, количество зубьев 10, осевая длина шестерен 100 мм.

Библиографический список

1. Дмитриев, А.А. Теория и расчёт нелинейных систем подрессоривания гусеничных машин / А.А. Дмитриев, В.А. Чобиток, А.В. Тельминов. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.

2. Горобцов, А.С. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей: Монография / А.С. Горобцов, С.К. Карцев, А.Е. Плетнев, Ю.А. Поляков. – М.: Машиностроение, 2011. – 463 с.

3. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.

4. Бутерин, Н.В. Курс теоретической механики. Том 2. Динамика / Н.В. Бутерин, Я.Л. Лунц, Д.Р. Меркин. – М. Машиностроение, 1973. – 340 с.

5. Лифанов, В.А. Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учебное пособие / В.А. Лифанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 164 с.

6. Воронин, С.Г. Сравнительная оценка различных способов управления коммутацией вентильных двигателей по энергетическим показателям и регулировочным свойствам / С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, А.С. Кульмухаметова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013 – Т. 13. – № 1. – С. 96–103.

К содержанию

УДК 621.313.8 + 621.313.32

ПОТЕРИ В РОТОРЕ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

А.И. Согрин

Проведен анализ магнитных потерь в синхронной электрической машине с возбуждением от постоянных магнитов. Для определения потерь использована конечно-элементная модель магнитного поля в электрической машине. Произведена оценка влияния поля якоря и пульсаций магнитного поля воздушного зазора на величину магнитных потерь. Показаны пути снижения роторных потерь.

Ключевые слова – магнитные потери, синхронная машина, вихревые токи, постоянные магниты, дробная зубцовая обмотка.

Учеными кафедры электромеханики и электромеханических систем ЮУрГУ совместно со специалистами ОАО «ЧТЗ-Уралтрак» проводятся работы по созданию стартер-генераторной системы для мощного транспортного дизеля. Особенностью предъявленных к электрической машине требований является ее малая осевая длина, при достаточно большом диаметре. В заданные габариты наиболее удачно удалось вписать многополюсную синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов и дробной зубцовой обмоткой [1].

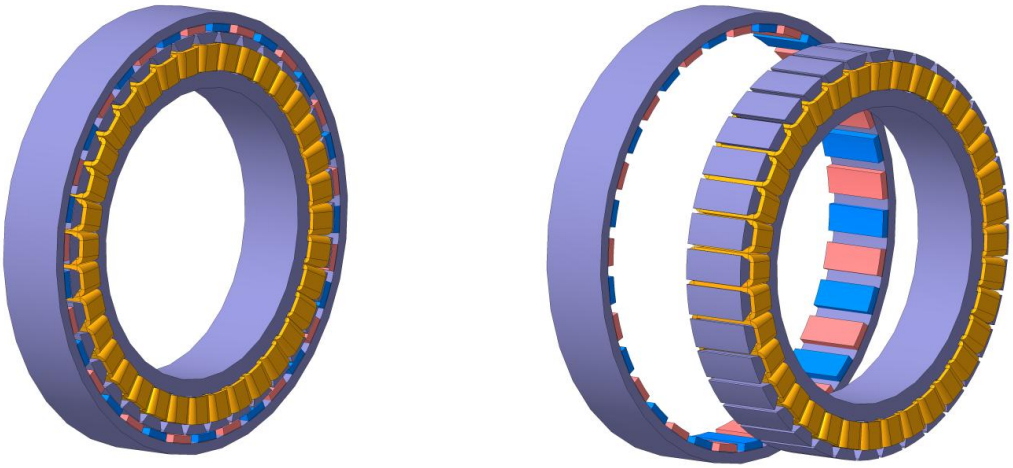


Рис. 1. Магнитная система стартер-генератора

Параметры одного из вариантов стартер-генератора приведены в таблице 1. В связи с достаточно высокими частотами вращения и большим числом полюсов ротора на первый план вышла проблема существенных магнитных потерь в стальных сердечниках электрической машины.

Таблица 1

Наименование параметра	Значение параметра
Диапазон частот вращения в генераторном режиме, об/мин	1000...2600
Номинальная мощность в генераторном режиме при минимальной частоте вращения, кВт	30
Номинальная мощность, начиная с частоты вращения 1550 об/мин, кВт	60
Максимальный КПД	0,95
Пусковой момент при температуре окружающей среды минус 25 °С, Нм	1250
Номинальный момент, Нм	640
Номинальная механическая мощность при температуре окружающей среды минус 25°С, кВт	10
Число полюсов индуктора	34
Число пазов статора	36
Наружный диаметр, мм	538
Внутренний диаметр, мм	365
Осевая длина активной части, мм	105

Основные магнитные потери возникают в сердечнике статора, однако потери в роторе составляют не менее серьезную проблему, поскольку отвод тепла от вращающегося ротора затруднен. В тоже время, нагрев ротора и особенно постоянных магнитов, расположенных на нем, нежелателен, так как ведет к ухудшению показателей магнитов, а при сильном нагреве – к их полному размагничиванию.

Известно, что потери в роторе связаны с неравномерностью воздушного зазора электрической машины и возникающими в этой связи пульсациями магнитного поля в нем, а также с действием высших гармоник магнитного поля якоря, вращающихся несинхронно с индуктором [2]. Точный аналитический учет этих потерь затруднен. В литературе по проектированию электрических машин приводятся выражения для определения пульсационных потерь в роторе, а добавочные потери от поля якоря предлагается оценивать приближенно, в процентах от мощности машины [3]. При этом добавочные потери определяются в общем для статора и для ротора и, таким образом, нет возможности адекватно оценить потери в роторе.

Для нашего случая расчет магнитных потерь был проведен по результатам численного моделирования магнитного поля синхронной машины с использованием программных средств фирмы ANSYS. Построенная полевая модель учитывает движение ротора относительно статора, изменение токов в проводниках обмотки якоря и связанных с ними полей, нелинейность магнитных свойств материалов магнитной системы, электрические свойства проводниковых и ферромагнитных материалов. На полевой модели были получены зависимости потерь в статоре и в роторе электрической машины от токовой нагрузки якоря и от частоты перемагничивания сердечников (см. рис. 2, 3).

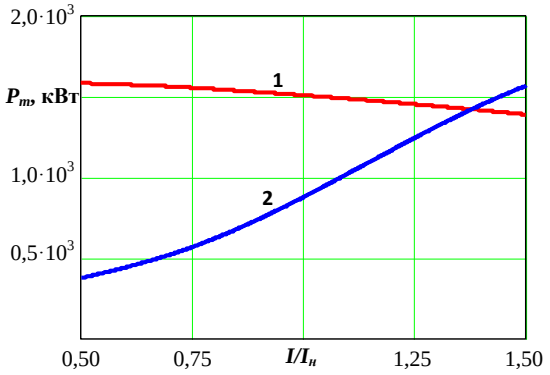
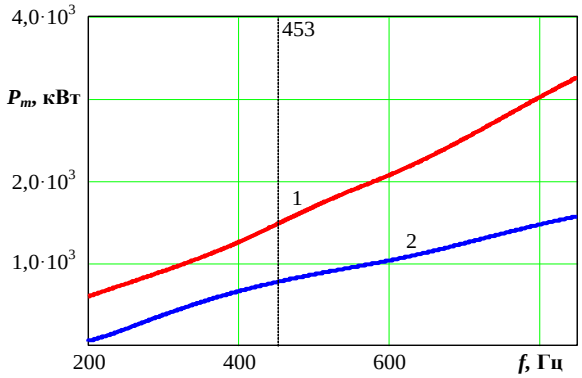


Рис. 2. Зависимость магнитных потерь в сердечниках стартер-генератора от тока якоря (частота вращения 1600 об/мин)



1 – потери в статоре, 2 – потери в роторе

Рис. 3. Зависимость магнитных потерь в сердечниках стартер-генератора от частоты перемагничивания (ток номинальный)

Как видно из результатов, потери в сердечниках существенно зависят от частоты вращения ротора, так как при ее изменении меняется частота перемагничивания статора полем индуктора, частота зубцовых пульсаций индукции и частота перемещения вращающихся гармоник поля якоря относительно ротора.

Эксперимент показал, что потери в роторе существенно возрастают при увеличении тока якоря, что можно объяснить тем, что значительным источником потерь в роторе являются гармоники поля якоря, вращающиеся несинхронно с ротором и увеличивающиеся вместе с основной гармоникой этого поля.

Для уточнения вклада различных факторов в роторные потери были проведены дополнительные эксперименты на полевой модели, в ходе одного из которых по обмотке якоря пропускались симметричные синусоидальные токи от внешних источников, а коэрцитивная сила магнитов принималась равной нулю, в ходе другого наоборот — магнитодвижущая сила (мдс) обмотки исключалась из расчета. В соответствии с полученными данными потери в роторе при отсутствии токов в обмотке якоря не превышают 25 % от потерь в номинальном режиме (см. табл. 2), что позволяет заключить, что основным источником потерь в роторе является поле якоря.

Таблица 2

	Потери в статоре, кВт	Потери в роторе, кВт
$I=I_н$=190А, n=1600 об/мин	1,50	0,80
$I=I_н$=190А, n=1600 об/мин, H_c=0	0,20	0,83
n=1600 об/мин, I=0	1,60	0,20

Для теоретического обоснования этого явления был проведен гармонический анализ поля якоря рассматриваемой синхронной машины.

При этом были сделаны следующие допущения:

- воздушный зазор гладкий
- магнитная проницаемость стальных участков бесконечна
- катушечные стороны расположены в воздушном зазоре, сечение катушечных сторон бесконечно мало
- воздушный зазор мал по сравнению с размерами полюсного деления.

При принятых допущениях можно считать, что магнитные линии поля в зазоре прямолинейны и перпендикулярны центральной линии зазора, а форма поля якоря совпадает с формой намагничивающей силы его обмотки и при анализе вместо поля можно рассматривать эту намагничивающую силу [2]. Выражение для рассматриваемой мдс было получено путем суммирования намагничивающих сил отдельных катушек с учетом их пространственного сдвига на угол $\delta = 2\pi/z$ друг относительно друга.

Разложение в ряд Фурье проводилось на периоде обмотки, соответствующем в данном случае полной окружности якоря. Как и обмотка с целым шагом дробная зубцовая обмотка создает намагничивающую силу, которую можно представить в виде бесконечного ряда прямо и обратно вращающихся гармоник:

$$F(t,\alpha) = \sum_{\nu} \frac{N_{\text{фз}}\sqrt{2}IW_k c}{\pi\nu} k_{\text{об}\nu}\cos(\omega t \mp \nu\alpha),$$

где $N_{\text{фз}}$ – количество фазных зон, c – количество катушек в фазной зоне, W_k – количество витков в катушке. Здесь обмоточный коэффициент обмотки $k_{\text{об}\nu}$ определяется выражением:

$$k_{\text{об}\nu} = \sin\frac{\nu\pi}{z} \cdot \frac{\sin\frac{c\nu(\pi-\delta)}{2}}{c \cdot \sin\frac{\nu(\pi-\delta)}{2}}.$$

Особенностью намагничивающих сил обмоток рассматриваемой конструкции является наличие двух гармоник зубцового порядка, с близкими амплитудами, вращающихся в противоположные стороны. В качестве рабочей может быть использована любая из них, а индуктор машины выполняется с соответствующим числом пар полюсов [4]. Например, для машины, имеющей 34 полюса и 36 зубцов, наряду с основной 17-ой гармоникой создается целый спектр высших и низших гармоник, сильнейшая из которых – сопряженная с основной 19-я. Основная 17-я гармоника вращается синхронно с ротором, имеющим 17 пар полюсов, и принимает непосредственное участие в электромеханическом преобразовании энергии. Остальные гармоники, перемещаясь относительно статора и ротора, создают в

них вихревые токи, обуславливающие дополнительные потери. Полученные положения относительно гармонического состава поля якоря были подтверждены на полевой модели стартер-генератора в ходе решения магнитостатической задачи. Кривая поля якоря в зазоре машины в общих чертах повторяет в соответствующем масштабе кривую мдс, полученную расчетно (рис. 4).

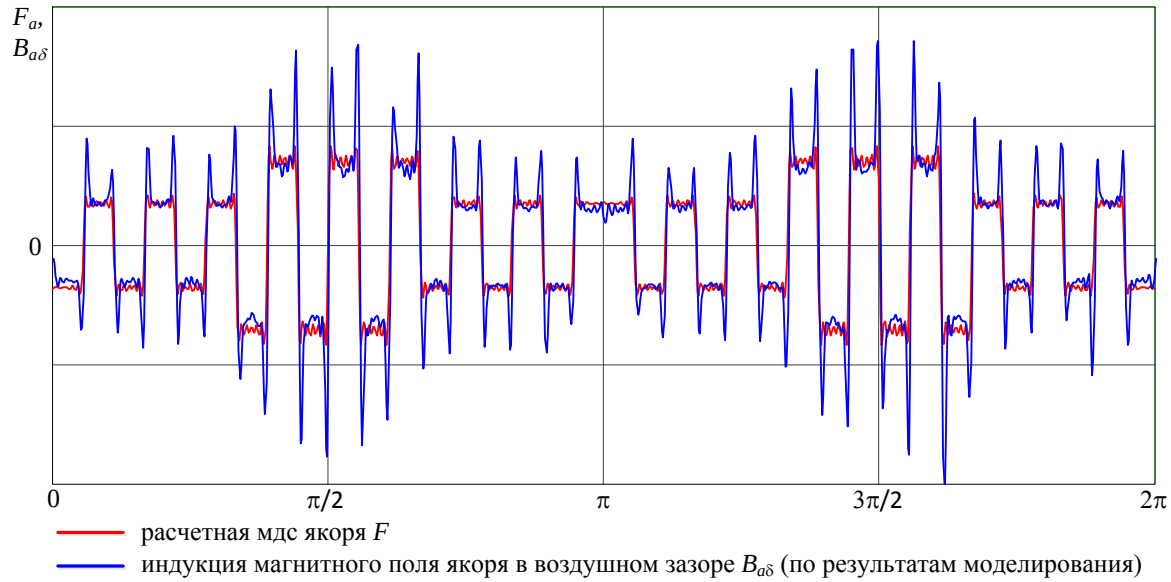


Рис. 4. Распределение магнитного поля в воздушном зазоре стартер-генератора

Неосновные гармоники имеют различные амплитуды, числа полюсов и скорости перемещения относительно ротора и статора. При этом в неподвижном статоре все гармоники создают электродвижущие силы (эдс) одинаковой частоты. Частота перемагничивания сердечника ротора полем вращающихся гармоник зависит от их полюсности, скорости и направления их вращения относительно ротора. Для прямых гармоник, вращающихся согласно с ротором, частота перемагничивания определяется выражением:

$$f_{\nu пр} = \frac{n(\nu_p - \nu)}{60}.$$

Для обратных гармоник:

$$f_{\nu обр} = \frac{n(\nu_p + \nu)}{60},$$

где n – частота вращения ротора, ν — номер рассматриваемой гармоники, ν_p — порядок основной рабочей гармоники.

С целью качественной оценки влияния различных гармоник поля якоря на магнитные потери в роторе были записаны соотношения для эдс гармоник, вращающихся согласно и против направления вращения ротора. При

этом за базовое значение была принята эдс, создаваемая первой гармоникой, которая для рассматриваемой машины является обратной:

$$\frac{E_\nu}{E_1} = \frac{\left(\frac{\nu_p}{\nu} - 1\right) k_{об\nu}}{(\nu_p + 1) k_{об1}} \qquad \frac{E_\nu}{E_1} = \frac{\left(\frac{\nu_p}{\nu} + 1\right) k_{об\nu}}{(\nu_p + 1) k_{об1}}$$

Наибольшую эдс ожидаемо создает сопряженная с основной гармоника поля, вращающаяся относительно ротора со скоростью приблизительно в два раза превосходящей скорость вращения ротора относительно статора и имеющая наибольшую из неосновных гармоник амплитуду. Высшие гармонии поля якоря также способны создать в роторе значительную эдс (см. табл. 3).

Таблица 3

ν	17	53	89	125	161	197
E_ν/E_1	0	4,88	5,77	6,10	6,26	6,33
ν	19	55	91	127	163	199
E_ν/E_1	-13,83	-9,60	-8,77	-8,42	-8,24	-8,14

Основной путь снижения потерь в роторе связан с увеличением электрических сопротивлений контуров протекания вихревых токов. Картина распределения вихревых токов в роторе синхронной машины показывает, что основные потери сосредоточены в постоянных магнитах (рис. 5).

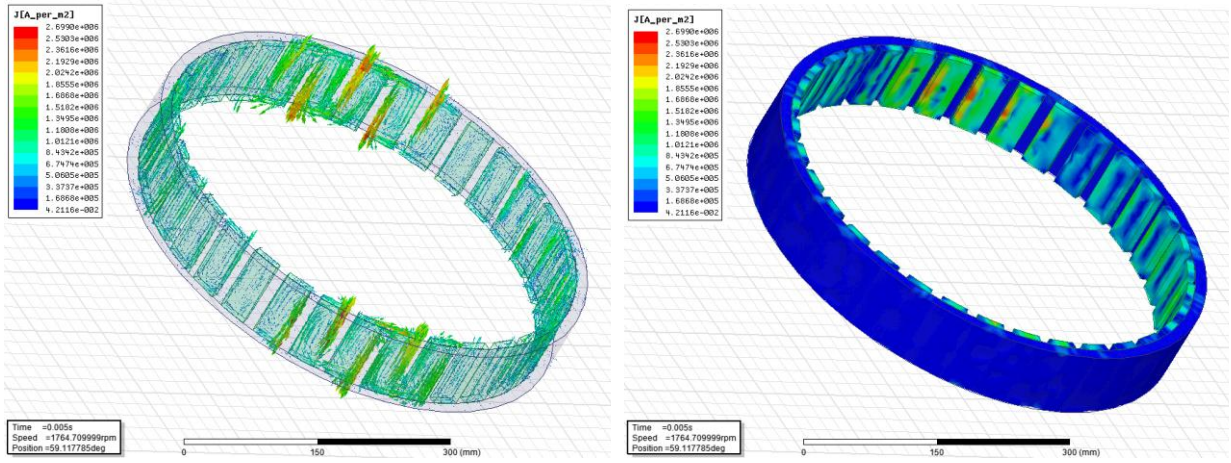
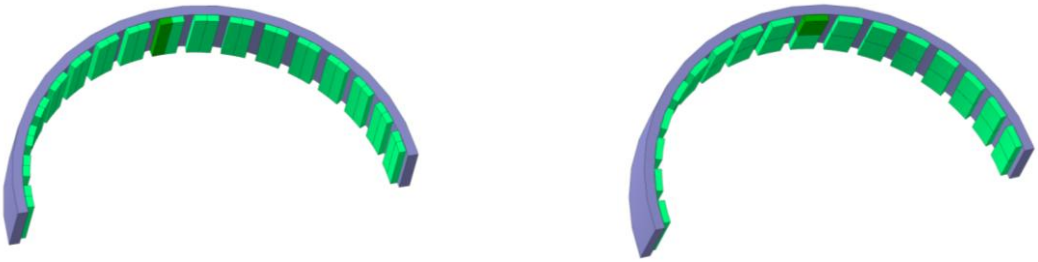


Рис. 5. Распределение вихревых токов в роторе стартер-генератора

Увеличить сопротивления путей протекания вихревых токов можно путем разделения полюсов на части – сегментирования магнитов [5]. Численный эксперимент на полевой модели машины, имеющей магнитотвердые полюсы, каждый из которых разделен на две части в аксиальном направлении (рис. 6а), показал, что потери в роторе при таком разделении снизились в 2,6 раза (на 60 %). Разделение магнитов на две равные части в поперечном направлении

(рис. 6б) практически не изменяет основной путь для протекания вихревых токов, что и показал эксперимент – потери уменьшились только в 1,3 раза.



а) б)

Рис. 6. Сегментирование магнитов в аксиальном и в поперечном направлении

Также рассматривалась возможность снижения потерь в роторе путем изменения формы кривой поля якоря. Желаемая кривая поля якоря должна содержать лишь основную гармонику, в данном случае 17-ю. Уменьшение остальных гармоник возможно путем формирования рациональной магнитной проводимости воздушного зазора, который должен хорошо проводить основную гармонику поля и ослаблять неосновные [6]. При этом необходимо учитывать возможное изменение неравномерности воздушного зазора, что может увеличить уровень пульсационных потерь.

Используя аналитические выражения, полученные для тихоходных редукторных двигателей [6], была рассчитана специальная форма коронок зубцов стартер-генератора (рис. 7), в результате чего удалось существенно ослабить высшие неосновные гармоники поля якоря (рис. 8, таблица 5).

Рис. 7. Форма пазов якоря с улучшенным гармоническим составом мдс

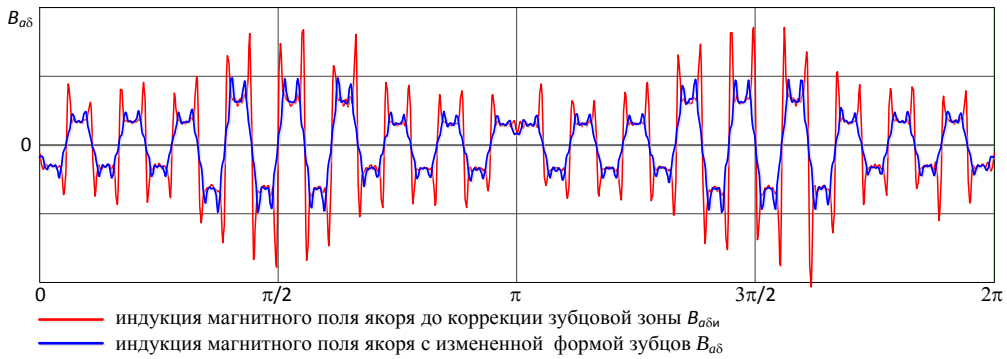


Рис. 8. Магнитное поле в зазоре стартер-генератора
с измененной формой зубцов якоря

При этом сопряженная с основной 19-я гармоника практически не изменилась (см. табл. 5), и вряд-ли может быть ослаблена рассмотренным способом без ущерба для основной рабочей гармоники, так как их порядок близок.

Таблица 5

ν	$B_{aδи}$, Тл	$B_{aδ}$, Тл	$B_{aδи}/B_{aδ}$
17	-0,023	-0,021	1,1
19	0,022	0,020	1,1
53	-0,014	-0,005	2,8
55	0,014	0,005	2,8
89	-0,011	0,002	-5,5
91	0,011	-0,002	-5,5
125	-0,008	0,002	-4,0
127	0,008	-0,002	-4,0
161	-0,005	-0,001	5,0
163	0,005	0,001	5,0

Вопреки ожиданиям, коррекция формы зубцов не снизила потери в роторе. Кроме того, потери возросли, что можно объяснить увеличением пульсаций основного магнитного поля в зазоре машины.

Дальнейшие исследования планируется связать с поиском рациональной конфигурации пазово-зубцовой зоны, обеспечивающей снижение магнитных потерь в роторе.

Библиографический список

1. Воронин, С.Г. Стартер-генератор для дизельной силовой установки / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, П.О. Шабуров, Б.Д. Шумаков // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 25–28.

2. Вольдек, А.И. Электрические машины: Учеб. для электротехн. спец. втузов / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1978. – 832 с.

3. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов. В 2 кн.: Кн. 2 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков и др. – 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 384 с.

4. Шевченко, А.Ф. Анализ магнитодвижущих сил дробных зубцовых обмоток электрических машин / А.Ф. Шевченко, Т.В. Честюнина // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 3–7.

5. Bettayeb, Adel Analytical Estimation of Rotor Loss Due to Stator Slotting of Synchronous PM Machines / Adel Bettayeb, Robert Kaczmarek, Jean-Claude Vannier // World Academy of Science, Engineering and Technology. – 2010. – № 42. – Pp. 193–199.

6. Куракин, А.С. Рациональная форма пазов редукторных электродвигателей / А.С. Куракин // Изв. вузов. Электромеханика. – 1968. – № 6. – С. 622–627.

К содержанию

УДК 681.586.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

П.О. Шабуров, Е.А. Маргацкая, М.В. Большаков, Б.Д. Шумаков

В статье приводится анализ возможности использования оптического датчика для измерения малых линейных перемещений подвижной части электромагнитного клапана выдоха аппарата искусственной вентиляции легких. Отмечается, что основным преимуществом данного типа датчика является устойчивость к электромагнитным помехам, однако, для реализации обратной связи по положению выходную характеристику датчика следует корректировать в соответствии с особенностями эксплуатации, поскольку она имеет ярко выраженный максимум. Также рассмотрены возможные варианты схемы подключения оптического датчика.

Ключевые слова: оптический датчик; фотоприемник; клапан выдоха; интенсивность света.

Задача измерения малых линейных перемещений в малогабаритных устройствах зачастую бывает затруднена по ряду объективных факторов: во-первых информационное устройство должно обладать как можно меньшими массогабаритными показателями, во-вторых, иметь относительно высокую чувствительность измерения и в-третьих, по возможности датчик должен быть инвариантен к внешним электромагнитным помехам, которые могут наводиться в частности от некоторых элементов конструкции устройства ввиду компактности их расположения. Так, на существующем уровне развития техники можно выделить большое разнообразие датчиков, отличающихся по принципу действия, однако среди них следует отметить лишь два типа, нечувствительных к внешним электромагнитным полям: оптический и ультразвуковой [1].

Оптический бесконтактный датчик, регистрирует изменение светового потока в контролируемой области**,** связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Такой датчик состоит из двух функциональных узлов, приемника и излучателя, которые могут быть выполнены как в одном корпусе, так и в различных корпусах [2]. Оптические датчики

положения обладает высокой чувствительностью, достаточно просты в реализации, но требуют защиты от паразитной засветки и выходные характеристики имеют ярко выраженный максимум.

В ультразвуковых датчиках реализован принцип радара – фиксируются отражённые от объекта ультразвуковые волны, поэтому структурная схема обычно представлена источником ультразвуковых волн и регистратором, которые обычно заключены в компактный корпус. Определение временной задержки между моментами отправки и приёма ультразвукового импульса позволяет измерять расстояние до объекта с точностью, доходящей до десятых долей миллиметра [3]. Диапазон срабатывания датчиков очень широк: от 30 мм до 8 м [4].

В качестве малогабаритного устройства, для которого проводится исследование возможности реализации обратной связи по положению, будем полагать электромагнитный клапан выдоха аппарата искусственной вентиляции легких [5, 6]. Габаритные размеры данного устройства как правило не должны превышать 35 мм при рабочем ходе в 4 мм. Соответственно, в таком случае рациональна установка оптического датчика, поскольку ультразвуковой не обеспечивает измерения положения в таком малом диапазоне перемещения.

Как известно, оптический датчик состоит из источника (излучателя) и приемника оптического излучения, которые могут располагаться в одном корпусе (моноблочные датчики) или в разных корпусах (двухблочные датчики). По принципу работы оптические датчики делятся на датчики барьерного, рефлекторного и диффузионного типа [1]. По типу устройства датчики барьерного типа относятся к двухблочным, где излучатель и приемник располагаются друг напротив друга и выход приемника меняется при перекрытии светового луча излучателя сторонним объектом. Принцип работы датчиков рефлекторного типа основан на том, что световой луч отражается от рефлектора, а отражённый – детектируется датчиком. В датчиках диффузионного типа приёмник учитывает интенсивность луча, отражённого контролируемым объектом [2]. Следовательно, по типу действия рациональным является установка диффузионного светоотражающего оптического датчика, дальность действия которого зависит от отражательных свойств объекта и может быть определена с помощью поправочного коэффициента. На рис. 1 представлено сечение трехмерной модели клапана, где излучатель и приемник оптического датчика крепятся на неподвижной части устройства (крышке корпуса) для измерения расстояния до подвижного якоря с обмоткой.

Использование фототранзистора обусловлено тем, что скорость его срабатывания высока и достаточна даже при высоком быстродействии, которое требуется от клапана выдоха по условиям эксплуатации. Использование фотодиодов также допустимо. Фоторезисторы имеют невысокую скорость срабатывания, и ее может быть недостаточно при высокой скорости движения якоря.

Подразумевается, что выходная информация датчика поступает на вход АЦП микроконтроллера для последующей обработки и реализации обратной связи [7]. Тогда в качестве схемы подключения оптического датчика можно рассмотреть два варианта: с управлением по напряжению и по току (рис. 2).

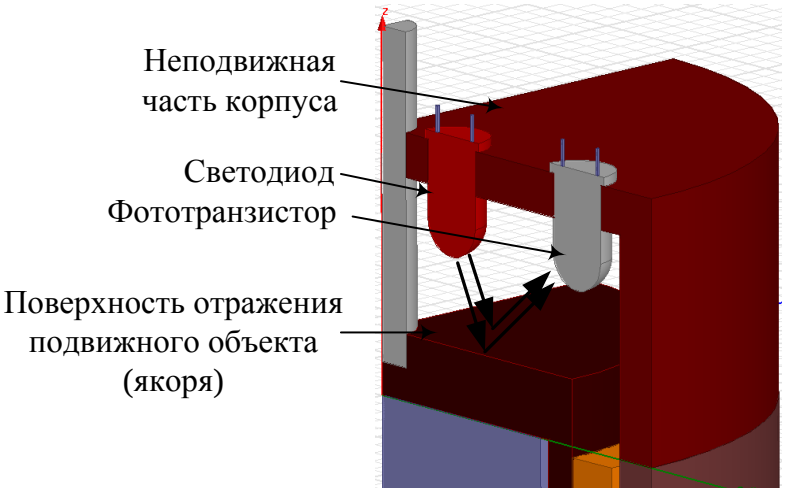


Рис 1. Фрагмент трехмерной модели электромагнитного клапана выдоха с установленным оптическим датчиком

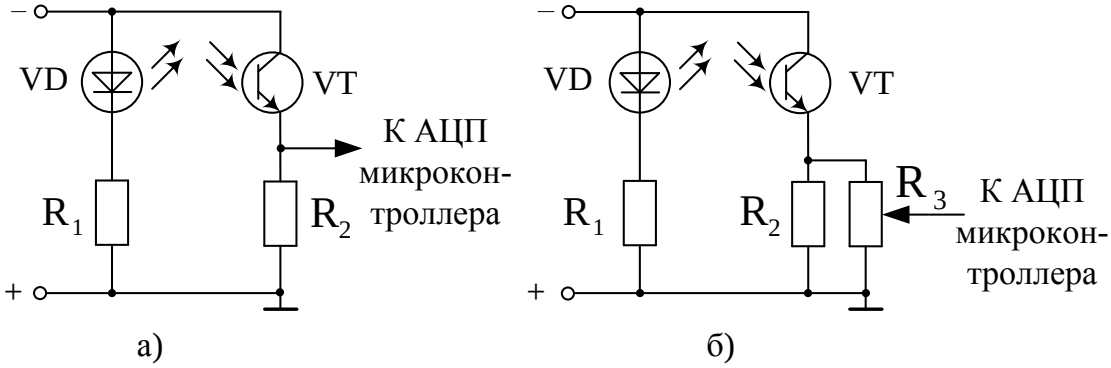


Рис. 2. Схемы подключения оптического датчика

Для схемы рисунка 2а подразумевается подбор резистора R_1 таким образом, чтобы получить требуемый диапазон изменения выходного напряжения приемника оптического датчика для согласования с аналого-цифровым преобразователем (поскольку зачастую информация с датчиков обрабатывается при помощи микроконтроллера). Изменение напряжения при этом способе происходит за счет регулирования яркости излучателя [8].

Однако в условиях реализации измерения положения с достаточно высокой точностью 0,05 мм важным требованием является инвариантность датчика к различным помехам, которыми в данном случае может быть паразитная засветка и чувствительность выхода фотоприемника к внешнему

электромагнитному полю. Для устранения первого типа помех целесообразно добиваться максимально возможной яркости свечения излучателя за счет повышения значения питающего напряжения с использованием резистора R_1 рисунка 2. При этом для того, чтобы приемник не находился постоянно в зоне насыщения, необходимо повысить величину пропускаемого им тока (при помощи R_2). Тогда на характеристике зависимости тока коллектора от интенсивности излучения рабочая точка фототранзистора сместится в зону нелинейности, где для открытия p-n перехода требуется большая интенсивность излучения. Таким образом становится возможным одновременно решить и проблему насыщения и уменьшить чувствительность выхода датчика к электромагнитным помехам. Также в рассматриваемой схеме предусмотрен резистор R_3 для согласования выходного напряжения датчика со входом АЦП микроконтроллера.

Обобщая приведенный обзор, следует заключить, что использование оптического датчика для измерения положения контролируемого объекта в условиях жестких ограничений массогабаритных показателей вполне рационально. К преимуществам его применения можно отнести простоту реализации и схемы подключения, относительно высокую чувствительность и скорость срабатывания, инвариантность к внешним электромагнитным полям. В то же время необходимо учитывать, что выходные характеристики диффузионных оптических датчиков, представляющих собой зависимости выходного напряжения фотоприемника от расстояния до объекта, как правило носят нелинейный характер с ярко выраженным максимумом [9]. Поэтому, несмотря на большое количество преимуществ установки оптического датчика, необходимо проводить его выбор с учетом особенности установки и режимов использования.

Библиографический список

1. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. – М.: Издательство «Мир», 1989. – 191 с.

2. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Дж. Пиани. –СПб.: Невский Диалект, 2001. – 557 с.

3. Смирнов, А.Д. Импульсная ультразвуковая измерительная аппаратура (Вопросы конструирования) / А.Д. Смирнов. – М.: Энергия, 1967. – 192 с.

4. Сенсорика. Ультразвуковые датчики. – URL: http://www.sensorica.ru/s1-4.shtml.

5. Маргацкая, Е.А. Электропривод клапана выдоха аппарата искусственной вентиляции легких / Е.А. Маргацкая, П.О. Шабуров // Электротехнические системы и комплексы: междунар. сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 20. – С. 83–90.

6. Маргацкая, Е.А. Smart lungmotor: активный клапан выдоха / Е.А. Маргацкая, П.О. Шабуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 154–159.

7. Jordan Dimitrov. Линеаризация оптических датчиков расстояния с помощью преобразователя напряжение-частота [Электронный ресурс] // Радиолоцман. – 2012. – № 6. – URL: http://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=147107.

8. Tomi Kuntze. All Facts for Choosing LED Optics Correctly / Tomi Kuntze // LED professional Review. – 2009. – № 15. – Pp. 28–31.

9. Avago technologies. HSDL-9100. Surface – Mount Proximity Sensor. Data Sheet, 2009. – URL: http://www.avagotech.com/docs/AV02-2259EN.

К содержанию

УДК 62-573 + 621.43-573

СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПЕРЕД ЭЛЕКТРОПУСКОМ

Б.Д. Шумаков

Применение в гибридных силовых установках транспортных средств интегрированных стартер-генераторов облегчает реализацию систем стоп-старта двигателей внутреннего сгорания. Показано возможное снижение пусковых токов при определенном угловом положении вала двигателя при пуске. Рассмотрена возможная конструкция датчика и электрическая схема реализации системы позиционирования угла вала дизельного двигателя в стоп-стартном режиме работы.

Ключевые слова: транспортные средства; интегрированные электромашины; стоп-старт дизеля; датчик угла вала двигателя.

Развитие транспортных средств с гибридными силовыми установками, содержащими механические и электрические двигатели, а также накопители энергии, существенно изменяет требования к электрическим агрегатам таких машин. Одним из таких требований является объединение (интегрированность) стартера и генератора транспортного средства в одну электрическую машину. Исследования объединенных стартер-генераторных систем подтверждают достоинства интегрированного решения.

Достаточно распространенным вариантом компоновки стартер-генератора является постоянная совместная работа на общем валу двигателя внутреннего сгорания и электрической интегрированной машины. Данная реализация позволяет электрической машине в любое время работы

транспортного средствам формировать на валу крутящий или тормозной моменты, соответственно, при работе стартера или генератора. Указанное свойство является удобным для использования в системе стоп-старта, которая останавливает двигатель внутреннего сгорания в начале его работы на холостом ходу и при необходимости возобновления работы двигателя осуществляет его быстрый пуск. Данный алгоритм позволяет экономить топливо и снижать вредные выбросы, а также шум за счет сокращения времени работы двигателя на холостом ходу.

Примером реализации интегрированного стартер-генератора является электрическая машина непосредственно соединенная с выходом коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания [1, 2]. В указанных материалах представлен интегрированный стартер-генератор для дизельной силовой установки. Стартер-генератор, работает с аккумуляторной батареей напряжением 24 В, осуществляя пуск дизеля, заряд аккумуляторной батареи и общее электроснабжение транспортного средства.

Следует отметить некоторые особенности работы систем стоп-старт на транспортных средствах с бензиновыми и дизельными двигателями.

На транспортных средствах, использующих бензиновые двигатели, при останове двигателя поршни в цилиндрах останавливают в определенных положениях, оптимальных для дальнейшего быстрого пуска двигателя и уменьшающих пусковые токи аккумуляторной батареи. При указанных положениях цилиндров для пуска двигателя сразу осуществляют впрыск топлива и воспламеняют топливно-воздушную смесь. Происходит рабочий ход одного из цилиндров, энергия которого затрачивается в первую очередь на перевод вала двигателя из неподвижного состояния во вращательное, то есть на трогание вала. В дополнение к энергии сгорания топлива добавляют энергию стартера, который включают на непродолжительное время и двигатель начинает работать.

На транспортных средствах, использующих дизельные двигатели, данный подход неприменим, так как воспламенение топливно-воздушной смеси в цилиндре осуществляется путем сильного сжатия ее поршнем, которое происходит при вращении вала после его трогания за счет энергии аккумуляторной батареи. Таким образом, при пуске дизельного двигателя энергия аккумуляторной батареи тратится и на трогание вала и на сжатие топливно-воздушной смеси в цилиндре. На рис.1 показано качественное различие величин максимального тока аккумуляторной батареи $I_{АКБ}$ при различных углах положения вала φ в начале пуска двигателя и при постоянстве углов начала сжатия топливно-воздушной смеси в цилиндрах.

Угол φ_1 соответствует близости окончания такта сжатия в цилиндрах двигателя, а φ_2 соответствует близости начала такта сжатия. Такты работы двигателя характеризуются изменениями тока аккумуляторной батареи $I_{ПРОКР}$ при прокручивании вала двигателя в отсутствие воспламенения сме-

си. Рост величины тока $I_{ПРОКР}$ соответствует такту сжатия, уменьшение – такту воспламенения (рабочему ходу). Указанные изменения $I_{ПРОКР}$ относительно φ являются для конкретных типов двигателей неизменными во все время их эксплуатации.

Согласно рис. 1 следует, что прокручивание вала двигателя из начального углового положения вала φ_1 обеспечивается при меньших максимальных токах аккумуляторной батареи нежели, чем из φ_2, то есть ($I_{1max} < I_{2max}$). При пуске двигателя из углового положения вала φ_1 первоначально энергия аккумуляторной батареи расходуется на перевод вала двигателя из неподвижного состояния во вращательное, и, ориентировочно, после достижения угла θ_1 ток батареи начинает уменьшаться до текущего тока $I_{ПРОКР}$. При пуске из положения φ_2 к току трогания вала добавляется ток, расходуемый на сжатия смеси, и поэтому, максимальный ток аккумуляторной батареи в момент пуска становится большим, нежели, чем в предыдущем случае. Ориентировочно, после достижения угла θ_2 ток батареи начинает снижаться до текущей величины тока $I_{ПРОКР}$.

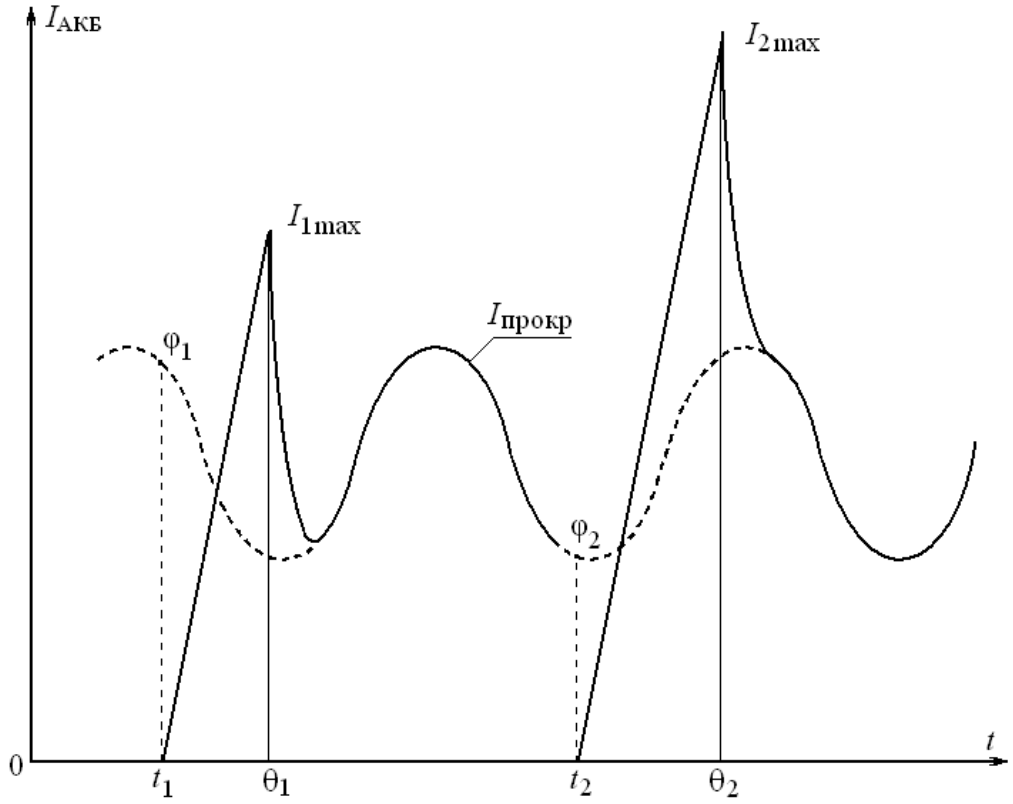


Рис. 1. Величины максимальных токов аккумуляторной батареи при различных углах положения коленчатого вала в начале пуска двигателя

Таким образом, при наличии системы позиционирования углового положения вала двигателя, устанавливающей вал при останове двигателя в угловое положение близкое к углу φ_1 последующий пуск двигателя будет

проходить при минимальных токах батареи. При отсутствии данной системы возрастает вероятность останова вала двигателя в угловые положения близкие к φ_2 и при последующем пуске требуется расход энергии аккумуляторную батарею одновременно на трогание и на сжатие смеси. Данное обстоятельство предопределяет возникновение значительных пусковых токов и требует применения аккумуляторных батарей большой электрической емкости. Снижение электрической емкости аккумуляторных батарей при использовании системы позиционирования на дизельных двигателях является материально и экономически выгодным.

Системы позиционирования вала двигателя, облегчающая режим работы аккумуляторной батареи, может быть реализована следующим образом. Указанная выше конструкция интегрированного стартер-генератора дополнительно оборудуется датчиком диапазона углового положения ротора, который жестко соединен с коленчатым валом двигателя [3].

Поперечный разрез стартер-генератора с датчиком диапазона показан на рис. 2. Датчик диапазона содержит пластину с поверхностью поглощающей инфракрасное излучение, которая установлена на внешней поверхности ротора, излучатель инфракрасного излучения (ИДД), направленный в сторону внешней поверхности ротора, три последовательно расположенных приемника инфракрасного излучения (ПДД), также направленные в сторону внешней поверхности ротора. Приемники разнесены на расстояние соответствующее необходимому угловому диапазону положения ротора, а, следовательно, и коленчатого вала. Излучатель и приемники инфракрасного излучения соединены с электронным коммутирующим устройством и монтируются на корпусе двигателя, например, на кожухе закрывающим вращающийся ротор электрической машины.

При отсутствии пластины датчика диапазона около приемников излучение излучателя отражается от внешней поверхности ротора и фиксируется приемниками излучения. При расположении пластины около приемников излучения инфракрасное излучение перекрывается и поглощается, на что приемники реагируют соответствующими состояниями выходных сигналов.

При перекрытии первого, по времени срабатывания, приемника включается режим тормоза электромашины и затем спустя промежуток времени, определяемый частотой вращения ротора, включается реверсивный режим вращения ротора и коленчатого вала двигателя. При перекрытии второго, по направлению вращения ротора, приемника реверсивный режим вращения ротора машины выключается. Режим электромагнитного тормоза продолжает действовать в течение определенного периода, который определяется моментом инерции коленчатого вала и ротора машины.

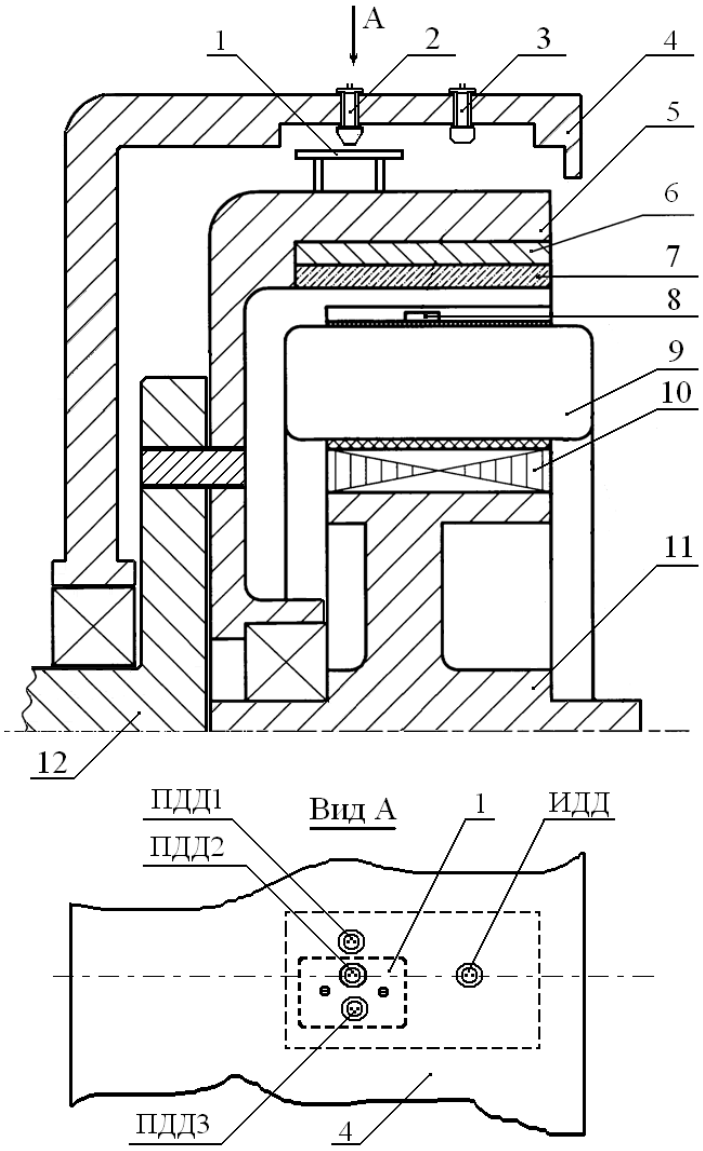


Рис. 2. Поперечный разрез стартер-генератора с датчиком диапазона:
1 – поглощающая пластина; 2 – приемник инфракрасного излучения;
3 – излучатель инфракрасного излучения; 4 – кожух стартер-генератора;
5 – ротор; 6 – магнитопровод; 7 – постоянные магниты;
8 – датчик положения ротора; 9 – обмотки стартер-генератора;
10 – зубцы стартер-генератора; 11 – статор;
12 – выход коленчатого вала двигателя

Ротор электрической машины должен остановиться в угловом диапазоне, при котором перекрыты первый и второй приемники. Третий приемник должен оставаться открытым. В случае перекрытия третьего приемника, то есть при перерегулировании вращения ротора, электронное коммутирующее устройство отключает режим электротормоза и включает реверсивный режим работы электромашины до момента открытия третьего приемника.

Наличия в начале процесса остановки ротора режима электромагнитного торможения электромашины, и последующего кратковременного формирования в ней реверсивного момента позволяют фиксировать заданное положение перекрывающей пластины ротора между вторым и третьим приемниками инфракрасного излучения. Угловой диапазон положения ротора определяется расстоянием между вторым и третьим приемниками излучения. При определенных постоянных величинах угловой скорости ротора в начале торможения, продолжительностей включения режимов торможения и реверса результат процесса остановки ротора с большой вероятностью будет однозначным и без автоколебаний.

Электрическая схема системы позиционирования, показанная на рис. 3, работает следующим образом.

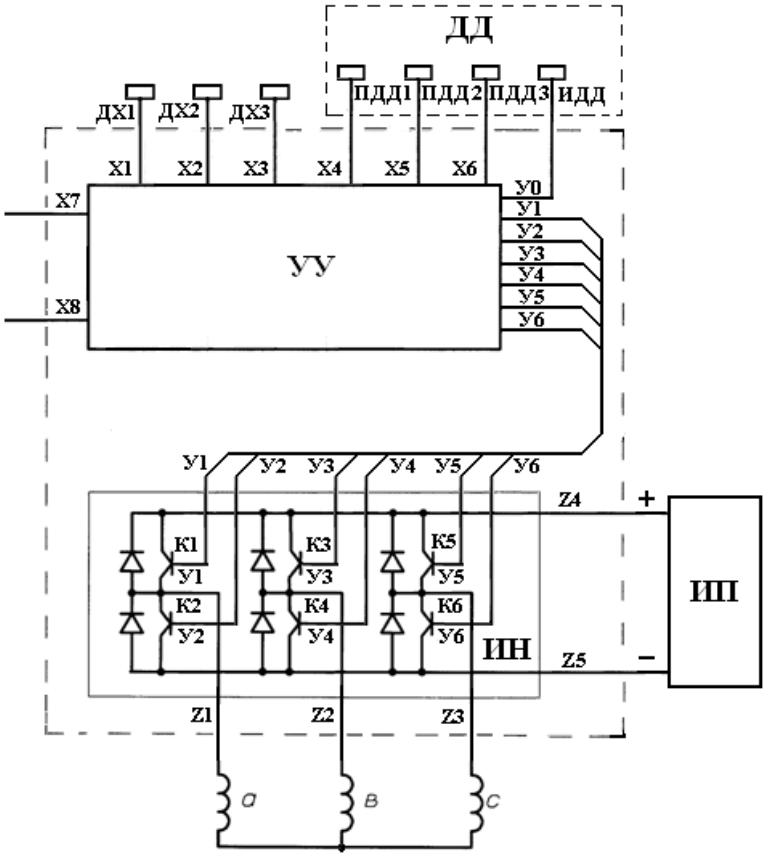


Рис. 3. Электрическая схема системы позиционирования:
ДД – датчик диапазона; ДХ – датчики положения ротора;
ИН – инвертор; ИП – источник питания; X7 – включение команды «Пуск»; X8 – включение команды «Останов»

При подаче команды «Пуск» на вход X7, управляющее устройство (УУ) оценивает на входах X1, X2 и X3 сигналы гальваномагнитных датчиков ДХ, которые показывают направление намагниченности постоянных магнитов ротора, находящихся непосредственно над датчиками. По положению постоянных магнитов и зубцов управляющим устройством определя-

ются фазы обмоток и требуемые направления токов в них. Выбранные фазы и направления токов задаются путем формирования на выходной шине управляющего устройства сигналов управляющих команд (У1, У2, У3, У4, У5, У6), которые поступают на входы инвертора напряжений (ИН). В соответствии с сигналами управления транзисторные ключи инвертора (К1, К2, К3, К4, К5, К6) подключают к выводам (Z4, Z5) источника питания (ИП) выводы фаз обмоток статора (Z1, Z2, Z3). Протекающие по обмоткам статора токи создают магнитные поля, которые взаимодействуя с магнитными полями постоянных магнитов, формируют вращающий момент ротора. Ротор под действием вращающего момента поворачивается, одновременно вращая коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания.

При вращении ротора положение постоянных магнитов относительно обмоток изменяется, вращающий момент начинает уменьшаться. Поворот ротора отражается в сигналах датчиков положения ротора. Управляющее устройство оценивает изменения в данных датчиков положения ротора и на их основе определяет необходимые для создания вращающего момента фазы и направления токов в них. Изменившиеся сигналы управления поступают на входы инвертора напряжений, происходят соответствующие переключения ключей инвертора, что приводит к увеличению вращающего момента ротора. Дальнейшее поворачивание ротора ведет к новым переключениям ключей в инверторе напряжений, что в конечном итоге приводит к вращению ротора и к пуску двигателя.

Управляющее устройство при вращении ротора по частоте переключений датчиков положения ротора анализирует величину частоты вращения ротора и связанного с ним коленчатого вала. При достижении ротором минимальной пусковой частоты двигателя внутреннего сгорания управляющее устройство отключает команды управления инвертором напряжений.

При подаче на вход Х8 команды «Останов» рабочие циклы в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания прекращаются, коленчатый вал двигателя вместе с ротором, вращаясь по инерции, останавливается. Одновременно, при подаче команды «Останов», управляющее устройство включает излучатель инфракрасного излучения (У0) датчика диапазона, подключается к выходам датчиков положения ротора и к выходам (Х4, Х5, Х6) приемников инфракрасного излучения. По частоте переключений датчиков положения ротора управляющее устройство определяет текущую частоту вращения останавливающегося ротора. При уменьшении частоты вращения ротора до определенной величины, при которой мощности электромашины достаточно для быстрой остановки двигателя, производится точная установка ротора в заданное угловое положение, которая производится следующим образом.

При перекрытии поглощающей пластиной первого приемника датчика диапазона (ПДД1) управляющее устройство, по показаниям датчиков положения ротора, определяет фазы и направления токов для включения

электромашины в режим электромагнитного тормоза. По сигналам управляющего устройства инвертор напряжения и источник питания обеспечивают требуемый режим работы электрической машины.

По истечению заданного промежутка времени после включения режима торможения, управляющее устройство производит анализ состояний всех приемников датчика диапазона. В случае перекрытия приемника ПДД1 и открытых приемников ПДД2 и ПДД3, управляющим устройством формируются сигналы управляющие инвертором на доворачивание ротора на угол, при котором перекрывается приемник ПДД2. В случае перекрытия пластиной приемников ПДД2 и ПДД3, управляющим устройством формируются сигналы управляющие инвертором на обратное поворачивание ротора на величину угла, при котором приемник ПДД3 перейдет в открытое состояние.

Следовательно, после остановки двигателя ротор, а также и коленчатый вал двигателя будут находиться в заданном угловом положении, при котором край пластины датчика диапазона будет расположен между приемниками ПДД2 и ПДД3. По истечению заданного промежутка времени после установки приемников ПДД2 и ПДД3 в соответственно перекрытое и открытое состояния, управляющее устройство отключает команды управления инвертором напряжений. При необходимости изменения углового положения коленчатого вала при остановке двигателя следует изменять на роторе место расположения поглощающей пластины.

Таким образом, наличие на транспортном средстве с дизельным двигателем интегрированного стартер-генератора позволяет реализовать систему позиционирования вала двигателя при его выключении, что в целом облегчает режим работы аккумуляторной батареи и дает возможность уменьшения ее емкости.

Библиографический список

1. Воронин, С.Г. Стартер-генератор для дизельной силовой установки / А.И. Согрин, П.О. Шабуров, Б.Д. Шумаков // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 25–29.

2. Пат. 134368 Российской Федерации, МПК H02K 1/27, H02K 21/22, H02K 29/06. Стартер-генератор транспортного средства / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, П.О. Шабуров, Б.Д. Шумаков, Б.А. Мурдасов, В.И. Кислицын. – № 2013116048/07; заявл. 09.04.2013; опубл. 10.11.2013. Бюл. № 31. – 12 с.

3. Пат. 129316 Российской Федерации, МПК H02K 29/06. Электросистема пуска-останова двигателя внутреннего сгорания / Б.Д. Шумаков, А.И. Согрин, П.О. Шабуров. – № 2012156155/07; заявл. 24.12.2012; опубл. 20.06.2013. Бюл. № 17 – 15 с.

К содержанию

УДК 621.314:537.6/.8

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРИЖДЫ ЧЕТЫРЕХФАЗНОМ КОМПЕНСИРОВАННОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Н.Ю. Башмакова

Представлена модель трижды четырехфазного компенсированного преобразователя. Приведены результаты сравнения показателей качества электроэнергии для четырехфазного и трижды четырехфазного компенсированных преобразователей. Приведены временные диаграммы и спектральные характеристики трижды четырехфазного преобразователя.

Ключевые слова: компенсированный преобразователь; двойная частота; показатели качества; спектральные характеристики; гармоники.

Для улучшения показателей качества в системах электроснабжения и для улучшения электромагнитной совместимости с питающей сетью осуществляют переход к многофазным схемам преобразователей. Широкое распространение в настоящее время получили многофазные компенсированные преобразователи. Использование таких преобразователей позволяет обеспечить необходимую степень компенсации потребляемой им из сети переменного тока реактивной мощности, а также достаточный уровень снижения гармонического воздействия на питающую сеть.

Многофазные преобразователи, в данном случае двенадцатифазные, выполняются чаще всего на основе четырех трехфазных элементарных преобразователей (преобразователи типа 4х3), соединенных по нулевым или мостовым схемам.

Обычно конденсаторы компенсирующих устройств включают на одно-, двух-, трех-, четырех, пяти- и шестикратную частоту, однако повышение частот приводит к раннему возникновению повторной проводимости вентилей при диодном исполнении.

Решением в данной ситуации является использование компенсированного преобразователя с двойной частотой напряжения на конденсаторах. Но в преобразователях (4х3) это связано с необходимостью установки значительной мощности трехфазных реакторов и с существенным отличием формы кривой напряжения на конденсаторах от синусоидальной.

В докладе рассматриваются характеристики двенадцатифазного компенсированного преобразователя, созданного на основе трех четырехфазных (3х4) с двойной частотой напряжения на конденсаторах [1]. Для обеспечения двенадцатифазного воздействия на питающую нагрузку элементарные преобразователи подключаются к сети со сдвигом на 120 электрических градусов.

При создании модели компенсированного преобразователя был взят следующий вариант исполнения: для всего преобразователя используется единый трехфазный магнитопровод. При этом четырехфазные системы вторичных напряжений каждого элементарного преобразователя создаются соединением вентильных обмоток с использованием деления обмоток одного стержня пополам и других фаз в равносторонний зигзаг. Каждый из элементарных преобразователей содержит компенсирующее устройство в виде двухфазного уравнительного реактора, зашунтированного конденсаторной батареей. Принципиальная схема преобразователя приведена на рисунке 1.

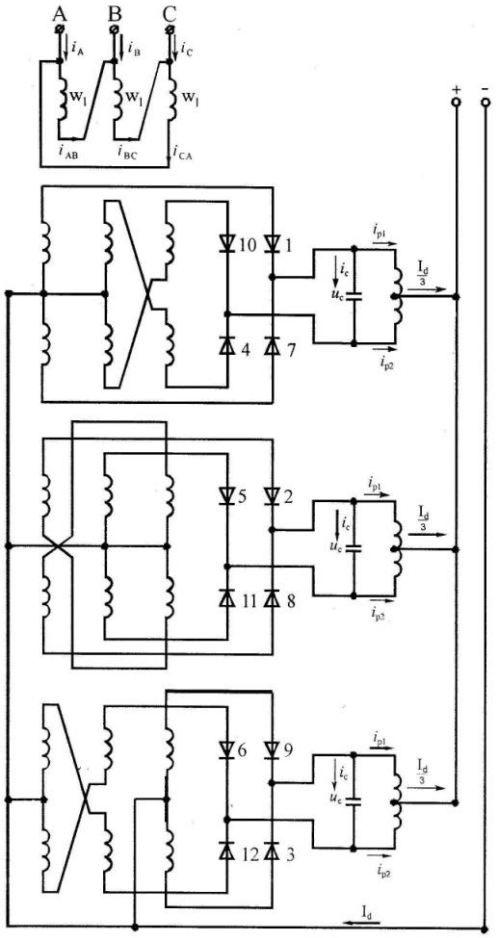


Рис. 3. Схема двенадцатифазного компенсированного преобразователя с единым магнитопроводом трансформатора

В различных двенадцатифазных схемах протекание электромагнитных процессов происходит идентично.

Для исследования гармонического состава трижды четырехфазного компенсированного преобразователя в пакете MATLAB [4] была разработана модель, представленная на рисунке 2.

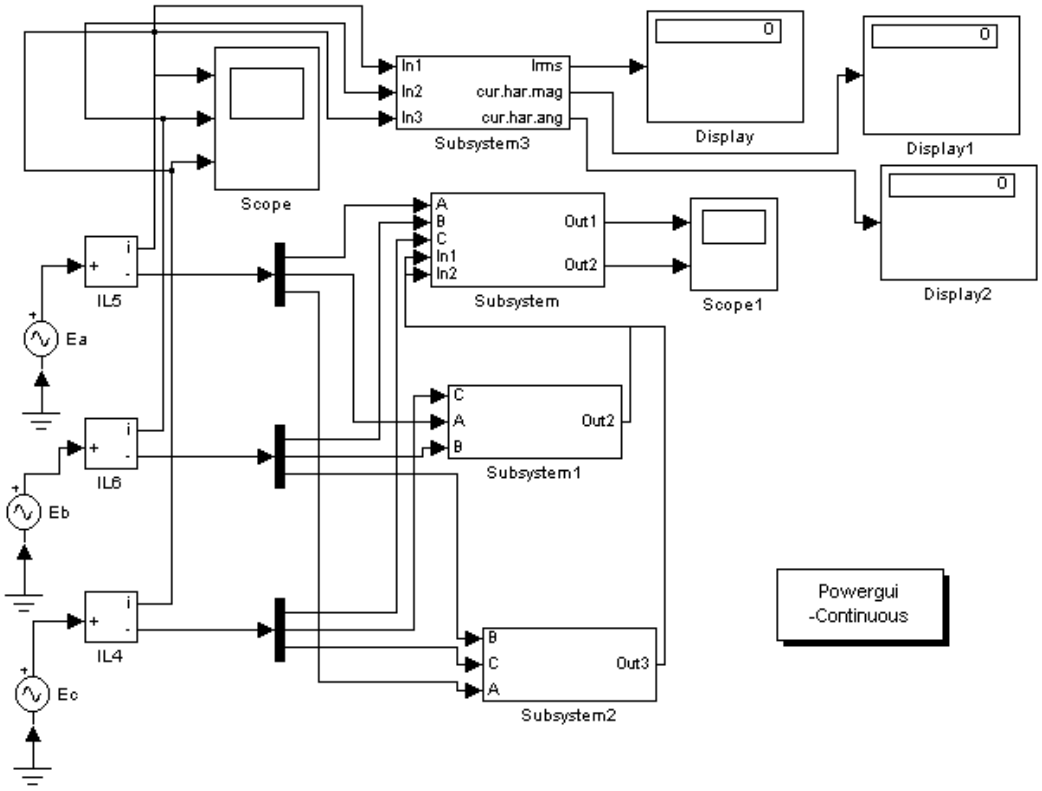


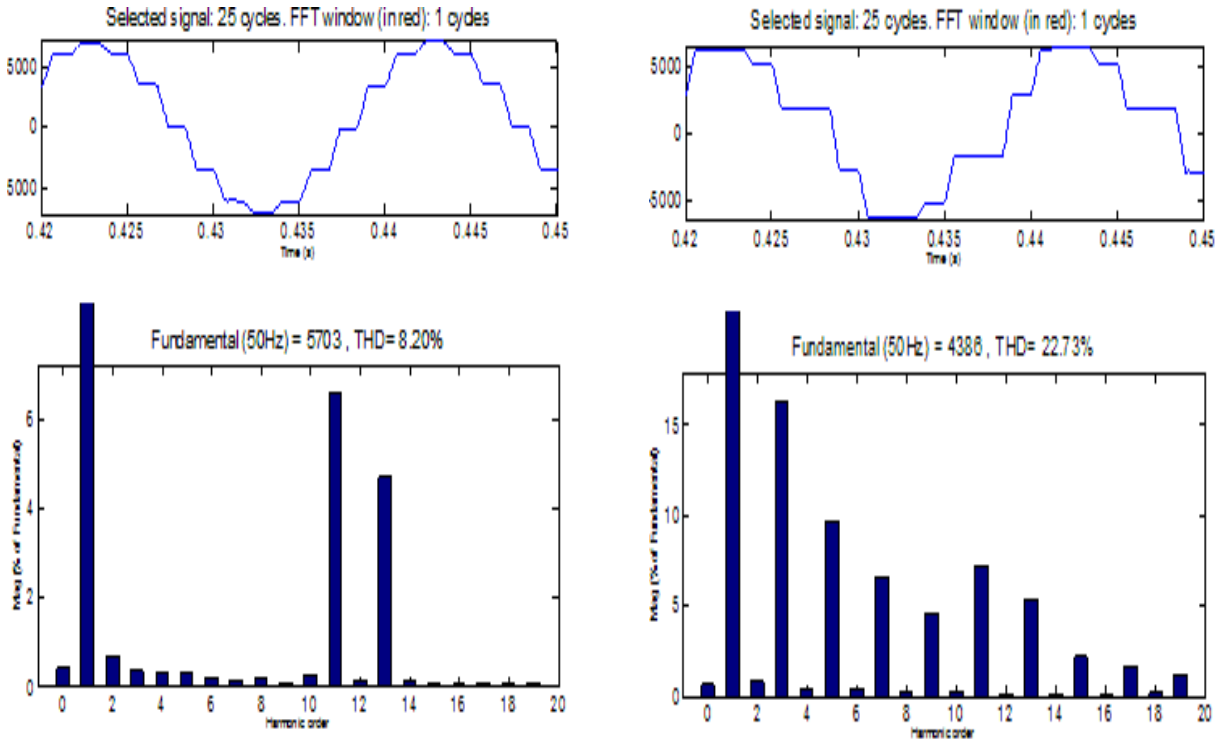
Рис. 4. Модель трижды четырехфазного компенсированного преобразователя

На рисунке 2 приведена модель двенадцатифазного компенсированного преобразователя, созданного на основе трех четырехфазных преобразователей.

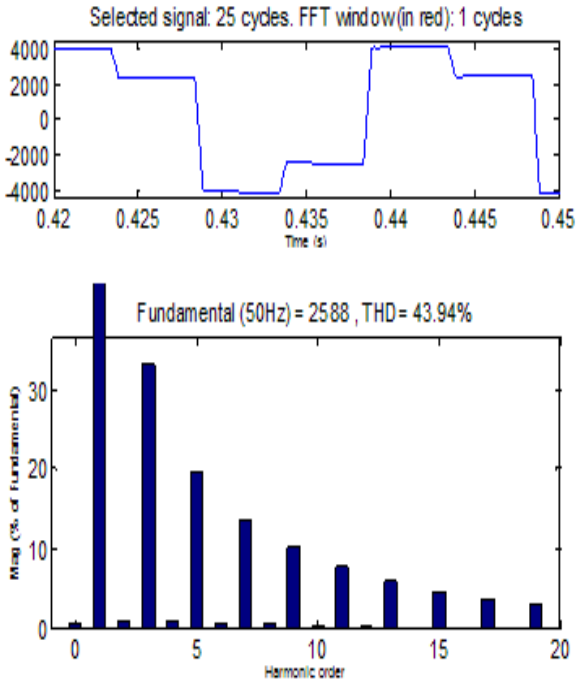
Схемами соединения вентильных обмоток блоков обеспечен сдвиг коммутационных процессов в вентилях блоков на 120 электрических градусов. В результате трижды четырехфазный преобразователь работает в двенадцатифазном режиме.

Проведем исследование системы по качеству электроэнергии по коэффициенту гармоник тока сети или коэффициенту искажения синусоидальности кривой тока, отключая последовательно сначала один из трех блоков, а затем два блока. Отключение двух блоков позволяет произвести в двенадцатифазном преобразователе моделирование электромагнитных процессов, аналогичных процессам, происходящим в четырехфазном компенсированном преобразователе.

На рисунке 3 представлены характеристики гармонического воздействия преобразователя на питающую сеть и спектры тока питающей сети компенсированного преобразователя при действии всех блоков и при поочередном отключении сначала одного, а затем двух из них.



(а) (б)



(в)

Рис. 5. Спектры тока питающей сети (а) двенадцатифазного КП (3х4), (б) двенадцатифазного КП (2х4), (в) двенадцатифазного КП (1х4)

Для анализа гармонического состава любого сигнала трижды четырех-фазного компенсированного преобразователя был применен блок Powergui-Continuous и его раздел FFT Analysis, который располагается в библиотеке приложения Simulink.

Из представленных выше рисунков видно, что происходит уменьшение коэффициента гармоник сетевого тока при увеличении фазности преобразователя: со значения 43,94 % – в модели (1х4), до 22,73 % – в модели (2х4), а затем до 8,2 % – в модели (3х4).

Таким образом, увеличение фазности компенсированного выпрямителя позволяет добиться уменьшения коэффициента гармоник тока [3] и отсутствия нечетнократных трем гармоник.

В двенадцатифазном компенсированном преобразователе содержится первая гармоника и высшие гармоники, имеющие порядок гармоник 12к±1 (к=0, 1, 2, 3, …).

Проведенные аналитические исследования и результаты моделирования электромагнитных процессов в системах электроснабжения с рассматриваемыми преобразователями позволяют сделать следующие выводы:

1. Трижды четырехфазные преобразователи имеют симметричные формы кривых токов А, В и С питающей сети, поскольку симметричные системы гармоник нечетнократных трем, создаваемые отдельными четырехфазными компенсированными преобразователями, компенсируются.

2. Исследования трижды четырехфазных компенсированных преобразователей с различными вариантами получения четырехфазных систем напряжения в блоках показали идентичность протекания электромагнитных процессов в них, причем основные характеристики преобразователей описываются единой теорией схем с одноступенчатой искусственной коммутацией при величине схемного параметра, равного $\pi/2$.

3. Проведенный спектральный анализ подтверждает отсутствие в спектре токов трехфазной сети двенадцатифазного компенсированного преобразователя симметричных составляющих токов гармоник, нечетнократных трем и их присутствие в спектре тока в сети при отключении сначала одного, а затем двух блоков, моделирующих простейшие четырехфазные компенсированные преобразователи.

4. Результаты исследования разработанной модели полностью совпадают с результатами, полученными аналитическим путем и с помощью физической модели [2].

Библиографический список

1. Хохлов, Ю.И. Моделирование электромагнитных процессов в четырехфазном компенсированном преобразователе с двойной частотой напряжения на конденсаторах в пакете Matlab/Simulink / Ю.И. Хохлов, Е.Г. Ашамо // Электрика. – 2006. – № 2. – С. 39–42.

2. Хохлов, Ю.И. Тиристорный выпрямительный агрегат в режимах потребления и генерирования реактивной энергии в условиях электролиза алюминия / Ю.И. Хохлов, Н.Ю. Башмакова, М.А Дзюба // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 7. – № 12. – С. 7–12.

3. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетнократных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995. – 335 с.

4. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab. SmPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – ДМК Пресс, Питер, 2008. – 288 с.

К содержанию

УДК 621. 314.2 + 621.311

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ЗОНЫ НАГРУЗОК ДЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ФОРСИРОВАННОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

Г.С. Валеев, Р.Г. Валеев, Э.М. Зайнашев, М.Ю. Никитина

Представлены основные положения методики технико-экономического обоснования зоны электрических нагрузок предприятий, при которых на главных понизительных подстанциях целесообразно устанавливать трансформаторы с форсированной системой охлаждения.

Ключевые слова: подстанция, системы электроснабжения, силовые трансформаторы с форсированной системой охлаждения.

Известно, что трансформаторы, устанавливаемые на главных понизительных подстанциях (ГПП) предприятий, являются наиболее дорогими из аппаратов, применяемых в системах электроснабжения (СЭС). Поэтому на стадии проектирования СЭС выбор таких аппаратов должен быть тщательно обоснован. Так, при выборе их номинальной мощности $S_{т.ном}$, следует учитывать возможность систематических перегрузок при относительно непродолжительных набросах нагрузок, обусловленных технологическими процессами. Кроме того, необходимо учитывать и возможность отключения части электроприемников при аварийных отключениях одного из двух взаимно резервированных трансформаторов, если суммарный ущерб при этом не будет превышать дополнительных финансовых затрат, связанных с применением в СЭС трансформаторов с большей номинальной мощностью. Отметим, что шкала номинальных мощностей трансформаторов, выпускаемых отечественной промышленностью, до 100 МВА имеет достаточно большую дискретность, равную 1,6, т.е. близлежащие номинальные мощности трансформаторов различаются в 1,6 раза. Вследствие этого значительно различаются и их стоимости. Так по данным [1], стоимость трансформаторов с расщепленными обмотками и РПН с увели-

чением номинальной мощности в 1,6 раза при $U_{вн}$ = 35 кВ возрастает в 1,44 раза, при $U_{вн}$ = 110 кВ – в 1,3. В денежном выражении стоимость трансформаторов, например типа ТРДН-40/110 и ТРДН-25/110, различаются приблизительно на 2,5–3 млн руб. При установке двух трансформаторов на ГПП эта разница составит 5–6 млн руб.

Во избежание таких больших дополнительных капитальных вложений в СЭС и в то же время обеспечения электроэнергией всех потребителей I и II-й категории по надежности электроснабжения при внезапных и плановых отключениях одной из двух взаимно резервированных цепей, можно использовать трансформаторы с форсированной системой охлаждения, выпуск которых налажен отечественной промышленностью.

Известно, что основным отличием таких трансформаторов от трансформаторов с другими системами охлаждения, которые с целью краткости изложения далее будем называть обычными, является наличие в них системы принудительной циркуляции трансформаторного масла в охлаждающих каналах активной части трансформатора. Наличие такой системы позволяет увеличивать номинальную мощность трансформатора до величины $S_{т.ном.ф}$, превышающей его проектную мощность $S_{т.ном.пр}$ в 1,6 раза, т.е.на одну ступень. При этом не исключается возможность их послеаварийной перегрузки. Так, например, через трансформатор с форсированной системой охлаждения типа $\text{ТНДЦН} - \frac{25}{16} / 110$ в послеаварийном режиме можно пропустить мощность, равную $S_{п/ав.доп} = K_{з.т.п/ав.доп} \cdot S_{т.ном.ф}$, что превышает проектную мощность трансформатора, равную 16 МВА почти в 2,2 раза. Стоимость таких трансформаторов будет больше стоимости обычных двухобмоточных трансформаторов с такой же проектной мощностью, но значительно меньше стоимости обычного трансформатора следующего номинала. В противном случае потребность в трансформаторах с форсированной системой охлаждения отпадает.

Вполне очевидно, что при незначительных ущербах, обусловленных недоотпуском потребителю электроэнергии в периоды плановых и аварийных ремонтов с отключением одной из двух цепей питания ГПП, применение трансформаторов, как с форсированной системой охлаждения, так и обычных с большей номинальной мощностью будет не выгодно.

Следует отметить, что длительная работа трансформаторов с включенной в работу форсированной системы охлаждения нежелательна, так как при этом в трансформаторах существенно возрастают потери энергии. Поэтому нетрудно предположить о том, что при превышении нагрузки определённого уровня приведенные годовые затраты на систему электроснабжения с такими трансформаторами могут превысить затраты на систему электроснабжения с трансформаторами без форсированной системы охлаждения, но с большей проектной мощностью.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно утверждать о существовании определенного диапазона нагрузок, в пределах которого применение трансформаторов с форсированной системой охлаждения будет экономически оправдано. Вполне очевидно, что этот диапазон нагрузок будет определяться не только стоимостью трансформаторов, но и другими факторами, такими как тариф на электроэнергию, средняя частота аварийных и плановых отключений, величина удельных ущербов от перерывов электроснабжения, которые, в свою очередь, зависят от рода деятельности предприятий [2–4], параметры силовых трансформаторов, характер графиков нагрузок, протяжённость линий электропередач и т.д. Поэтому поставленная задача универсального решения не имеет. Она должна решаться применительно к конкретным условиям.

Нижний и верхний границы диапазона нагрузок, в пределах которых экономически целесообразно использовать трансформаторы с форсированной системой охлаждения можно найти из равенства годовых затрат на соответствующую пару вариантов СЭС. При этом необходимо рассматривать следующие варианты с установкой на ГПП трансформаторов:

I) обычных с номинальной мощностью $S^{I}_{т.ном.}$, равной проектной мощности трансформатора с форсированной системой охлаждения $S_{т.ном.пр.}$;

II) с форсированной системой охлаждения;

III) обычных с номинальной мощностью $S^{III}_{т.ном.}$, равной номинальной мощности трансформатора с форсированной системой охлаждения при работе последнего с включенной в работу указанной системой охлаждения $S_{т.ном.ф}$.

Нижняя граница искомого диапазона нагрузок определяется из равенства приведенных годовых затрат на первый и второй варианты, а верхняя – на второй и третий.

Запишем расчетные выражения для определения ежегодных приведенных затрат для указанных вариантов в предложении, что строительство будет реализовано в течение одного года. При этом не будем учитывать стоимость коммутационных аппаратов, установленных на ГПП, так как во всех вариантах они будут практически одинаковы. Поскольку в третьем варианте с обычными трансформаторами, с номинальной мощностью $S^{III}_{т.ном.} = S_{т.ном.ф.}$, токи короткого замыкания на стороне низкого напряжения ГПП будут заметно больше, по сравнению с двумя первыми, в затратах на третий вариант следует учитывать возможное изменение сечений отдельных кабельных линий, вызванных протеканием по ним больших токов коротких замыканий, а также изменение потерь энергии в указанных кабелях.

С учетом изложенного годовые приведенные затраты на реализацию вышеуказанных вариантов схем СЭС с установкой на ГПП различных трансформаторов рассчитываются по нижеследующим выражениям:

$$З^{I}_{г.\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} E_{н.\Sigma.i} \cdot K^{I}_{i} + И^{I}_{п.э} + У^{I}; \quad (1)$$

$$З^{II}_{г.\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} E_{н.\Sigma.i} \cdot K^{II}_{i} + И^{II}_{п.э}; \quad (2)$$

$$З^{III}_{г.\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} E_{н.\Sigma.i} \cdot K^{III}_{i} + И^{III}_{п.э}, \quad (3)$$

где $E_{н.\Sigma.i}$ – суммарный коэффициент отчислений от капиталовложений на i-й элемент СЭС, численные значения которых принимаются по данным, приведенным в [4], 1/год; K_i – капитальные вложения на i-й элемент СЭС с учётом строительной части и монтажа в ценах текущего года на момент проведения расчётов, руб; $И_{п.э}$ – стоимость годовых потерь электроэнергии в элементах сети, руб/год; У – ущерб, обусловленный аварийными и плановыми отключениями элементов СЭС внешнего электроснабжения, руб/год.

Отметим, что надстрочные индексы переменных, входящих в состав выражений (1)–(3), обозначенные римскими цифрами, означают номер варианта схемы.

Стоимость годовых потерь электроэнергии в элементах сети рассчитывается по выражению:

$$И_{п.э} = C_0 \cdot \Delta W_{год}, \quad (4)$$

где C_0 – стоимость одного кВт·ч электроэнергии, руб/кВт·ч;·$\Delta W_{год}$ – суммарные годовые потери электроэнергии в элементах сети, кВт·ч/год.

Значение годового ущерба, обусловленного плановыми и аварийными отключениями элементов СЭС, может быть определено с использованием удельных ущербов, приходящихся на каждый кВт·ч недополученной потребителем электроэнергии, значения которых приводятся в учебной и справочной литературе [2–4]. Учитывая то, что в справочной литературе не приводятся дифференцированные по типам трансформаторов статистические данные по их аварийности и плановым ремонтам, примем условие равной надёжности рассматриваемых типов трансформаторов. При этом условии можно принять рассматриваемые варианты схем равнонадёжными. Поэтому при определении ущербов можно учитывать лишь его составляющую, обусловленную ограничением подачи потребителю электроэнергии в режимах простоя одной из двух взаимно резервированных цепей передачи. По этой же причине потери электроэнергии в элементах схемы учитываются только в режимах простоя одной из цепей.

При изменении нагрузки в пределах от нуля до значения, равного $S_{п/ав.доп.}$, во втором и третьем вариантах в режиме простоя одной из двух цепей ограничения в подаче электроэнергии потребителю не будет. Поэтому в выражениях (2) и (3) отсутствует составляющая, учитывающая ущерб.

Учитывая вышеизложенное, годовой ущерб может быть определён по формуле [4]:

$$У = у_{уд.ав} \cdot \overline{W}_{нед.п/ав} + у_{уд.пл.откл} \cdot \overline{W}_{нед.пл.откл}, \quad (5)$$

где $у_{уд.ав}$, $у_{уд.пл.откл}$ – удельные ущербы, обусловленные соответственно аварийными и плановыми отключениями, руб/кВт·ч; $\overline{W}_{нед.п/ав}$, $\overline{W}_{нед.пл.откл}$ – среднегодовые значения недополученной потребителем энергия соответственно при послеаварийных и плановых простоях одной из взаимно резервированных цепей передачи, кВт·ч/год.

Среднегодовые значения недополученной потребителем энергии в периоды аварийных и плановых простоев одной из цепей находятся с использованием годовых упорядоченных графиков нагрузки потребителя, смоделированных с помощью типовых графиков, приводимых в справочниках для соответствующей отрасли производства, и рассчитываются по следующим выражениям:

$$\overline{W}_{нед.п/ав} = \frac{2\overline{T}_{в.ц}}{8760} \cdot W_{1.год} = 2\overline{k}_{в.пр.ц} \cdot W_{1.год}, \quad (6)$$

$$\overline{W}_{нед.пл.откл} = \frac{2\overline{T}_{пл.ц}}{8760} \cdot W_{1.год} = 2\overline{k}_{пл.пр.ц} \cdot W_{1.год}, \quad (7)$$

где $\overline{T}_{в.ц}, \overline{T}_{пл.ц}$ – среднегодовое время соответственно аварийного и планового простоя одной цепи передачи, час; $W_{1.год}$ – недополученная потребителем энергия при условии питания его через один трансформатор в течение всего года (промежуточная расчётная величина), кВт·ч/год; $\overline{k}_{в.пр.ц}$, $\overline{k}_{пл.пр.ц}$ – среднегодовые коэффициенты аварийного и планового простоев одной цепи.

Численные значения среднегодового времени аварийного и планового простоев рассчитываются по формулам:

$$\overline{T}_{в.ц} = \sum_{i=1}^{n_ц} \overline{\omega}_i \cdot \overline{t}_{в.i}, \quad (8)$$

$$\overline{T}_{пл.ц} = \frac{1}{T_{р.ц}} \sum_{j=1}^{m} \overline{t}_{пл.max.j}. \quad (9)$$

Здесь $\overline{\omega}_i$ – среднегодовая частота отказов i-го элемента, 1/год; $n_ц$ – число элементов в одной цепи; $\overline{t}_{в.i}$ – среднее время аварийного восстановления

i-го элемента, час; $T_{р.ц}$ – время одного ремонтного цикла равное наименьшему общему кратному междуплановых ремонтных периодов элементов одной цепи, лет; m – число остановок на плановый ремонт в течение одного ремонтного цикла; $\bar{t}_{пл.max.j}$ – максимальная продолжительность планового ремонта при j-й остановке при условии совмещения во времени ремонтов нескольких элементов, час.

Промежуточная расчётная величина $W_{1.год}$ определяется с использованием упорядоченного годового графика активной нагрузки предприятия по формуле:

$$W_{1.год} = \sum_{i=1}^{L} \left(P_i - P_{т.пр.доп} \right) \cdot \Delta t_i , \qquad (10)$$

где P_i – значение активной мощности на i-й ступени упорядоченного годового графика, кВт; $P_{т.пр.доп}$ – предельная активная мощность, которая может быть пропущена через трансформатор с учётом допустимой его перегрузки в послеаварийном режиме, кВт; L – число ступеней упорядоченного графика нагрузки, при которых соблюдается условие $P_i > P_{т.пр.доп}$; Δt_i – длительность i-й ступени графика, час/год.

При нагрузках, превышающих пропускную способность трансформатора в послеаварийных режимах, часть нагрузки следует отключать. Тогда предельную активную мощность, которую можно пропустить через трансформатор в послеаварийном режиме, найдём путём вычитания из расчётной активной мощности предприятия $P_р$ её части $P_{откл}$, подлежащей отключению, т.е. $P_{т.пр.доп} = P_р - P_{откл}$.

Численное значение мощности, подлежащей отключению, находится путём решения уравнения:

$$K_{з.т.п/ав.доп} \cdot S_{т.ном} = \sqrt{\left(P_р - P_{откл} \right)^2 + \left(Q_{э.с} - \Delta Q_{т.пр.ц} - P_{откл} \cdot tg\varphi_{откл} \right)^2} , \qquad (11)$$

где $K_{з.т.п/ав.доп}$ – допустимый коэффициент загрузки трансформатора в послеаварийном режиме; $Q_{э.с}$ – экономически обоснованная величина реактивной мощности, которая может быть передана к шинам высшего напряжения ГПП в часы прохождения максимума активной нагрузки энергосистемы, квар; $\Delta Q_{т.пр.ц}$ – потери реактивной мощности в трансформаторе ГПП в режиме простоя одной цепи, квар; $tg\varphi_{откл}$ – коэффициент реактивной мощности отключаемой части нагрузки, при отсутствии данных для его определения можно принять $tg\varphi_{откл} = tg\varphi_р = Q_р/P_р$.

Численные значения экономически обоснованной величины реактивной мощности и потерь реактивной мощности в трансформаторе ГПП в режиме простоя одной цепи рассчитываются по следующим выражениям:

$$Q_{э.с} = P_р \cdot tg\varphi_{норм}; \quad (12)$$

$$\Delta Q_{т.пр.ц} = \frac{S_{т.ном}}{100\%}\left(I_{хх}\% + K^2_{з.т.п/ав.доп} \cdot U_к\%\right). \quad (13)$$

где $tg\varphi_{норм}$ – нормированное значение коэффициента реактивной мощности, задаваемое энергосистемой; $I_{хх}$, $U_к$ – паспортные значения тока холостого хода и напряжения короткого замыкания.

Как было отмечено выше нижняя граница искомого диапазона нагрузок определяется из равенства приведенных годовых затрат на первый и второй варианты, а верхняя – на второй и третий. Поэтому для решения поставленной задачи следует, используя вышеприведенные формулы рассчитать и построить эти зависимости для всех трёх вариантов и найти точки их пересечения, определяющие нижнюю и верхнюю границу искомой зоны нагрузок.

Библиографический список

1. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию: В 2 т. Т.1. Электроснабжение / под общ. ред. А.А. Фёдорова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

2. Электротехнический справочник: В 3 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 10-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 964 с.

3. Китушин, В.Г. Надёжность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие / В.Г. Китушин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2003. – 256 с.

4. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

К содержанию

УДК 621.316.925

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,4 кВ

А.М. Ершов, И.А. Крутов

Рассмотрены варианты релейной защиты трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ со стороны высшего и низшего напряжения силового трансформатора с использованием плавких предохранителей, устройств защиты типов VIP30, Sepam 10, Sepam T20 и автоматических выключателей типа Masterpact и Compact. Проанализированы возможные направления оптимизации параметров релейной защиты силового трансформатора, позволяющие снизить значения уставок токов и времени при отключении коротких замыканий.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция напряжением 10/0,4 кВ; релейная защита; оптимизация параметров защиты.

Задачи исследования. Методика расчета уставок защиты не зависит от вида исполнения устройств релейной защиты, которые в общем случае могут быть электромеханическими, статическими или микропроцессорными (цифровыми). От вида исполнения зависят значения различных коэффициентов (отстройки, включения, надежности согласования и др.), ступеней селективности по току, времени и прочее. Время-токовые характеристики защит разных уровней системы электроснабжения на карте селективности могут быть «разбросаны» на неоправданно «большое расстояние» друг от друга [1–3]. Это отрицательно сказывается на временах и токах срабатывания, коэффициентах чувствительности, что приводит к возрастанию времени протекания тока короткого замыкание через оборудование и, соответственно, термического действия этого тока, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на сроке службы оборудования.

Появление микропроцессорных устройств релейной защиты с большим набором вариантов настройки и широким спектром параметров дало возможность для оптимизации всей системы релейной защиты.

Задачей нашей оптимизации является приближение время-токовых характеристик защит разных уровней системы электроснабжения друг к другу и, соответственно, сокращение времени и токов срабатывания этих защиты.

Возможные варианты исполнения защиты трансформаторной подстанции (ТП) напряжением 10/0,4 кВ (рис. 1).

1. На стороне высшего напряжения силового трансформатора могут быть установлены: плавкий предохранитель F1; микропроцессорные устройства защиты типа VIP-30, Sepam 10, Sepam T20.

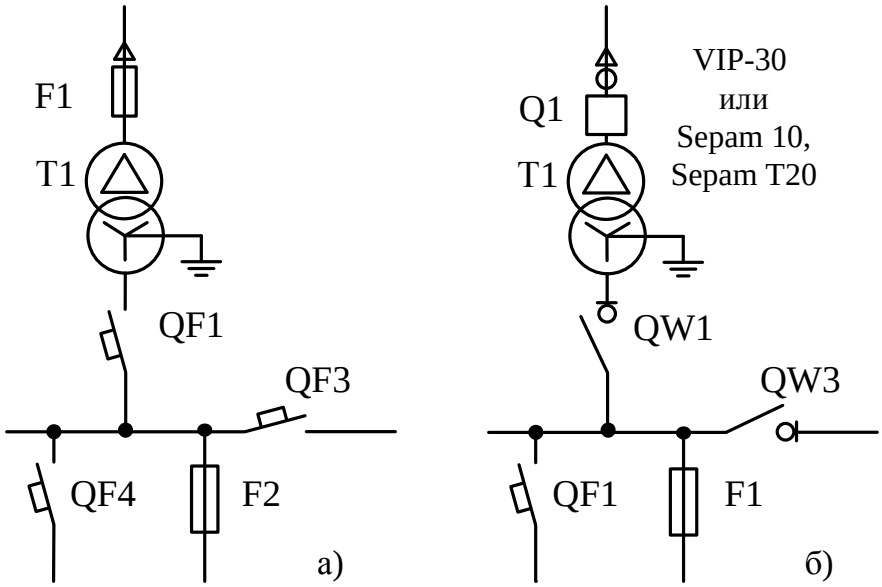


Рис. 1. Варианты защиты трансформаторной подстанции

2. На стороне низшего напряжения силового трансформатора в качестве вводных (QF1 и QF2) и секционного (QF3) аппаратов могут быть использованы автоматические выключатели типа Compact и Masterpact с электронными расцепителями серии Micrologic (рис. 1, а). В последнее время в качестве этих коммутационных аппаратов стали широко применять выключатели нагрузки QW1–QW3 – рис. 1, б. Для защиты отходящих от ТП линий применяют плавкие предохранители F или автоматические выключатели QF.

3. Для питания трансформаторной подстанции используются воздушные или кабельные линии W1, вначале которых устанавливаются вакуумные выключатели с микропроцессорными устройствами защиты Sepam типа S20.

Рассмотрим организацию защиты трансформаторной подстанции напряжением 10/0,4 кВ с питающей линией, которая состоит из пяти уровней – рис. 2:

– для защиты линии в её начале устанавливается устройство защиты Sepam типа S20, которое имеет две ступени защиты – селективную защиту с зависимой от тока выдержкой времени (СЗ/В) и мгновенную токовую отсечку (МТО). Кроме того, в начале линии устанавливается защита от однофазных замыканий на землю в виде селективной токовой отсечки (СТО);

– для защиты силового трансформатора перед ним устанавливается устройство защиты Sepam типа T20, которое имеет три ступени защиты – защиту от перегрузки (ЗП), селективную токовую отсечку (СТО) и мгновенную токовую отсечку (МТО);

– на стороне низшего напряжения трансформатора устанавливаются вводные (QF1 и QF2) и секционный (QF3) выключатели с электронными расцепителями типа Micrologic, которые, в общем случае, имеют также три ступени защиты – защиту от перегрузки (ЗП), селективную токовую отсечку (СТО) и мгновенную токовую отсечку (МТО);

– отходящие от ТП линии могут защищаться плавкими предохранителями или автоматическими выключателями типа Compact с электронными расцепителями, чаще имеющими две ступени защиты – защиту от перегрузки и мгновенную токовую отсечку.

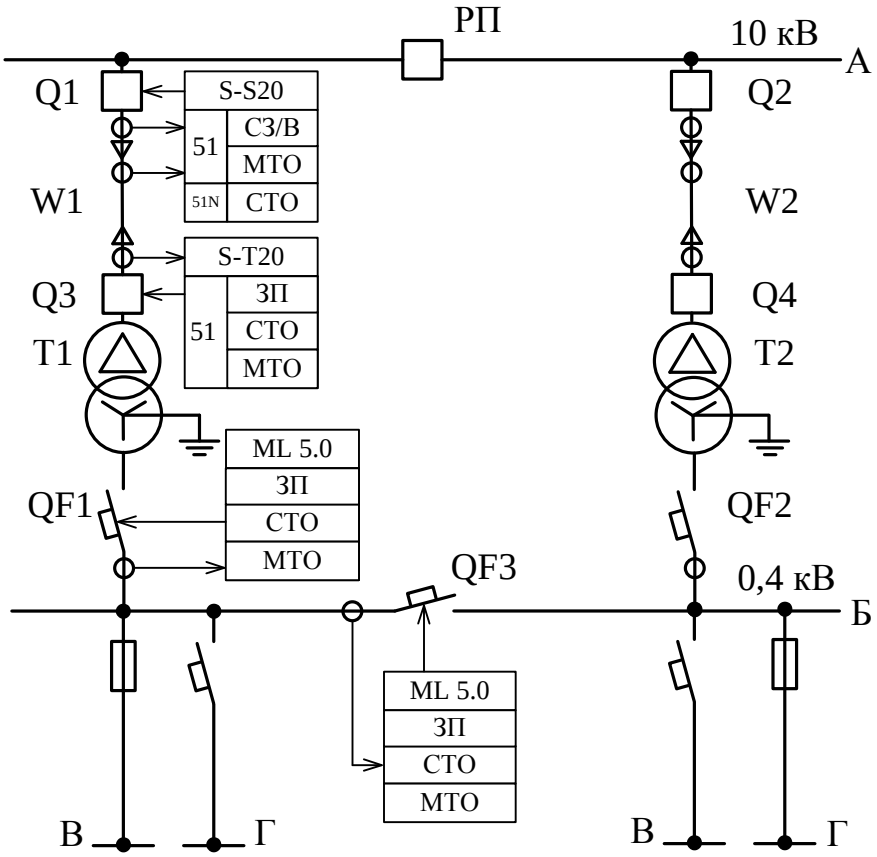


Рис. 2. Расстановка средств защиты трансформаторной подстанции

На рис. 3, а приведены время-токовые характеристики (ВТХ) защит, установленных на трёх уровнях – на вводном автоматическом выключателе QF1, на стороне высшего напряжения трансформатора на выключателе Q3 и в начале питающей линии W1 на выключателе Q1. Здесь видно, что ВТХ защит на выключателях QF1 и Q3 максимально приближены друг к другу, так как они идентичны. А ВТХ защиты на выключателе Q1 в начале линии «удалена» от первых двух ВТХ. Это обусловлено, во-первых, тем, что защита СЗ/В на выключателе Q1 имеет зависимую от тока выдержку времени, плохо согласующуюся с независимой ВТХ селективной токовой отсеч-

ки, установленной на выключателе Q3, во-вторых, уставки тока и времени определены по традиционной методике – ток $I_{С.СЗ.Q1}$ отстроен от тока $I_{С.СЗ.Q3}$, а время срабатывания $t_{С.СЗ.Q1}$ отличается от времени $t_{С.СЗ.Q3}$ на ступень селективности $\Delta t = 0{,}3$ с, причём уставка времени $t_{С.СЗ.Q1}$ задана при десятикратном значении уставки тока срабатывания этой защиты $10 \cdot I_{С.СЗ.Q1}$. Суть оптимизации параметров защиты заключается в том, что бы подвинуть время-токовую характеристику Q1 вниз и влево (рис. 3, а), тем самым уменьшив времена и токи срабатывания защиты, установленной на выключателе Q1.

Для оптимизации защиты можно выполнить два шага [4, 5].

На первом шаге (рис. 3, б) характеристику Q1 опускаем вертикально вниз, так чтобы разница времени между точкой Б селективной токовой отсечки и точкой В селективной защиты была равна ступени селективности $\Delta t = 0{,}3$ с. В результате этого шага получим значительное уменьшение времени срабатывания защиты на выключателе Q1 по сравнению со стандартным расчетом.

На втором шаге (рис. 3, в) характеристику Q1 сдвигаем горизонтально влево, так чтобы ток срабатывания в точке А селективной токовой отсечки и ток срабатывания в точке Г селективной защиты отличались на коэффициент отстройки $К_{ОТС} = 1{,}2–1{,}3$. В результате этого шага получим значительное уменьшение токов срабатывания защиты на выключателе Q1 по сравнению со стандартным расчетом.

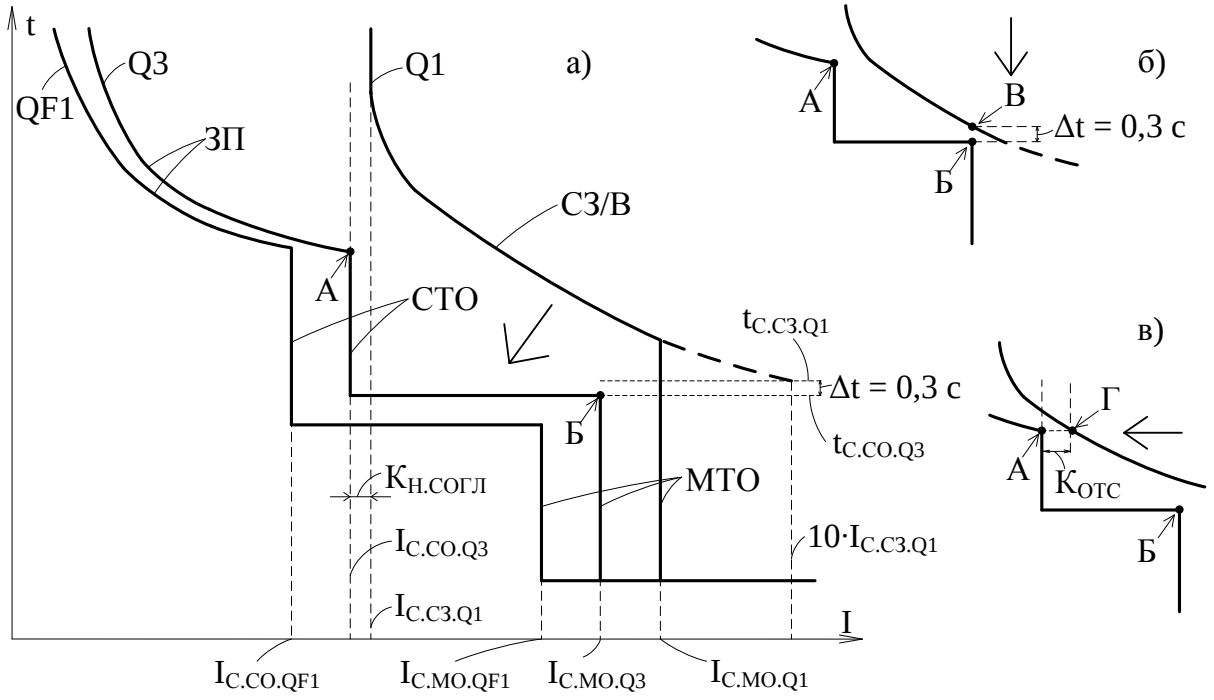


Рис. 3. Оптимизация время-токовой характеристики защиты Sepam S20

Затем из полученных результатов выбираем тот вариант, который имеет лучшие характеристики по времени срабатывания, так как чем быстрее мы отключим ток короткого замыкания, тем меньше будут разрушения в месте повреждения.

Выводы

В результате оптимизации должны получить следующие результаты:

1. Уменьшение времени срабатывания защиты, установленной на выключателе Q1, благодаря этому снизится длительность протекания токов короткого замыкания и, следовательно, и их термическое воздействие на токоведущие части и изоляцию. Благодаря этому можно продлить срок службы электрооборудования.

2. Благодаря снижению уставок времени и тока защиты, установленной на выключателе Q1, можно снизить соответствующие уставки на защитах, установленных на более высоких уровнях системы электроснабжения.

Библиографический список

1. Шабад, М.А. Защита трансформаторов 10 кВ / М.А. Шабад. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 144 с.

2. Соловьев, А.Л. Методика расчета уставок защит Sepam / А.Л. Соловьев // Техническая коллекция Schneider Electric, вып. 3. – Schneider Electric, 2006. – 68 с.

3. Соловьёв, А.Л. Изменение стандарта МЭК для цифровых терминалов токовых защит с зависимой характеристикой / А.Л. Соловьёв // Энергетик. – 2010. – № 1. – С. 35–37.

4. Ершов, А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 2: Защита электрических сетей напряжением до 1 кВ / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 168 с.

5. Ершов, А.М. Релейная защита и автоматика в системах электроснабжения. Часть 3: Защита электрических сетей напряжением 6–10 кВ: учебное пособие / А.М. Ершов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – 161 с.

К содержанию

УДК 621.311.1 + 621.316.542

ПРИМЕНЕНИЕ ОГРАНИЧИТЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, ЗАПИТАННЫХ ЧЕРЕЗ ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ

В.В. Пястолов, О.А. Бердюгин

Проведен расчет ожидаемых величин перенапряжений, появляющихся при коммутации электрических цепей вакуумными выключателями. Определены условия необходимости установки ограничителей перенапряжения нелинейных на линиях, питающих силовые трансформаторы.

При коммутации электрических цепей выключателями часто возникают перенапряжения, которые называются коммутационными. Наиболее опасны те случаи, когда проводится отключение цепей, содержащих значительные индуктивности, выключателями, обладающими высокой отключающей способностью. В данную группу коммутаций следует отнести отключение ненагруженных трансформаторов, электродвигателей, реакторов. Перенапряжения при таких коммутациях имеют одинаковую природу, вызванную обрывом (срезом – прерывание тока между расходящимися контактами выключателя до естественного перехода его кривой через ноль) тока в выключателе, и связаны со свободными колебаниями, возникающими в процессе обмена энергией между индуктивностью нагрузки и емкость схемы [1–3]. Вакуумный выключатели, это как раз тот аппарат, который обладает наибольшей отключающей способностью [3].

В связи со сказанным, для защиты от возможных перенапряжений, в ячейках с вакуумными выключателями 6…10 кВ со стороны отходящих линий, как правило, устанавливается комплект ограничителей перенапряжения нелинейных (ОПН).

В данной работе авторами сделана попытка оценить условия целесообразности установки ограничителей. С этой целью, для наиболее часто встречающегося варианта схемы (выключатель – кабельная линия – трансформатор) выполним расчет ожидаемых перенапряжений в зависимости от длины кабельной линии и мощности трансформатора. В качестве предшествующего режима примем режим холостого хода трансформатора, так как в этом случае индуктивность цепи будет наибольшая. На рисунке приведена схема замещения электрической цепи при указанных условиях.

На рисунке и в дальнейшем расчете:

$U_Ф$ – фазное напряжение сети;

L – индуктивность схемы, включающая индуктивность намагничивания трансформатора и индуктивность питающего кабеля;

C – емкость кабельной линии и собственная емкость трансформатора.

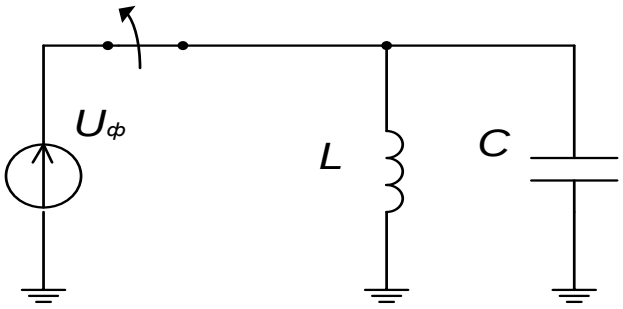


Схема замещения электрической цепи при отключении
линии с ненагруженным трансформатором

В связи с тем, что индуктивность кабельной линии несоизмерима с индуктивностью намагничивания трансформатора, а емкость трансформатора с емкостью линии, малыми величинами в расчете пренебрегаем.

В момент среза тока, энергия, запасенная в индуктивности, может быть посчитана как $W_L = \frac{I_0^2}{2} L$, где I_0 – ток среза, а энергия, запасенная в емкости $W_C = \frac{U_0^2}{2} C$, где U_0 – напряжение на трансформаторе в момент среза тока.

В последующем в LC контуре возникает переходный процесс, при котором происходит обмен энергией между его элементами с частотой $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Через полпериода высокой частоты вся энергия из индуктивности перейдет в емкость, при этом получим:

$$W_{\Sigma C} = W_C + W_L \text{ или } \frac{U_{max}^2}{2} C = \frac{U_0^2}{2} C + \frac{I_0^2}{2} L,$$

где $U_{\max}$ – максимальное напряжение в схеме, которое определим как:

$$U_{max} = \sqrt{{U_0}^2 + \frac{L}{C} {I_0}^2}.$$

Совершенно очевидно, что величина U_{max} зависит от значения U_0, а значит и от величины тока среза. Простейший анализ показывает, что наибольшее значение $U_{max.\,max}$ будет наблюдаться при $U_0 = 0$ или при амплитуде тока намагничивания трансформатора $I_0 = I_{0max}$:

$$U_{max.max} = I_{0max} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

В таблице приведены расчетные значения кратностей перенапряжений в сети 6 кВ в зависимости от длины линии, выполненной кабелем с бумажной пропитанной изоляцией, и мощности трансформатора.

Таблица

Кратности перенапряжений в схеме

Мощность трансформатора, кВА	Длина линии, км									
	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1	0,2	0,5	1
50	8,9	6,3	4,5	3,2	3,2	2,9	2,1	1,5	-	-
100	12,1	8,7	6,1	4,9	4,3	3,9	2,7	1,9	1,2	-
160	15,0	10,6	7,5	6,1	5,3	4,7	3,5	2,5	1,5	1,1
250	18,5	13,1	9,2	7,5	6,5	5,9	4,1	2,9	1,9	1,3
400	21,6	15,3	10,8	8,8	7,7	6,9	4,8	3,2	2,2	1,5
630	22,0	15,5	11,0	9,0	7,8	7,1	5,0	3,5	2,3	1,6
1000	24,2	17,1	12,1	9,0	8,6	7,7	5,5	3,8	2,4	1,7
1600	27,1	19,2	12,6	11,4	9,6	8,6	6,1	4,3	2,7	1,9

Известно, что для сети 6 кВ допустимая кратность перенапряжений составляет 7 для нормальной изоляции и 4,5 для электрооборудования с ослабленной изоляцией [4]. Исходя из сказанного выше, с учетом результатов расчета делаем выводы. При любом сочетании кабель – трансформатор, попадающем в наиболее темный сектор таблицы установка ОПН на отходящей линии обязательна. При любом сочетании кабель – трансформатор, и при условии наличии в схеме ослабленной изоляции, попадающем в любой из затемненных секторов таблицы также необходима установка ОПН.

Проведенные авторами исследования показывают, что применение ОПН в ячейках с вакуумными выключателями на отходящих линиях требуется не в любых случаях. В тоже время мы не рекомендуем пользоваться результатами данной работы, так как наши расчеты проведены для конкретных трансформаторов и конкретного типа кабелей. Мы рекомендуем оценивать ожидаемые перенапряжения в каждом случае и с их учетом принимать решения по установке ОПН.

Библиографический список

1. Техника высоких напряжений / под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989.

2. Базуткин, В.В. Техника высоких напряжений / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с.

3. Перенапряжения в электрических сетях. Проблемы и опыт эксплуатации. Рекомендации по выбору и применению нелинейных ограничителей перенапряжений. – Промышленная группа Таврида Электрик, 2000. – 62с.

4. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений РД 153-34.3-35.125-99.

К содержанию

УДК 621.31:004

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ОБЪЕМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

И.М. Кирпичникова, К.Л. Соломахо

Рассматривается задача прогнозирования объемов потребления электроэнергии на основе данных одного из энергосбытовых предприятий. Решение задачи базируется на создании модели и методики прогнозирования. При построении модели используется метод главных компонент. Анализируется необходимость использования фактора «температура окружающей среды», выявляются основные закономерности изменения объемов потребления электроэнергии.

Ключевые слова: метод главных компонент, прогнозирование объемов потребления электроэнергии.

Задачей энергосбытового предприятия является полное удовлетворение потребностей абонентов, с которыми заключены договора на реализацию электроэнергии. Энергосбытовое предприятие выполняет роль посредника – закупает необходимый объем электроэнергии на оптовом рынке и реализует в розницу. Постоянные изменения на предприятиях, изменения в бытовом секторе оказывают влияние на общее потребление электроэнергии потребителями, что является проблемой энергосбытовых предприятий. Энергосбытовое предприятие должно проводить постоянное исследование изменения потребностей в объемах электроэнергии, для составления как можно более точного прогноза объема электроэнергии для закупа на оптовом рынке [3].

Объем электроэнергии, закупаемый на оптовом рынке, равен спрогнозированному объему. В случае составления неточного прогноза при нехватке или излишне закупленных объемов энергосбытовое предприятие вынуждено докупать либо продавать излишне закупленную электроэнергию по невыгодной для предприятия цене. Финансовые затраты приходится возлагать на покупателей, поднимая цену на электроэнергию. Недовольные потребители в этом случае могут перейти к другому гарантирующему поставщику, для приобретения электроэнергии по более низкой цене. Все это приводит к финансовым потерям гарантирующего поставщика и снижению экономических показателей [1].

Для решения данной проблемы энергосбытовым предприятием нам была поставлена задача в создании модели и методики прогнозирования с высокой скоростью вычисления прогнозных значений и с погрешностью, не превышающей больше заданной величины (3 %).

Такие модели для расчета прогнозов были нами построены и исследованы на данных, накопленных на одном из сбытовых предприятий за год. На предприятии в настоящее время используется устаревшая модель линейного регрессионного анализа, которая учитывает два показателя: температуру окружающей среды и объемы электроэнергии, закупленные на оптовом рынке ранее. Недостаток используемой модели в том, что она при расчете получает погрешность более 4 %, а также подразумевает расчет с помощью ручного труда, и в результате влияния человеческого фактора возможно возникновение ошибок. Кроме того, ручные расчеты приводят к увеличению времени для построения прогноза. В нашей работе предложено построить математическую модель на основе метода главных компонент. Расчеты проводились в программе МИДАС. Исходные данные – объемы закупа электроэнергии на оптовом рынке посуточно за 2013, а также температура окружающей среды города Челябинска посуточно.

После проведения первичной обработки и анализа данных было выявлено, что данные имеют большие различия в рабочие дни, выходные и праздничные. Выявлена общая тенденция энергопотребления: в понедельник – низкое потребление, к среде происходит рост потребления, к пятнице – спад, в выходные и праздничные дни потребление очень низкое. Это связано с большим количеством потребителей – крупных промышленных предприятий [2]. На рис. 1 показано потребление электроэнергии в течение трех недель.

В связи с этим данные были разбиты по дням недели. Для построения было создано 6 моделей. Модели для понедельника, вторника, среды, четверга, пятницы, выходных и праздничных дней. Составлялся прогноз на следующие 24 часа.

В ходе проведенного исследования было выявлено, что в данном случае электропотребление имеет малую зависимость от температуры. Построение прогноза с учетом фактора «температура» дает большую погрешность, чем без учета этого фактора. Погрешность сокращается незначительно, но в данном случае фактор был исключен из расчетов, т. к. в некоторых ситуациях малозначимый фактор может также создавать «шум» в данных. Погрешность считается как средняя абсолютная погрешность в процентах (mean absolute percentage error – MAPE).

Модель с минимальной погрешностью – для дня «четверг», модель с максимально погрешностью – «вторник». День четверга считается устойчивым днем. На промышленных предприятиях с понедельника происходит рост потребления, связанный с нагревами печи, включениями станков, на этом этапе возможны какие-то сбои (поломки станков), к четвергу работа предприятий приходит в стабильную стадию и какие-либо колебания электроэнергии не выявляются. Субботние дни: суббота и воскресенье имеют одинаковые тенденции электропотребления и могут быть объединены в один тип. На рис. 2 – построенный прогноз и фактические значения для четверга.

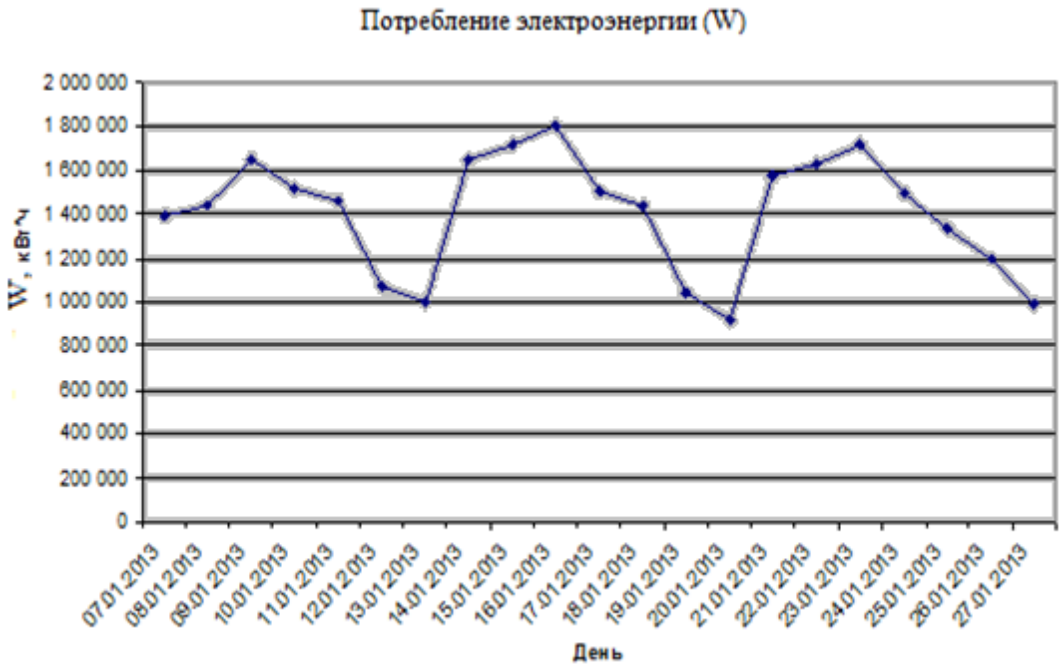


Рис.1. Общее потребление электроэнергии (в кВт·ч) за три недели, начиная с понедельника 07.01.2013

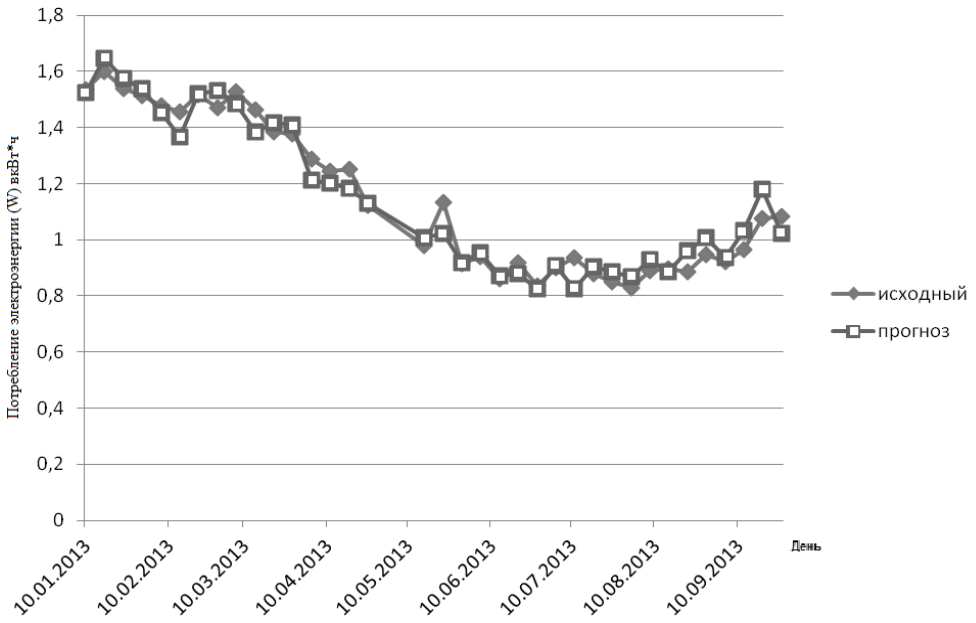


Рис. 2. Полученный прогноз и фактические значения четверга

Однако погрешность остается выше 3 % и необходимо исследовать возможность сокращения погрешности. В ходе работы были исследованы модели почасового прогнозирования, исследовались прогнозы на 1 час, на 2 часа и на три часа. Для примера в таблице представлены погрешности, для дня «понедельник».

Таблица

Сравнение погрешностей

Часы суток	Модель прогноза на 1 час (погрешность MAPE)	Модель прогноза на 2 часа (погрешность MAPE)	Модель прогноза на 3 час (погрешность MAPE)
0–3	3,782	3,613	3,042
3–6	2,046	2,620	1,507
6–9	2,269	2,681	1,869
9–12	3,346	3,121	3,015
12–15	1,620	1,409	0,965
15–18	1,795	1,997	1,464
18-21	3,151	3,238	2,979
21-24	2,861	3,132	2,797

Наиболее удачной признана модель, составления прогноза на следующие 3 часа по имеющимся предыдущим часам и типом матрицы зависимостей – ковариационная. Прогноз для дня «понедельник» на время с 12 до 15 часов приведен на рис. 3.

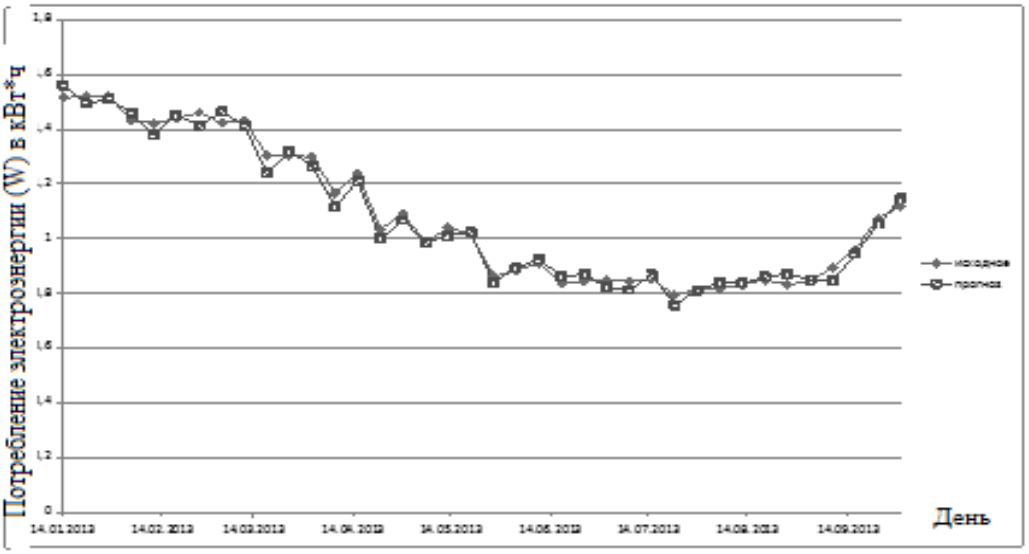


Рис. 3. Полученный прогноз и фактические значения понедельника

Таким образом при разработке модели прогнозирования объемов потребления электроэнергии на данном конкретном предприятии необходимо учитывать:

1. Для построения прогноза необходимо разделение данных на дни недели: понедельник, вторник, среда, четверг, пятница. Субботние и воскресные дни возможно объединить в одну группу.

2. В рамках поставленной задачи фактор «температура» можно не учитывать в связи с малым влиянием и возможным «шумом данных». Наиболее эффективной моделью считается модель прогнозирования на ближайшие три часа по предыдущим часам.

3. Прогноз с минимальной погрешностью 2,894 получился для дня недели – четверг, с максимальной погрешностью 5,368 для дня недели – вторник.

4. Используя для построения прогнозов модель расчета на три часа, по предыдущим часам возможно получить прогноз с погрешностью не более 3 %, (в среднем 2,2 %).

Библиографический список

1. Ершов, М.С. Моделирование электропотребления в системах промышленного электроснабжения / М.С. Ершов, С.А. Голованов, Г.Я. Григорьев // Промышленная энергетика. – 1999. – № 5.

2. Воронов, И.В. Определение параметров, влияющих на электропотребление промышленного предприятия с помощью метода экспертных оценок / И.В. Воронов, Е.А. Полётов, В.М. Еременко // Вестник КузГТУ. – 2009. – № 5.

3. Федеральный портал PORTOWN. RU. Энергоэффективность России. – URL: http://www.protown.ru/information/hide/7938.html/.

К содержанию

УДК 622.22:621.31

ГИБКАЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ КОМПЕНСИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УДАЛЕННЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова

С целью повышения энергетических показателей систем электроснабжения удаленных буровых установок нефтегазодобывающего комплекса предложено использовать принципы, используемые при транспорте электрической энергии в гибких линиях электропередач переменного тока в большой энергетике. Эффективным способом управления напряжением в системах является векторное регулирование с помощью объединенного регулятора потока мощности. Эффективным способом компенсации реактивной мощности является применение продольной компенсации с помощью компенсированных выпрямителей с предвключенными пассивными фильтрами высших гармоник. Представлены результаты аналитического исследования, моделирования и дизайнерской разработки одного из вариантов систем.

Ключевые слова: система электроснабжения, буровая установка, объединенный регулятор потока мощности, векторное управление, компенсированный выпрямитель, реактивная мощность, ансамбль нечетно-кратных гармоник.

Развитием нефтегазодобывающего комплекса во многом определяется состояние экономики страны [1]. Эффективность работы комплекса существенно зависит от оборудования и технологий, которые используются при бурении скважин, в том числе и от технологии транспорта электрической энергии к буровым установкам [2]. В настоящее время достаточно широкое применение нашли системы электроснабжения (СЭС) буровых установок (БУ) с общим некомпенсированным диодным двенадцатифазным выпрямительным агрегатом, преобразующим передаваемую по ЛЭП энергию переменного тока в энергию постоянного тока, и осуществляющими обратное преобразование энергии индивидуальными для электрических двигателей БУ автономными инверторами напряжения. К числу основных проблем, которые необходимо решать при дальнейшем совершенствовании таких СЭС, относятся: компенсация реактивной мощности и нормализация качественных показателей электрической энергии, как в питающей сети, так и у потребителя. В том числе необходимость поддержания на достаточном уровне напряжения на БУ и расположенных в районе БУ потребителях в номинальном режиме и ограничение напряжения в режиме холостого хода БУ. Указанные проблемы особенно обостряются с возрастанием длины воздушных ЛЭП, связывающих БУ с понижающими подстанциями.

Эффективное и надежное совершенствование технологии транспорта электрической энергии к удаленным БУ может быть обеспечено в гибких СЭС, построенных, как и в гибких линиях электропередач большой энергетики, с применением принципов векторного управления и продольной компенсации реактивной мощности. Принципиальная схема одного из вариантов такой СЭС представлена на рис. 1, а. Векторное управление здесь осуществляется объединенным регулятором потока мощности в виде построенных на IGBT транзисторах выпрямителе В и автономном инверторе напряжения АИН с синусоидальной ШИМ, включеным на входе ЛЭП посредством поперечного T_1 и продольного T_2 трансформаторов [3]. Принцип векторного управления СЭС поясняется на рис. 1,б.

Обладающий известными преимуществами принцип продольной компенсации реактивной мощности с целью повышения ее эффективности в предлагаемой СЭС реализован путем перевода некомпенсированного диодного двенадцатифазного выпрямительного агрегата в симметричный компенсированный режим работы с ансамблем нечетно-кратных гармоник тока в конденсаторах компенсирующего устройства по схеме, приведенной на рис. 2 [4].

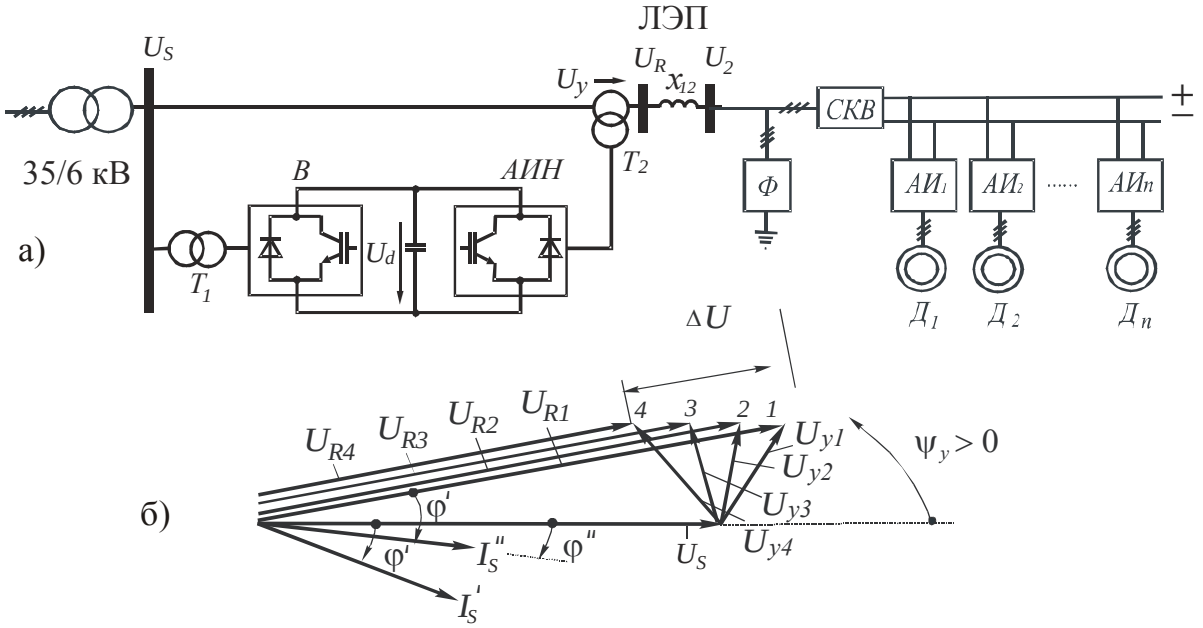


Рис. 1. СЭС с объединенным регулятором потока мощностив начале ЛЭП (а) и векторные диаграммы процесса управления (б)

Двенадцатифазный симметричный компенсированный выпрямитель (СКВ) состоит из двух шестифазных преобразовательных блоков. Первый блок образован сетевой, соединенной в треугольник вентильной обмотками трансформатора и выпрямительным мостом *ВМ1*. Второй блок образован сетевой, соединенной в звезду вентильной обмотками трансформатора и выпрямительным мостом *ВМ2*. Общее для обоих блоков компенсирую-

щее устройство состоит из одного реактора с двумя рабочими *РО1*, *РО2*, одной компенсационной *КО* обмотками и конденсаторной батареи КБ.

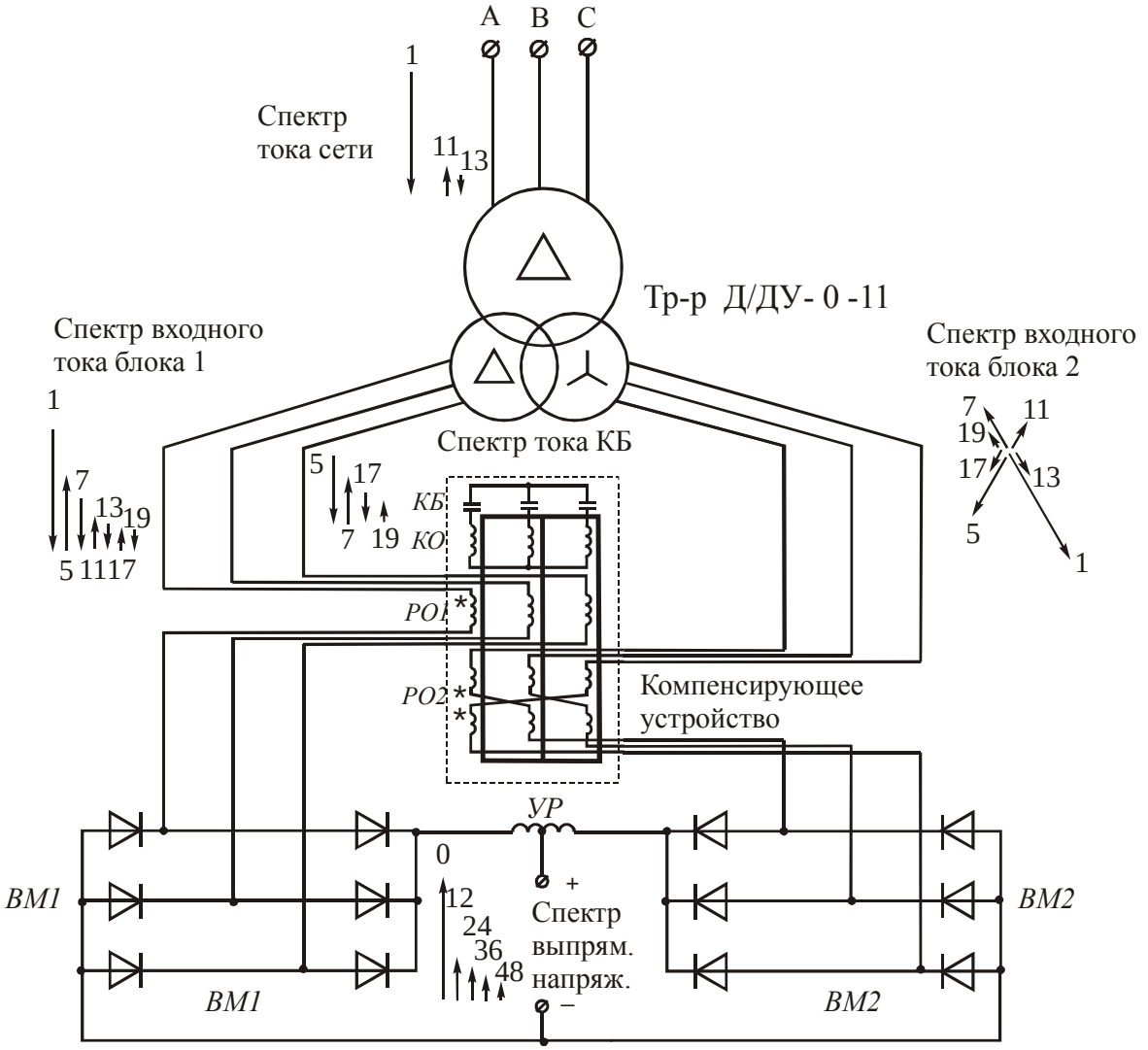


Рис. 2. Принципиальная схема симметричного компенсированного выпрямительного агрегата

Входной ток каждого блока содержит гармоники порядка $k = 6s \pm 1$, где $s = 0,1,2,3,4,5,\ldots$ Значениям $s = 0,2,4,\ldots$ отвечает ансамбль четно-кратных, а значениям $s = 1,3,5,\ldots$ – ансамбль нечетно-кратных гармоник тока. С помощью реактора компенсирующего устройства создана возможность управлять ансамблем гармоник токов и напряжений в конденсаторной батарее *КБ* [4]. В предлагаемой СЭС рабочие обмотки реактора соединяются по схеме с одноименными зажимами, обозначенными на рис. 2 символом $*$. Это обеспечивает встречное направление МДС, создаваемых ансамблями четно-кратных гармоник токов, протекающих по этим обмоткам. При этом для ансамблей МДС, создаваемых нечетно-кратными гармониками токов в рабочих обмотках, соединение рабочих обмоток являет-

ся согласным. Поэтому результирующая МДС рабочих обмоток реактора в этом случае определяется только суммарным ансамблем нечетно-кратных гармоник входных токов блоков. Под действием результирующей МДС в магнитопроводе реактора создается соответствующий магнитный поток, а на компенсационных обмотках *КО* и на конденсаторной батарее *КБ* формируются напряжения с ансамблем нечетно-кратных гармоник. Векторное представление спектра напряжения фазы А конденсаторной батареи для данного включения обмоток реактора КУ показано на рис. 2 слева от *КБ*. Напряжения на конденсаторах *КБ* трансформируются в контуры коммутации вентилей СКВ и осуществляют их одноступенчатую искусственную коммутацию. Это придает преобразователю новые весьма полезные свойства, иллюстрируемые на рис. 3. Характеристики установлены после проведения подробного анализа электромагнитных процессов в СКВ и рассчитаны по специальным программам.

Характеристики приведены в функции от тока нагрузки и относительной величины собственной частоты контура коммутации вентилей:

$$\nu = \sqrt{\frac{x_c}{x_к}}\,.$$

В этом выражении x_c и $x_к$ – определенные на основной частоте фазные емкостное сопротивление конденсаторной батарей *КБ* и эквивалентное индуктивное сопротивление питающей сети и преобразователя, приведенные в контур коммутации вентилей. Значению $\nu = 0$ отвечают характеристики некомпенсированных преобразователей. Зависимости построены в относительной форме. В качестве базисных величин напряжения и тока приняты ЭДС холостого хода в цепи нагрузки и амплитуда установившегося установившегося значения тока коммутации, равная соответствующей амплитуде тока двухфазного короткого замыкания трансформатора СКВ [5].

Схемой соединения преобразовательного трансформатора запрещена фильтрация в питающую сеть ансамблей нечетно-кратных гармоник шестифазных блоков. В результате в питающую сеть проникают гармоники порядка $k = 12s \pm 1$, т.е. из высших лишь 11, 13, 23, 25 и т.п. гармоники. Наибольший вес имеют одиннадцатая и тринадцатая гармоники. Для их нейтрализации могут быть использованы облегченные пассивные фильтры этих гармоник, выбранные по минимуму установленной мощности и предназначенные преимущественно для компенсации мощности искажения. Условия выбора фильтров по минимуму установленной мощности показаны в работе [6].

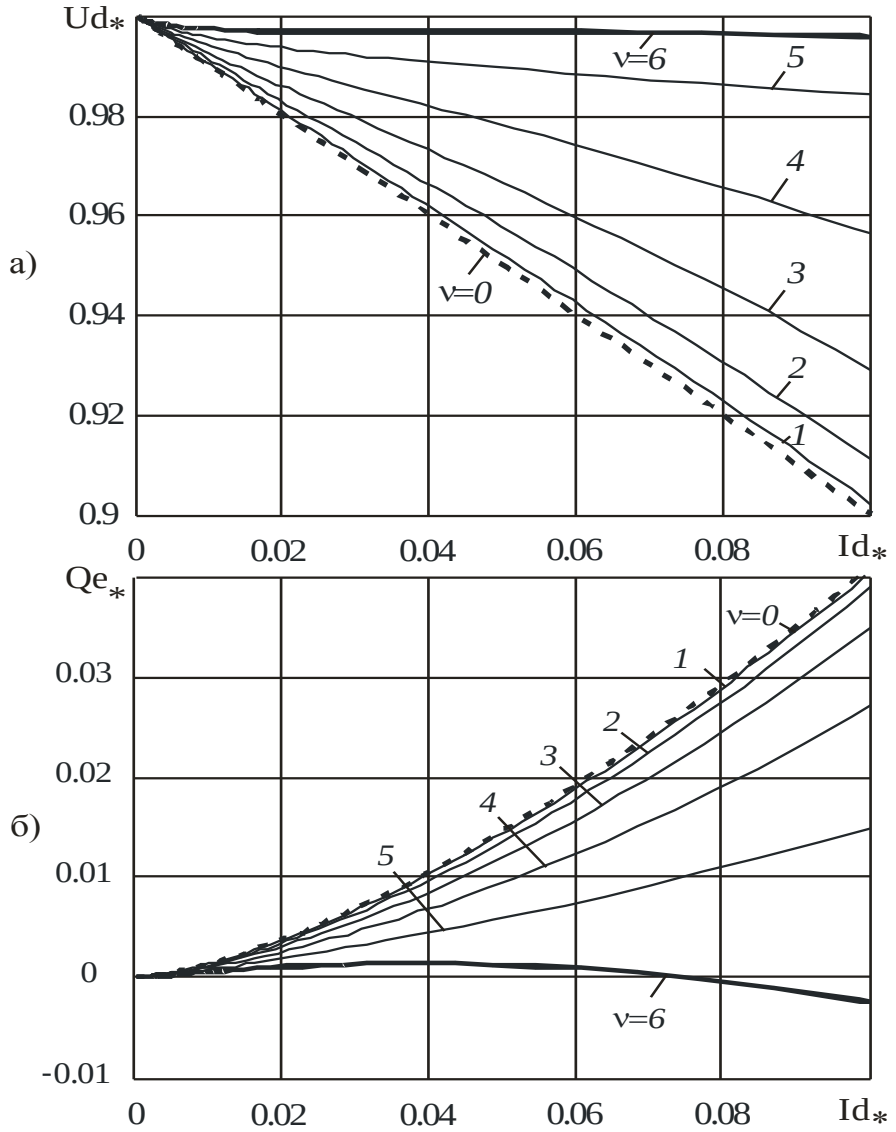


Рис. 3. Внешние характеристики (а) и зависимости реактивной мощности от тока нагрузки (б) для СКВ с ансамблем нечетно-кратных гармоник тока в КУ

После выполнения предложенных решений выпрямительный агрегат по свойствам приближается к идеальному. Действительно, теперь он, с одной стороны, способен работать практически без искажения сетевых тока и напряжения. Об этом свидетельствуют полученные на MATLAB – модели и приведенные на рис. 4 временные диаграммы напряжения и тока питающей сети в СЭС с СКВ и облегченными фильтрами одиннадцатой и тринадцатой гармоник (на диаграммах жирными линиями показаны токи, а тонкими – напряжения).

С другой стороны, он приобретает свойство управления потоками электрической энергии. Причем, как следует из рис. 3, он обеспечивает столь необходимое повышение передаваемой к БУ активной мощности за счет компенсации, как собственной реактивной мощности, так и при необходимости за счет компенсации реактивной мощности ЛЭП. Факт компенсации

реактивной мощности и ее генерирования подтверждается также временными диаграммами на рис. 4. Следует заметить, что указанные свойст ва достигаются при минимальных затратах и максимальной надежности их реализации. Последнее обусловлено высокой эффективностью использования КУ, а также простотой и надежностью дополнительно применяемого оборудования СЭС [5]. Сочетая принципы принятого способа продольной компенсации реактивной мощности и быстродействующего векторного управления напряжениями в ЛЭП можно удовлетворить все требования, предъявляемые к системам электроснабжения БУ.

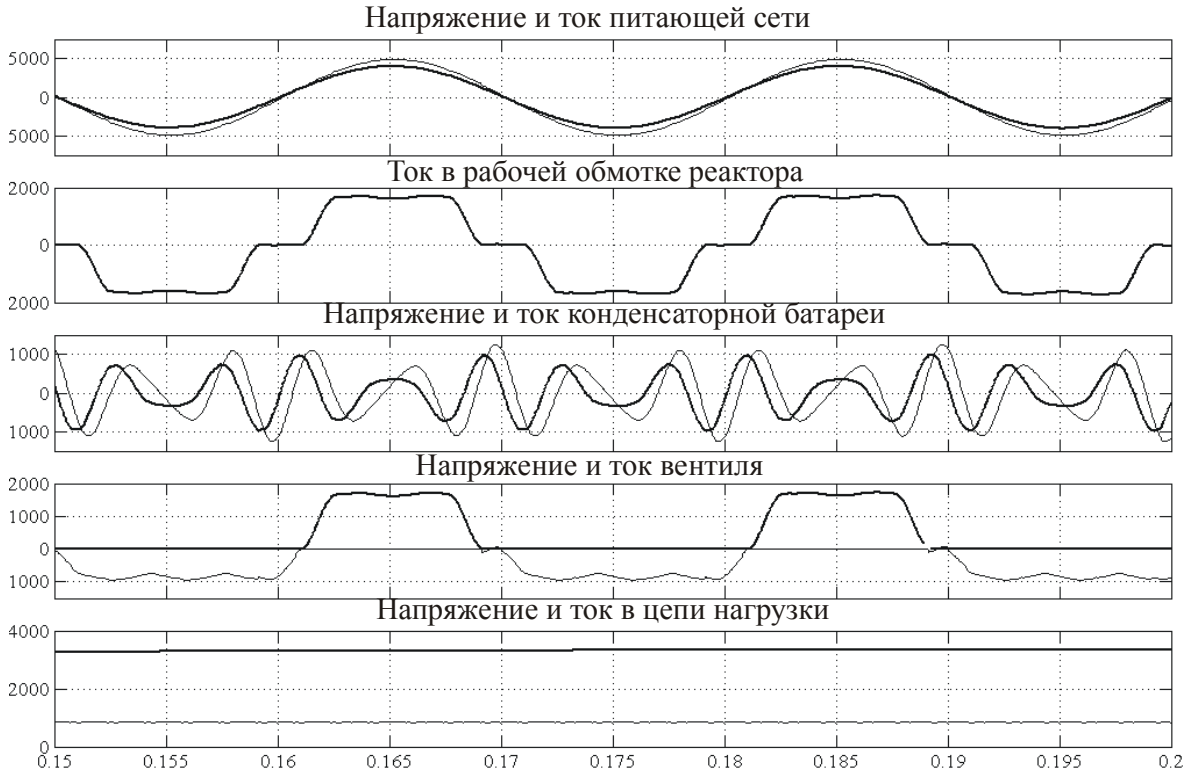


Рис. 4. Временные диаграммы процессов в СЭС с СКВ с ансамблем нечетно-кратных гармоник тока в конденсаторах и фильтрами 11 и 13 гармоник

С целью практической реализации проведенных исследований совместно со специалистами Группы Компаний «Приводная техника» г. Челябинск и ООО «Снежинский завод специальных электрических машин» разработаны технические условия на перевод в компенсированный режим работы с ансамблем нечетно-кратных гармоник выпрямительных агрегатов мощностью 3200 кВА с номинальными выпрямленными напряжением и током 825 В, 3200 А для СЭС буровых установок БУ-4200/250 ЭК-БМ (Ч). Ведется проработка конструктивных решений и модульно-блочного дизайна предложенных систем. В качестве примера на рис. 5 представлен результат «штучной» конструкторской и дизайнерской работы по созданию реактора указанного преобразователя.

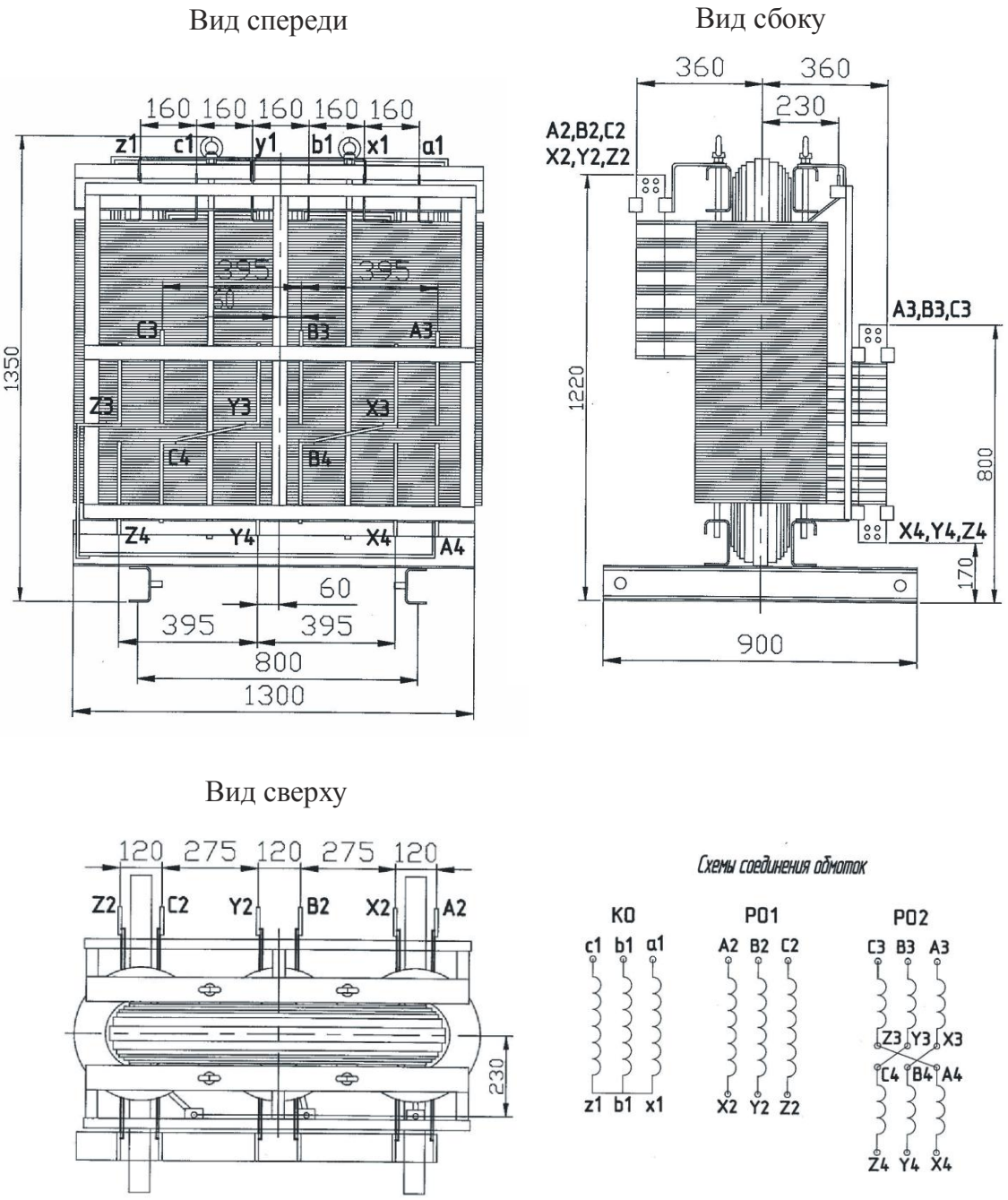


Рис. 5. Конструктивное решение и схемы соединения обмоток реактора для СКВ ансамблем нечетно-кратных гармоник тока в К

Приведем основные параметры реактора (обозначение реактора при его заказе – РТСКБ -825/3200 УХЛ3).

Номинальные мощности обмоток (кВА):

РО1 – 390, *РО2(1)* и *РО2(2)* – 226, *КО* –180.

Номинальные фазные напряжения обмоток (В):

РО1 – 100, *РО2(1)* и *РО2(2)* – 58, *КО* –1700.

Номинальные фазные токи обмоток (А):

РО1 – 1300, *РО2(1)* и *РО2(2)* – 1300, *КО* –35.

Магнитопровод реактора выполняется из анизотропной холоднокатаной электротехнической стали марки 3408. Шихтовка магнитопровода по технологии “step-lap”. Величина магнитной индукции B = 0.55 Тл. Обмотки реактора выполняются с воздушно-барьерной системой изоляции (открытые обмотки). Трехфазная обмотка *КО* – слоевая цилиндрическая, количество витков 118. Трехфазная обмотка *РО1* – дисковая катушечная, количество витков 7. Трехфазная обмотка *РО2* – дисковая катушечная, количество витков в каждой из частей обмотки 4. Обмотки дважды пропитываются лаком КО – 916к и запекаются. Вводы реактора выполняются из шинной меди. Покрытие конструктивных деталей и торцевых частей магнитопровода – композиция ОС-12-03 V.УХЛ2. Толщина покрытия 80–100 мм. Покрытие конструктивных деталей из стеклотекстолита – лак КО – 916к. Реактор выполняется на опорных подкареточных балках.

К достоинствам описанного технического решения следует отнести возможность надежной и эффективной реализации как при создании новых, так и при модернизации существующих систем электроснабжения.

Библиографический список

1. Чердабаев, Р.Т. Нефть: Вчера, сегодня, завтра / Р.Т. Чердабаев. – М.: Альпина Бизнес Букс, 2010. – 352 с.

2. Буровые комплексы. Современные технологии и оборудование / Коллектив авторов; под общ. ред. А.М. Гусмана, К.П. Порожского. – Екатеринбург: УГГГА, 2002. – 592 с.

3. Бурман, А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. Учебное пособие для вузов / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 236 с.

4. Хохлов, Ю.И. Полезные свойства двенадцатифазных преобразователей с управляемым ансамблем гармоник в общем для шестифазных блоков компенсирующем устройстве / Ю.И. Хохлов, М.Ю. Федорова, А.В. Хлопова // Электротехника. – 2013. – № 10. – С. 12–18.

5. Хохлов, Ю.И. Компенсированные выпрямители с фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник токов преобразовательных блоков / Ю.И. Хохлов. – Челябинск: ЧГТУ, 1995 – 355 с.

6. Поссе, А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока / А.В. Поссе. – Л,: Энергия, 1973. – 303 с.

К содержанию

УДК 630*847.2 + 621.181

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ НА ПРИМЕРЕ ДРЕВЕСНЫХ ПЕЛЛЕТ

Е.Н. Ахмедьянова

В статье рассмотрены вопросы использование гранулированных опилок (пеллет). Определены пути повышения энергоэффективности установок сушки пеллет за счет использования нестационарных режимов сушки гранулированных опилок.

Ключевые слова: пеллеты, пеллетирование, котлоагрегат, рециркуляция, нестационарный режим, тепловой насос.

В настоящее время наиболее доступным и весьма актуальной для Российской Федерации возобновляемым источником энергии является использование отходов лесоперерабатывающего комплекса. Отходы лесоперерабатывающей промышленности к сожалению используются далеко не в полном объеме. В настоящее время в качестве топлива обычно используется горбыль, опил идет, как правило, на удобрение или не используется вовсе. Наиболее эффективным методом выхода из создавшейся ситуации является использование пеллетной технологии. В странах Западной Европы переработка отходов в гранулированное топливо весьма актуальна. Производство граннулированого топлива включает основные этапы: измельчение, сушку, пеллетирование и расфасовку. Самым и наиболее энергозатратным является процесс сушки.

В связи с тем, что древесная щепа с содержанием влаги более 15 % плохо поддается прессованием, в связи с этим избыточная влажность, в свою очередь, сырье с влажностью менее 8 % плохо поддается к склеиванию во время прессования. Производители стремятся обеспечить влажность в диапазоне 8 и 12%, оптимальной является влажность 10 % +/– 1 %. На удаление влаги из древесных отходоврасходуется приблизительно 1 МВт энергии на тонну выпариваемой влаги, что эквивалентно тому, что на 1т гранул требуется теплота сгорания 1 $м^3$ древесины.

При расчёте процесса сушки необходимо учитывать ограничения по температурным режимам сушки, увеличении температуры сушильного агента как правило не превышает 140 ^{0}C, что значительно ниже оптимальной с точки зрения организации процесса горения. Скорость сушки регламентируется временем диффузии влаги к поверхности и скоростью испарения влаги с поверхности древесины.

Остальные статьи затрат, связанные с измельчением, прессованием, фасовкой и упаковкой, имеют энергозатраты на порядок меньше [7, 8].

Наиболее часто используемые сушильные установки выполняются в виде:

1) камерные сушильные установки;

2) ленточные сушильные установки;
3) сушильные установки вихревого типа;
4) установки сушки в кипящем слое [9].

В связи с тем, что применяемое оборудование разнообразно по физическому принципу действия, в свою очередь промышленные установки функционируют, как правило с однократным прохождением сушильного агента. Что приводит к загрязнению окружающей среды продуктами сушки содержащими не только влагу, но и летучие вещества, кроме того это не всегда эффективно и с экономической точки зрения.

Наиболее эффективными с нашей точки зрения применительно к установкам сушки пеллет, в этих сушильных установках с частичной рециркуляцией и регенерации тепла с использованием тепловых труб и теплонасосных агрегатов (рис. 1).

Для реализации предложено использовать следующую схему сушильной установки.

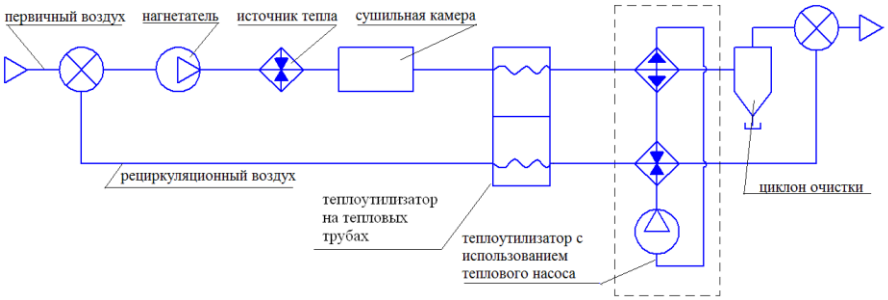


Рис. 1. Комбинированная схема сушильной установки с частичной рециркуляцией

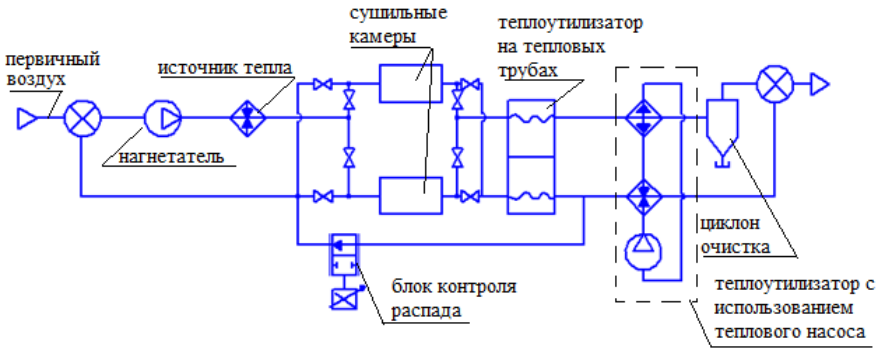


Рис. 2. Схема сушильной установки с частичной рециркуляцией, утилизацией тепла и блоком обеспечивающим нестационарный (осциллирующий) режим

Тепловые трубы позволяют передать тепло от отводимого сушильного агента имеющего температуру 120–135 ^{0}C части циркулирующего газа. Этот вид теплообменника необходим для обеспечения возможности функ-

ционирования фреоновых тепловых насосов. Он должен понизить температуру сушильного агента до 90–100 ^{0}С, в связи с этим сделает возможным применение тепловых насосов.

Следующим фактором в повышении энергоэффективности сушильных установок является уменьшение времени процесса сушки.

В процессе сушки влажных материалов нужно учитывать не только форму связи влаги с материалом, но и режим сушки. В настоящее время распространены три связи – это химическая, физико-химическая и физико-механическая [1, 2].

Химическая связь – это ионные и молекулярные силы, так как химическая связь очень крепка, то при сушке опилок ее не удаляют и не учитывают ее содержание.

В свою очередь физико-химическая связь опилок делиться на:

а) адсорбционную – это тонкий слой воды в несколько сотен молекул и адсорбирован на активной поверхности опилок, за счет адсорбционной силы;

б) осмотическую – это проникшая внутрь клетки влага из-за осмотического давления;

в) структурная (иммобилизированная) – это влага с весьма малой энергией связи, она захвачена с новыми структурными образованиями при формировании гелия.

Физико – механическую связь разделяют на два вида в зависимости от размеров капилляров радиус капилляров больше 10^{-5}см и на радиус капилляров меньше 10^{-5}см [5].

В процессе сушки влага будет перемещаться от внутренних слоев к поверхности опилок, а в дальнейшем испаряется в атмосферу. При анализе процессов сушки пользуются понятиями интенсивности I и скорости сушки N. По формуле Дальтона можно определить интенсивность испарения жидкости со свободной поверхности при стационарном режиме [2, 6, 10]:

$$I = \frac{W}{F \cdot \tau} = \beta_p (p_п - p_c), \quad \text{кг/(м}^2\text{·с)} \tag{1}$$

где W – количество испаренной жидкости, кг; F – поверхность испарения, м^2; τ – время, с; β_p – коэффициент массотдачи, отнесенной к разности парциальных давлений, кг влаги/(м^2·с·Па); $p_п$ – парциальное давление диффундирующего вещества над жидкой (твердой поверхностью), Па; p_c – парциальное давление диффундирующего вещества вдали от поверхности раздела фаз, Па.

Можно использовать для приближенных расчетов формулу [6]:

$$I = 5{,}7 \cdot \omega^{0,8}(p_и - p_c), \text{ кг/(м}^2\text{·с)} \tag{2}$$

где ω – скорость воздуха, м/с;

Для расчета испаренной жидкости используем следующую формулу:

$$I = \beta_c(p_и - p_c), \text{ кг/(м}^2\cdot\text{с)} \quad (3)$$

где β_c – коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности концентрации диффундирующего вещества, м/с; p_n и p_c – концентрации диффундирующего вещества на жидкой (твердой) поверхности раздела фаз и вдали от поверхности раздела фаз, кг/м^3.

В свою очередь коэффициент массотдачи β_c и β_p [3] связаны соотношение:

$$\beta_c = \frac{\beta_c}{R \cdot T} \quad (4)$$

В связи с тем, что между количеством испаренной жидкости и количеством затраченного тепла просматривается следующая зависимость [9]:

$$q = I \cdot r = \alpha(t_c - t_п), \text{ Дж/(м}^2\cdot\text{с}\cdot^0\text{C)} \quad (5)$$

где r –удельная теплота испарения, Дж/кг; α – коэффициент теплообмена, Дж/(м^2·с·^{0}С); t_c, t_n – температуры окружающей среды и поверхности испарения, ^{0}С.

Процессы сушки можно условно разделить на характерные периоды. Период прогрева, период постоянной скорости испарения (для него характерна наибольшая скорость испарения влаги) , период падающей скорости сушки.

В период постоянной скорости сушки температура материала постоянна $dt/d\tau=0$, скорость диффузии влаги к поверхности равна скорости испарения, тепло, необходимое для испарения влаги, отбирается от окружающего сушильного агента путем теплообмена конвекцией и в ряде случаев излучением. Интенсивность испарения I, в этом случае, прямо пропорциональна плотности потока тепла на поверхности тела [9].

$$I_m = \frac{q}{r} = \frac{N}{100} * R_V \frac{\rho}{r} = \left(\frac{d\omega}{d\tau}\right)\frac{R_V}{100}\frac{\rho}{r} \quad (6)$$

где $N= (dw/dr)$ – скорость сушки в периоде постоянной скорости, $Rv=V/F$ – отношение объема тела к его поверхности, м; ρ – плотность абсолютно сухого материала, кг/м^3.

Закон термовлагопроводности, согласно которому влага в материале перемещается по направлению теплового потока, а газ – в противоположную сторону, был открыт А.В. Лыковым [6]. Так при сушке влага в материале может перемещаться к его поверхности под действием разности ее концентрации, под влиянием термовлагопроводности и под действием гра-

диента избыточного давления (при температуре материала, близкой или большей 100 °С, наблюдается фильтрационный перенос [2]).

В общем виде уравнение переноса массы при сушке материала может быть записано следующим образом:

$$I_m = -a_m \rho_o \frac{\partial u}{\partial x} - \delta a_m \rho_o \frac{\partial t}{\partial x} - a_p \rho_o \frac{\partial p}{\partial x} \quad (7)$$

где I_m – количество жидкости, переместившееся внутри тела в единицу времени через единицу поверхности, кг/(м^2-ч); a_m – коэффициент потенциалопроводности (определяется экспериментально для конкретного материала), м^2/ч; u – концентрация влаги, кг/кг; x – координата, м; ρ_o – плотность абсолютно сухого материала, кг/м^3; δ – термоградиентный коэффициент, 1/°С(определяется экспериментально для конкретного материала); α_p – коэффициент фильтрационного переноса, м^2/ч, Н/м^2 (определяется экспериментально для конкретного материала); $\partial u/\partial x$, dt/dx и $\partial p/\partial x$ – частные производные, пропорциональные градиентам влажности, температуры и давления.

Множество исследователей [1, 4] отмечают что при охлаждении материала изменяется величина и направление температурного градиента. Это приводит к тому, что термовлагопроводность будет способствовать движению, влаги от центра к периферии. В этой связи любопытны результаты, приведенные в работе [1, 3, 4]. С целью интенсификации процесса сушки целесообразно использовать режим с промежуточным нагревом и охлаждением. Схема установки реализующей осциллирующий режим приведена на рис. 2.

Нестационарные режимы сушки могут увеличить интенсивность процесса, а в некоторых случаях и улучшить качество получаемого продукта. Определение оптимальных периодов сушки выходит за рамки данной статьи и является темой дальнейшего исследования. Для оптимизации энергозатрат предложено использование комбинированного утилизатора тепла включающего в отличие от ранее известных комбинацию тепловых труб и теплого насоса с одновременной реализацией пульсирующего режима сушки.

Библиографический список

1. Гамаюнов, Н.Й. Закономерности внутреннего переноса влаги и структурообразования при сушке различных материалов / Н.Й. Гамаюнов, Л.И. Ильченко // Хим. пром-ть. – 1979. – № 6. – С. 344–348.

2. Гельперин, Н.И. Основы техники псевдоожижения / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.

3. Гинзбург, А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

4. Гинзбург, А.С. Некоторые современные проблемы теории и технологии сушки / А.С. Гинзбург // Хим. пром-сть. – 1979. – № 6. – С. 328–330.

5. Гинзбург, А.С. Сушка пищевых продуктов в кипящем слое / А.С. Гинзбург, В.А. Резчиков. – М.: Изд. «Пищевая пром.», 1966. – 196 с.

6. Лыков, А.В. Тепло – массобмен в процессах сушки / А.В. Лыков. – Госэнергоиздат, 1956. – 464 с.

7. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов // Лесная промышленность. – М., 1987. – 440 с.

8. Кречетов, И.В. Сушка древесины / И.В. Кречетов. – М: Бриз, 1992. – 449 с.

9. Куталадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Куталадзе. – Л.: Машгиз, 1968. – 456 с.

10. Слободкин, А.С. Приближенный метод расчета кинетики прогрева влажного материала в кипящем слое при осциллирующем режиме / А.С. Слободкин. – ИФК. – 1964. – № 3.

К содержанию

УДК 681.521.34

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТАРАНА НА ЕГО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ

В.В. Бакунин

В статье рассчитывается и анализируется степень влияния параметров гидротаранной установки на производительность гидротарана на основе аналитической зависимости производительности гидротарана.

Ключевые слова: гидротаран, анализ, гидроэнергетика.

По мнению автора, важно определить долю участия (или вес) каждого фактора в производительности гидротаранной установки. Это позволяет сосредотачивать усилия по созданию совершенной конструкции гидротаранной установки на приоритетные факторы.

Производительность гидротарана зависит от одиннадцати выявленных параметров и рассчитывается по аналитической формуле [1].Ввиду громоздкости она может быть представлена в обобщённом виде:

$$q = f\left(H, h, m, d, \zeta_{кл}, \zeta_{тр}, E, K, \delta, \rho, c_0\right), \quad (1)$$

где H – напор питательного резервуара-плотины (высота падения воды в гидротаран),

h – напор на выходе из гидротарана,

m – приводная масса ударного клапана,

d – диаметр питательной трубы гидротарана,

$\zeta_{кл}$ – коэффициент местного гидравлического сопротивления узла ударного клапана,

$\zeta_{тр}$ – обобщённый коэффициент гидравлического сопротивления питательной трубы,

E – модуль упругости материала питательной трубы,

K – объёмный модуль упругости жидкости (воды),

δ – толщина стенки питательной трубы,

ρ – плотность жидкости (воды),

c_0 – скорость распространения звуковой волны в жидкости (скорость звука в жидкости).

Достоверность формулы (1) была доказана рядом экспериментов, поэтому исследование производительности гидротарана можно свести к исследованию этой зависимости.

Методика определения веса каждого фактора при условии линейной зависимости производительности от фактора, с нашей точки зрения, может быть следующей. Рассчитываем базовую производительность q по базовым значениям каждого фактора по формуле (1). Затем увеличиваем по очереди значение каждого фактора в $\boldsymbol{n}$ раз при фиксированных базовых значениях остальных факторов и находим значение производительности в каждом случае:

$$q_1 = f\left(H \cdot n, h, m, d, \zeta_{кл}, \zeta_{тр}, E, K, \delta, \rho, c_0\right),$$
$$q_2 = f\left(H, h \cdot n, m, d, \zeta_{кл}, \zeta_{тр}, E, K, \delta, \rho, c_0\right),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$q_i = f\left(H, h, m, d, \zeta_{кл}, \zeta_{тр}, E \cdot n, K, \delta, \rho, c_0\right),$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots..$$
$$q_z = f\left(H, h, m, d, \zeta_{кл}, \zeta_{тр}, E, K, \delta, \rho, c_0 \cdot n\right).$$

Или в обобщённом виде:

$$q_i = f\left(F_1, F_2, \ldots F_i \cdot n, \ldots, F_z\right), \qquad (2)$$

где q_i – производительность при увеличении i-го фактора в n раз,

F_i – базовое значение i-го фактора,

z – количество факторов.

Затем находим коэффициент относительного изменения производительности:

$$k_i = \frac{\left|q_i - q\right|}{q}. \qquad (3)$$

Тогда вес каждого фактора в %-тах определяем:

$$G_{Fi} = \frac{k_i}{\sum_{1}^{z} k_i} \cdot 100\%, \qquad (4)$$

где $\sum_{1}^{z} k_i$ – сумма всех коэффициентов относительного изменения производительности, принимаемая за 100%-ое относительное изменение производительности.

Примером расчёта веса фактора для производительности гидротаранной установки может служить таблица 1, в которой *n*=2 (увеличение значения фактора в 2 раза).

Таблица 1

Вес каждого фактора в производительности гидротарана при условии линейной зависимости производительности от каждого фактора при ***n***=2

Фактор	Базовая произв-ть q, л/мин по (1)	Производительность при увеличении фактора в 2 раза q_i, л/мин по (2)	Коэф. относительного изменения произв-ти k_i по (3)	$\sum_{1}^{z} k_i$	Вес фактора $G_{Fi} = \frac{k_i}{\sum_{1}^{z} k_i} \cdot 100\%$
Напор на входе H=3м	12	24,9	1,078	3,51	30,7
Диаметр пит. трубы d=50мм		24,7	1,059		30,1
Напор на выходе h=15м		5,8	0,513		14,6
Коэф. сопр. ударного клапана $\zeta_{кл}$=7		8,6	0,285		8,1
Плотность жидкости ρ=1000 кг/м^3		8,8	0,266		7,6
Масса клапана m=1кг		14,7	0,227		6,5
Коэф. сопр. пит. трубы $\zeta_{тр}$=4		11,3	0,055		1,6
Скорость распространения звука c_0=1430 м/с		12,3	0,024		0,7
Объёмный модуль упругости жидкости K=1,96*10^9 Па		11,95	0,003		0,09
Модуль упругости материала трубы E=2*10^{11} Па		12	0,0015		0,05
Толщина стенки трубы δ=3,5 мм		12	0,0015		0,05

Как уже отмечалось выше, данная методика даёт точный результат при линейной зависимости производительности от значения фактора. Для выявления степени линейности были построены зависимости производительности от значения каждого фактора при фиксированном базовом значении остальных факторов (рис. 1). Видим, что два основных фактора – напор на входе и диаметр тарана, вес которых в сумме 60 %, имеют линейную зависимость. Около 37 % вес четырёх факторов, имеющих нелинейную зависимость, это напор на выходе гидротарана, коэффициент сопротивления ударного клапана, плотность жидкости и приведённая масса клапана. Оставшиеся факторы имеют в сумме 3 %.

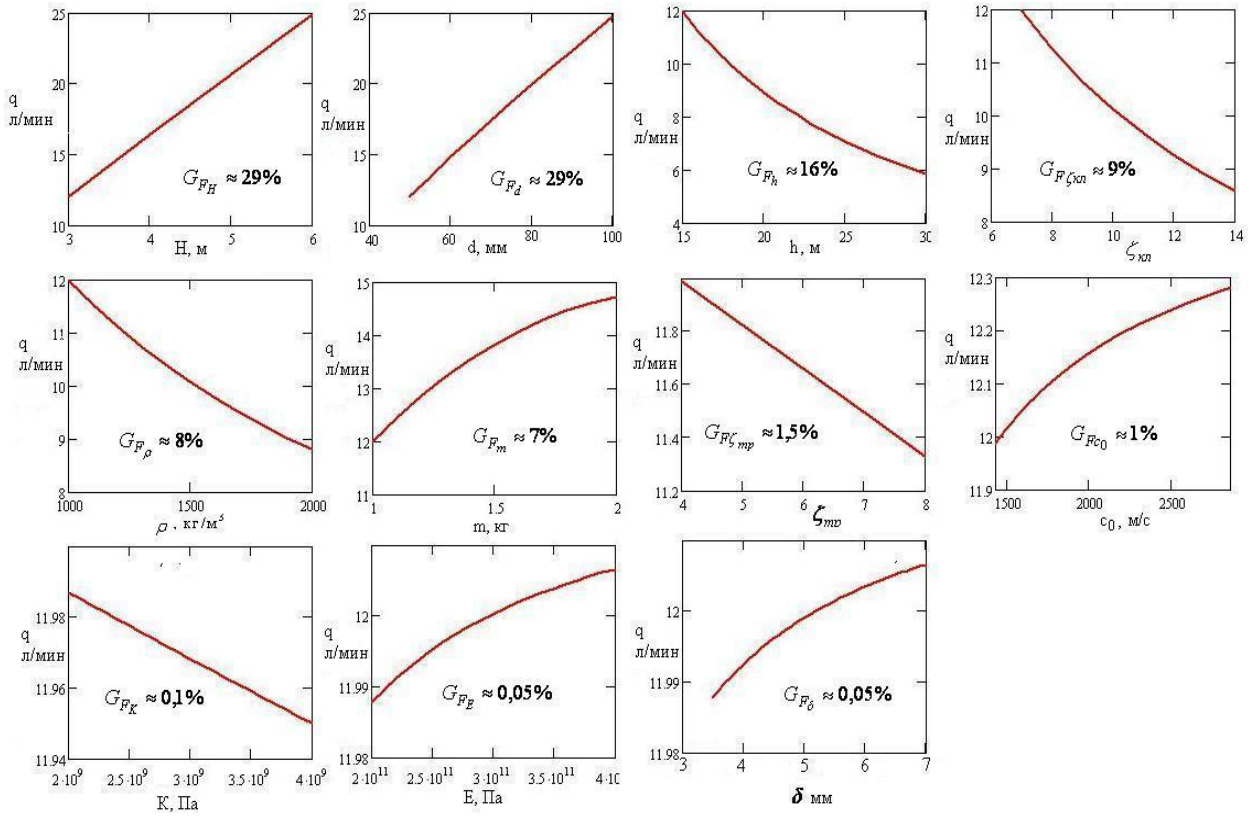


Рис. 1. Производительность гидротарана
при изменении отдельно каждого параметра

С целью уяснения изменчивости долевого участия фактора при разных степенях изменения был сделан расчёт при изменении *n* от 1 до 2. Данные расчёта приведены в таблице 2.

Анализ изменения веса факторов от увеличения ***n*** позволяет сделать следующие выводы:

– приоритетность факторов практически не меняется;

– нелинейность не оказывает существенного влияния;

– исключение составляет приведённая масса ударного клапана, так как при изменении этого параметра функция производительности имеет экстремум (максимум), что делает необходимым делать анализ вблизи этого максимума и на периферии.

Таблица 2

Влияние (вес) фактора в % на производительность гидротарана в зависимости от увеличения фактора в ***n*** раз относительно базового значения

Фактор	***n***=1,2	***n*** =1,4	***n*** =1,6	***n*** =1,8	***n*** =2
Напор на входе ***H***	25,1	26,7	28,1	29,4	30,7
Диаметр пит. трубы ***d***	26,8	27,8	28,7	29,5	30,1
Напор на выходе ***h***	19,6	17,9	16,6	15,5	14,6
Коэф. сопр. ударного клапана $\zeta_{кл}$	9,4	9	8,7	8,4	8,1
Плотность жидкости ρ	8,4	8,2	8	7,8	7,6
Масса клапана ***m***	8,2	7,9	7,5	7	6,5
Коэф. сопр. пит. трубы $\zeta_{тр}$	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6
Скорость распространения звука c_0	1	0,9	0,8	0,7	0,7
Объёмный модуль упругости жидкости ***K***	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09
Модуль упругости материала трубы ***E***	0,06	0,055	0,051	0,05	0,05
Толщина стенки трубы δ	0,06	0,055	0,051	0,05	0,05

Кроме того, для практики важна степень изменчивости каждого фактора. В этой связи, объективно мы не можем поменять такие факторы, как напор на входе в таран (определяется уклоном реки или высотой плотины), напор на выходе (условие потребителя), плотность жидкости (природные колебания температуры несущественно влияют на плотность воды). Очень изменчивым может быть модуль упругости материала трубы. Например, модуль упругости полиэтилена в 200 раз меньше чем у стали. И хотя вес этого фактора всего 0,05 %, но уменьшение его в 200 раз приводит к уменьшению производительности примерно на 10 %. Существенно на производительность можно оказывать типоразмером тарана – диаметром его питательной трубы (30 %), но увеличение диаметра ведёт и к увеличению сбрасываемого тараном расхода. Поэтому, для таранов одно-

го итого же диаметра питательной трубы остаётся лишь два фактора, изменением которых мы можем существенно влиять на производительность – это коэффициент гидравлического сопротивления ударного клапана $\zeta_{кл}$ и приведённая масса ударного клапана m.

Таким образом, совершенство конструкции гидротарана определяется совершенством конструкции его ударного клапана. Анализ конструкции ударного клапана на предмет получения максимальной производительности позволяет сделать некоторые качественные выводы. При конструировании необходимо стремиться:

1) к осесимметричности потока при обтекании клапана;

2) к обтекаемости клапана (меньшему коэффициенту. сопротивления);

3) к такой конструкции нагрузки на клапан, чтобы при закрытии клапана она уменьшалась, что способствует большему гидроудару;

4) нагрузка (приведённая масса) и коэффициент гидравлического сопротивления ударного клапана должны быть оптимальными и соответствующими максимуму функции (1).

Библиографический список

1. Бакунин, В.В. Расчёт основных эксплуатационных характеристик гидротарана / В.В. Бакунин // Вестник Челябинского государственного агроинженерного университета. – 1996. – Т. 16. – С. 97–103.

К содержанию

УДК 621.227

АНАЛИЗ РАБОТЫ ГИДРОТАРАННЫХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

О.С. Волкова

Произведен анализ работы гидротаранных установок различных производителей. Произведен выбор насосов известных производителей, получивших наибольшее распространение в мире. Представлено сравнение характеристик работы данных насосов.

Ключевые слова: насос, гидротаран, гидравлический удар, напор, производительность.

В последнее время в России и других странах стал проявляться все больший интерес к использованию энергии воды. В частности, вместо традиционных насосных установок с дизельными или электрическими двигателями, начинают применять гидротаранные установки, возросший интерес к которым обоснован стремлением общества к экологически безопасным и энергосберегающим технологиям [1].

«Гидравлический таран», получил развитие в мелиорации и для различных бытовых нужд во всем мире. Основные тенденции современных гидротаранов, предлагаемых фирмами направлены на:

– изготовление насосов большого диапазона входного напора и производительности;

– компактность,

– уменьшение количества шума при работе и снижение стоимости.

Насосы выполняют либо из алюминия, либо из ПВХ; применение последних позволяет выполнить их более компактными, недорогими и практически бесшумными.

Все большую популярность гидротараны приобретают в развивающихся странах: Таиланде, Лаосе, Малайзии, Вьетнаме, Филиппинах, Новой Зеландии и др., где из-за климата и рельефа местности возникают проблемы с доставкой воды потребителю, но также остра проблема энергообеспечения.

Промышленные конструкции гидротаранов изготавливают в США, Франции, Великобритании, Германии и других странах мира, но нет конкретных типорядов этих устройств, чтобы была возможность их сравнения, выявление лучших образцов.

Автором были исследованы конструкции и характеристики гидротаранов, предлагаемые фирмами-изготовителями. В своей статье автор также опирается на исследования, проводимые в Технологическом университете Делфта (Голландия). Конструктивные особенности насосов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Особенности гидротаранов различных производителей [2, 3, 4, 5, 6]

Тип насоса, страна-изготовитель	Особенности конструкции
The Ram-Company, США	Стандартная конструкция из алюминия или ПВХ, ударный и нагнетательный клапаны с резиновой накладкой
«GRAVI-CHEK», США	Насосы выполняются из закаленного алюминия, особенностью которых является интересная конструкция ударного клапана, который представляет собой плавучий шар, он втягивается вниз по потоку воды и блокирует выход воды
Blake, Великобритания	Стандартная конструкция из чугуна, дарные и нагнетательные клапаны из бронзы с резиновыми накладками.
ООО «Интеллект-Диалог», Узбекистан	Особенностью конструкции является возможность изменения параметров насосов в пределах 70 % при помощи регулировочного винта
Vulcan, Великобритания	Стандартная конструкция из чугуна, бронзовые клапаны покрыты резиновыми накладками в виде сетки
SANO, Германия	Нестандартная конструкция из закаленной стали
Rife, Великобритания	Стандартная конструкция из чугуна, бронзовые клапаны покрыты резиновыми накладками в виде кольца

Для сравнения промышленных образцов гидротаранов были взяты конструкции с 2-х дюймовым напорным трубопроводом, так как в настоящее время они нашли наибольшее применение для систем водоснабжения отдельных хозяйств во всем мире.

Четыре протестированных насоса имеют примерно одинаковые характеристики и поэтому были выбраны для анализа и сравнения. Их характеристика представлена в таблице 2.

Таблица 2

Результаты сравнения гидротаранов [2]

Тип насоса	Страна-изготовитель	Диаметр питающей трубы,		Производительность потока, л/мин	Производительность насоса, л/мин	КПД, %
		дюйм	мм			
Blake	Великобритания	2,5	65	45–96	6,0	67
Vulcan	Великобритания	2	50	36–114	6,1	68
SANO	Германия	2	50	50–110	6,95	77
Rife	Великобритания	2	50	38–95	5,4	60

Выбранные насосы были исследованы на определение зависимости мощности гидротарана и его кпд от высоты нагнетания, результаты представлены на рис. 1 [2]. Исследования проводились при питательном напоре 3 м.

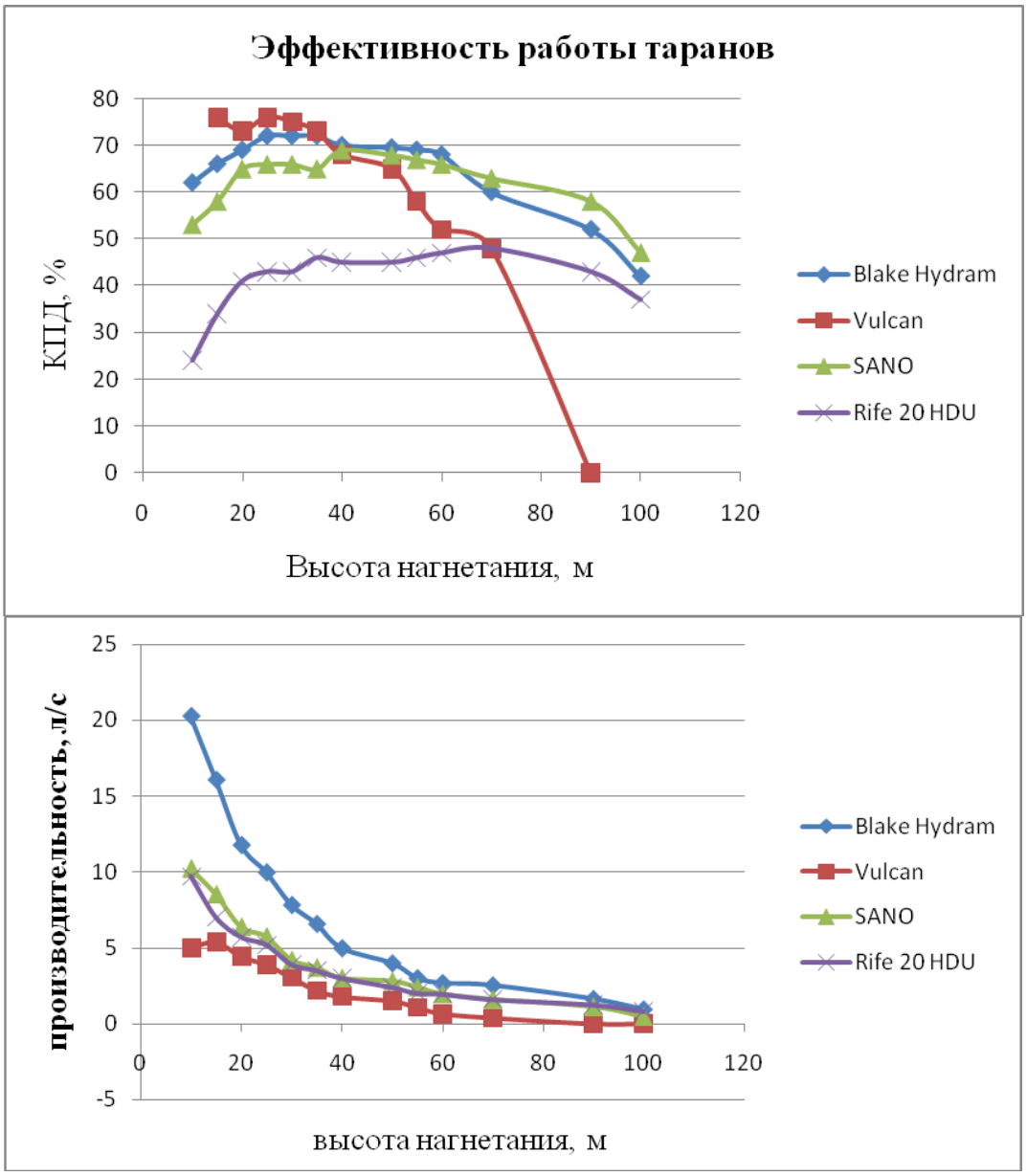


Рис. 1. Характеристики работы гидротаранов

Большие различия между насосами увидеть достаточно сложно, так, например, насос Vulcan при небольшой высоте нагнетания является более эффективны, но имеет самую низкую выходную мощность и будет поднимать воду только до 85 м. Rife имеет самый низкий КПД до 70 м, который не превышает 50 %. Однако он имеет самый широкий диапазон подъема жидкости. Blake является наиболее эффективным, он показывает высокий кпд в течение нормального рабочего диапазона и качает в широком диапазоне напора. Аналогично SANO показывает хорошую эффективность в широком диапазоне напора и более эффективен, чем Blake при напоре около 75 метров.

При попытке объединить мощность и эффективность разумно заключить, что Blake предлагает лучшую производительность.

Для качественного сравнения характеристик гидротарана лучше представить его работу в соотношение количества поставки жидкости в диапазоне высот нагнетания, что представлено на рис. 2 [2].

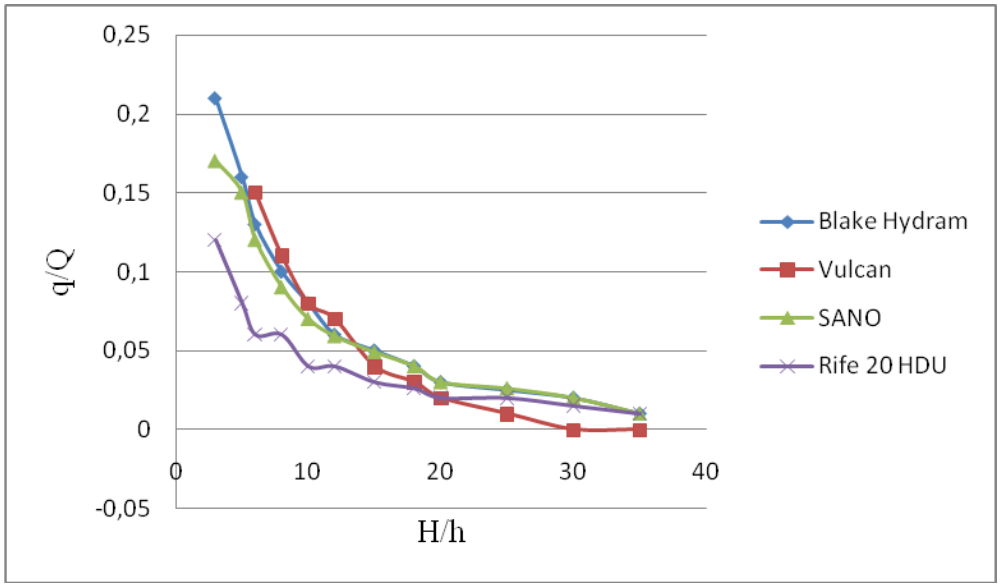


Рис. 2. График соотношения количества поставки жидкости в диапазоне высот нагнетания

Из этого рисунка можно сделать выводы, что Rife заметно хуже остальных насосов, и различия между другими насосами настолько малы, что сложно сделать выбор в пользу какого-либо насоса.

Таким образом, мы видим, что промышленные образцы гидротаранных установок имеют схожие характеристики, поэтому выбор фирмы производителя должен ориентироваться на экономическое обоснование и срок службы устройства.

Библиографический список

1. Овсепян, В.М. Гидравлический таран и таранные установки / В.М. Овсепян. – М.: Издательство «Машиностроение», 1968. – 124 с.

2. Comparison between DTU and commercical hydraulic ram pump performance// Development Technology Unit, Department of Engineering, Warwick University. – working paper № 33. – 1996. – p. 39.

3. URL: http://www.energy-source.ru/gidrotaran.html.

4. URL: http://www.gravi-chek.com/.

5. URL: http://www.intellekt-dialog.ru/.

6. URL: http://www.theramcompany.com.

К содержанию

УДК 621.22

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАБОТЫ НАПОРНОГО ГИДРОУЗЛА

О.А. Гусева, О.С. Пташкина-Гирина

Режим работы напорного гидроузла подчинен требованиям основных водопользователей и представляет собой весьма сложный процесс, включающий в себя приходную и расходную части. Имитационная модель, созданная на примере Аргазинского гидроузла, позволила смоделировать работу водохранилища, а также определить гарантированную и сезонную мощность створа гидроузла и время использования последней.

Ключевые слова: гидроузел, водохранилище, имитационная модель, гидроэнергетический потенциал.

Работой водохранилища является использование его объема для удовлетворения нужд потребителей в определенный момент времени и восполнение его запасов за счет сработки и наполнения водохранилища. Сбросы в нижний бьеф гидроузла можно использовать для выработки электроэнергии, для чего необходимо определить гидроэнергетический потенциал водохранилища.

В основе имитационной математической модели, описывающей функционирование водохозяйственной системы водохранилища, лежит уравнение водного баланса [1, 2, 3]^

$$W_{прi} + W_{бокi} - \sum W_{впi} - \sum W_{пi} \pm \sum W_{бi} + \Delta W_i - W_{сбр} = 0 \qquad (1)$$

Где $W_{прi}$ – приток воды во входном створе; $W_{бокi}$ – приток боковой приточности; $\sum W_{впi}$ – суммарное водопотребление; $\sum W_{пi}$ – суммарный объём потерь воды из водохранилища; $\pm \sum W_{бi}$ – невязка водного баланса; ΔW_i – изменение полезного объёма водохранилища; $W_{сбр}$ – объём холостых сбросов из водохранилища на текущем шаге по времени.

Определение возможной установленной мощности гидроузлапроизведем на основе водохозяйственного баланса (1), учитывая его приходную и расходную части, а также запросы водопотребителей как в верхнем, так и в нижнем бьефах.

Учитывая индивидуальность каждого водного объекта, в модель вводятся все возможные параметры учета водохозяйственного баланса, при этом основные требования:

- не превышение отметки НПУ;
- не допущение сработки водохранилища ниже отметки УМО.

Для оценки энергетики створа необходимы вычисленные холостые сбросы в нижний бьеф и разность отметок верхнего и нижнего бьефов. Это даст обеспеченную энергетику в створе.

Рассмотрим работу напорного гидроузла и определим энергетику створа при помощи имитационной модели программного пакета Matlab-Simulinkна примере Аргазинского водохранилища.

Аргазинское водохранилище создано на р. Миасс. Основным назначением водохранилища является регулирование стока р. Миасс и перебрасываемой части стока р. Уфа с целью обеспечения водой Челябинского промрайона, в настоящее время трасса по переброске стока не введена в эксплуатацию(по проекту сток должен составить 4,1 $м^3/с$) [4].

Благодаря построению модели будет возможно определить параметры водохранилища в необходимый момент времени, имитационная модель позволит моделировать различные сценарии его работы, что позволит производить прогнозирование работы водохранилища и её оптимизацию, а также определить гарантированную и сезонную мощность створа гидроузла и время использования последней.

Для определения исходных данных необходимо иметь:

- батиграфические кривые [$W=f(H_{ВБ})$ – зависимость объема водохранилища от уровня верхнего бьефа (кривая объема водохранилища), $\Omega=f(H_{ВБ})$ – зависимость площади зеркала водохранилища от уровня верхнего бьефа (кривая площади зеркала водохранилища)];
- кривые зависимости уровней воды от сбросных расходов в нижний бьеф [$Q_{НБ}=f(H_{НБ})$];
- диспетчерский график работы водохранилища.

Так как Аргазинское водохранилище является водохранилищем с многолетним регулированием стока – для модели были взяты 21 год наблюдений (1980–2000 гг.), что соответствует 252 месяцам, именно это время имитации и было использовано.Имитационная модель работы Аргазинского водохранилища представлена на рисунке 1.

В случаеработы трассы по переброске, в модель введен блок с постоянным источником сигнала «Переброс».

Ввод в модель данных по притоку воды в водохранилище, испарению и осадкам предполагается напрямую, путем создания файла расширения «.mat» и считыванием данных из него по средствам блока «FromFile».

В расходную часть помимо потерь на испарение входят потери на фильтрацию. При одних и тех же гидрогеологических условиях фильтрация зависит от уровня воды в водохранилище и площади его ложа. В модели потери на фильтрацию представлены как блок источника сигнала с постоянным значением «Constant».

Нормы потерь на фильтрацию при различных гидрогеологических условиях отражены в таблице 1.

Для определения объема потерь и количества осадков сигналы блоков сначала перемножаются с сигналом блока определения площади зеркала водохранилища. Перемножение осуществляется с помощью блоков «Product».

Таблица 1

Норма потерь воды на фильтрацию из водохранилища (по Я.Ф. Плешкову)

Условия	Слой за год, см	% от среднего объема	
		за месяц	за год
Хорошие	0–50	0,5–1	5–10
Средние	50–100	1–1,5	10–20
Плохие	100–200	1,5–3	20–40

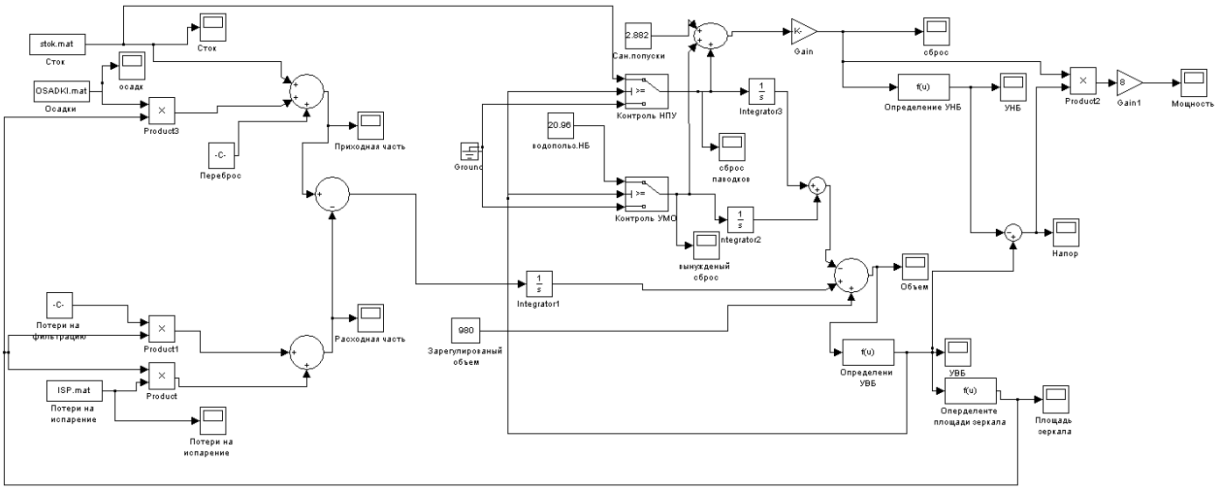


Рис. 1. Имитационная модель работы Аргазинского водохранилища в Simulink

Сигналы от блока притока, осадков, переброса приходят в сумматор приходной части, затем складываются с сигналом расходной части (потерь). Далее сигнал поступает в блок «Intergrator1», благодаря чему создается имитация наполнения водохранилища.

Под регулированием стока подразумевается объем водохранилища на начало составления водохозяйственного баланса (ВХБ), а соответственно на начальный момент моделирования. В модели представлен в виде блока«Constant».

Попуски из водохранилища подчинены требованиям водопользователей в нижнем бьефе (которым является Челябинский промрайон), поэтому гарантированный попуск, помимо санитарно-экологического 0,44 $м^3$/с будет увеличен на 8,9 $м^3$/св случае отсутствия переброски и на 13$м^3$/с в случаеработы трассы. Данные представлены в виде блоков источника постоянного сигнала. При этом необходимо учитывать критические отметки уровня верхнего бьефа.

Контроль УМО и НПУ представляет собой блоки «Switch». Входными сигналами, для которых являются значения уровней УМО и НПУ соответственно. При достижении отметки УМО блок контроля УМО переключает значения сбросов на источник нулевого сигнала, то есть прекращает сбро-

сы. При достижении уровня верхнего бьефа отметки НПУ, блок управления НПУ переключает вынужденные сбросы с источника нулевого сигнала на сигнал стока, то есть производит сброс в нижний бьеф всего объема стока останавливая наполнение водохранилища.

Сигнал сбросов в нижний бьеф представлен на рисунке 2. Блок Gain преобразует размерность сигнала млн.м^3/месв м^3/с.

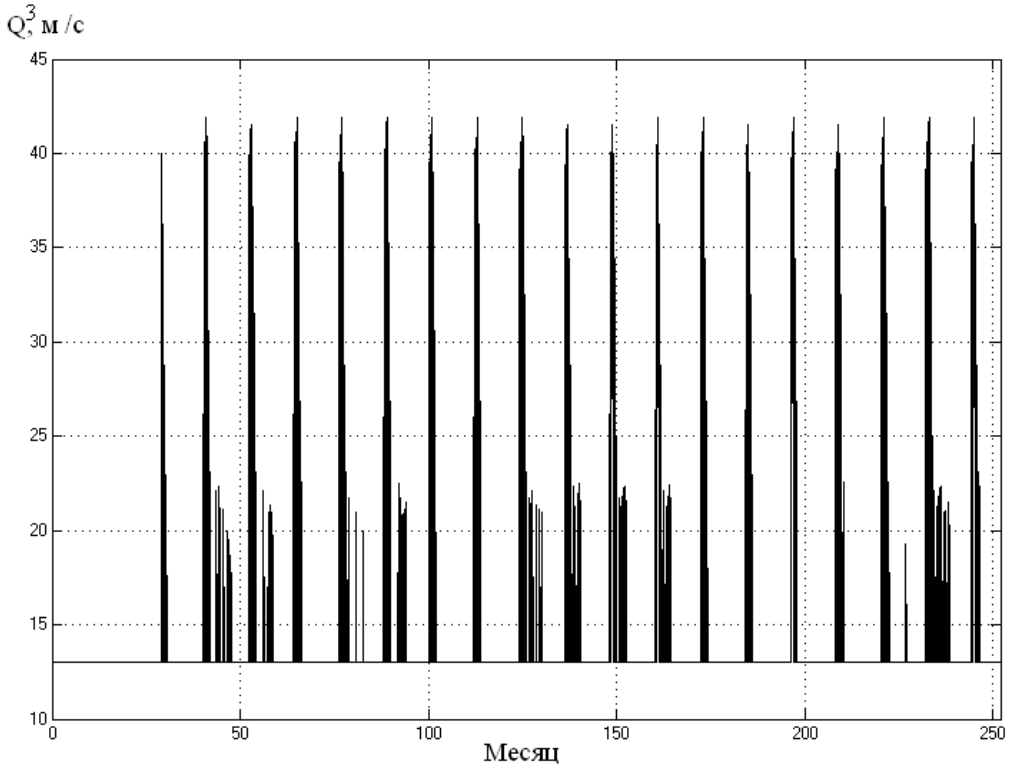


Рис. 2. Помесячные сбросы Аргазинского водохранилища

Полученный сигнал сбросов идет в блок определения УНБ, а также позволяет определить объем водохранилища.

От блоков приходной и расходной частей, а также от интегратора сигнал поступает в сумматор, куда так же приходят сигналы от блока зарегулированного объема и сумматора сбросов. Выходящий оттуда сигнал показывает изменения объема водохранилища. Выходящий из сумматора сигнал идет в блок определения уровня верхнего бьефа (УВБ).

Из блока определения УВБ сигнал идет к блоку определения площади зеркала водохранилища,из последнего тот поступает к блокам определения объемов потерь и осадков.

Для отображения уровней верхнего и нижнего бьефов, а также площади зеркала водохранилища использованы блоки Fcn, представляющие собой математические функции, которые описывают эти параметры. Для определения математических зависимостей, позволяющих определить параметры

водохранилища в определенный момент времени, была проведена аппроксимация кривых объемов и площадей водохранилища и зависимости уровня нижнего бьефа от расхода..

Сигналы из блоков определения уровней верхнего и нижнего бьефов поступают в сумматор, что позволяет определить напор (рис. 3).

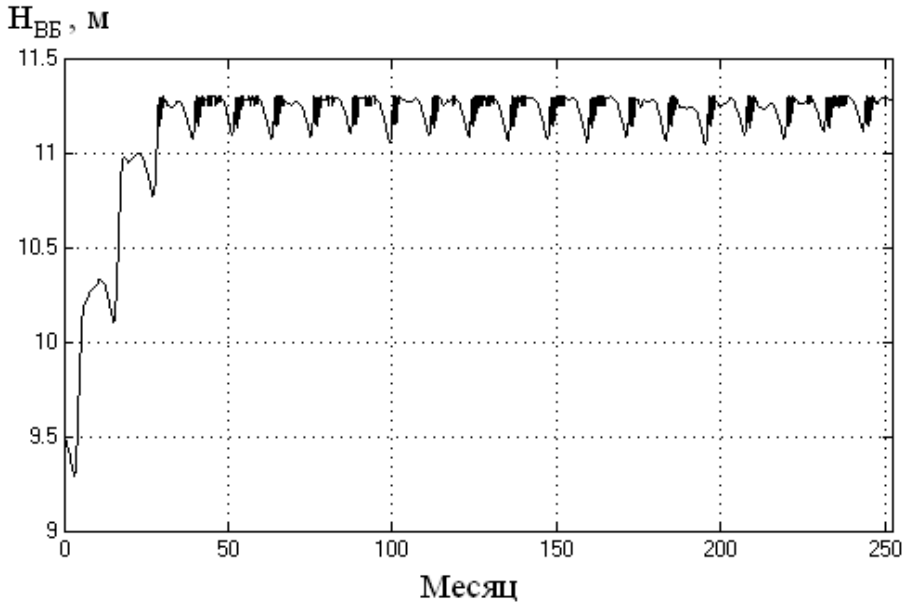


Рис. 3. Сигнал, показывающий колебание напора водохранилища

Далее сигналы сбросов в нижний бьеф и напоров перемножаются в блоке «Product».

Учитывая коэффициент полезного действия турбины и генератора, мощность малой ГЭС будет равна [3]:

$$N = (7.5 \div 8) \cdot Q \cdot H, \text{ кВт} \quad (5)$$

где H – напор, м;Q - расход воды через турбину, $м^3/с$;

Данный коэффициент также будет отображать блок «Gain1».

Результирующий сигнал показывает мощность створа, он изображен на рисунке 4 .

Рисунок 4 позволяет сделать вывод, что гарантированная мощность створа Аргазинского гидроузла при учете переброски из бассейна реки Уфа составляет 1230 кВт, сезонная – 2000 кВт с использованием 1 месяц в году, кратковременные пики составляют 3500 кВт продолжительностью менее 0,5 месяца. В случае отсутствия переброски гарантированная мощность может составить 800 кВт с аналогичными пиками.

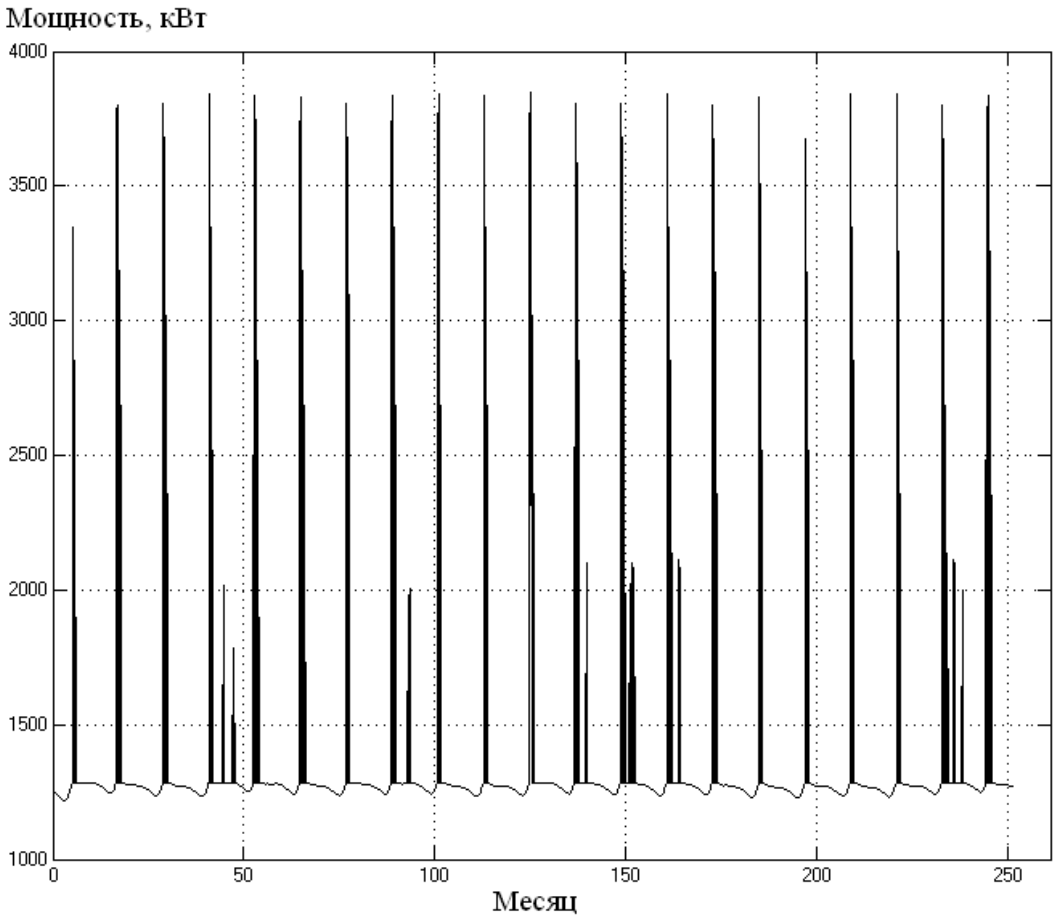


Рис. 4. Сигнал, показывающий мощность створа Аргазинского гидроузла с учетом переброса стока из бассейна р. Уфа

Библиографический список

1. Разработка проекта правил использования Миасского водохранилища. Научно-техническая информация. ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева». – СПб, 2013.

2. Приказ МПР РФ от 30 ноября 2007 г. N 314 «Об утверждении Методики расчета водохозяйственных балансов водных объектов».

3. «Методические указания по разработкеправил использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов электростанций» от 01 января 2000 г.

4. Долгобродское водохранилище на р. Уфе и комплекс гидротехнических сооружений по передроске части стока р. Уфы в р.Миасс: Технический проект. – Красноярск, 1976.

К содержанию

УДК 502.175 + 628.16

ОЧИСТКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ И ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

В.В. Крымский, Ю.Г. Мингажева

В статье представлены результаты исследования очистки производственной воды посредством воздействия на неё наносекундными электромагнитными импульсами. В качестве объектов исследования взяты пробы воды на выходе и входе очистных сооружений «Участок нейтрализации» Учалинского горно-обогатительного комбината и пробы питьевой воды города Учалы после очистки. В качестве источника электромагнитных импульсов использовался генератор Ефанова с длительностью импульса 1 нс, амплитудой импульса 15 кВ, частотой повторения импульсов 1кГц, импульсной мощностью каждого электромагнитного импульса ≥ 3МВт.

Ключевые слова: наносекундные электромагнитные импульсы (НЭМИ); тяжёлые металлы; гидратированный электрон.

Существуют различные способы очистки воды от тяжелых металлов. Наиболее широко распространенные в мире методы очистки производственной воды и отработанных водных растворов основаны на моделировании природных процессов – фильтрации, сорбции, ионного обмена. Однако установки, в которых реализованы указанные процессы, нуждаются в регенерации и периодической замене основного рабочего элемента: фильтров, сорбентов, ионообменных смол. При этом возникают проблемы с утилизацией отработанных материалов, а также сохраняется необходимость восполнения их потерь путем производства из невозобновляемых сырьевых запасов новых материалов взамен отработанных [1].

В прошлом десятилетии был предложен новый метод очистки воды воздействием наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ). Очистка воды методом НЭМИ обеспечивает устранение вредных примесей и тяжелых металлов. Для этого предлагается воздействие на воду, находящуюся в накопительной или прямоточной системе водоснабжения, электромагнитных импульсов с продолжительностью каждого менее одной наносекунды [2]. Экспериментальная установка НЭМИ показана на рис. 1.

Для проверки воздействия НЭМИ на характеристики технических вод были проведены следующие эксперименты. Сточная вода бралась на выходе очистных сооружений Учалинского ГОК.

Опыт 1. Облучение производилось в стеклянном стакане в экране из медной фольги. Объём воды 600 мл. Излучатель выполнен из одного стержня с серебряным покрытием. Глубина погружения составляет 30 мм. Время облучения 15 мин.

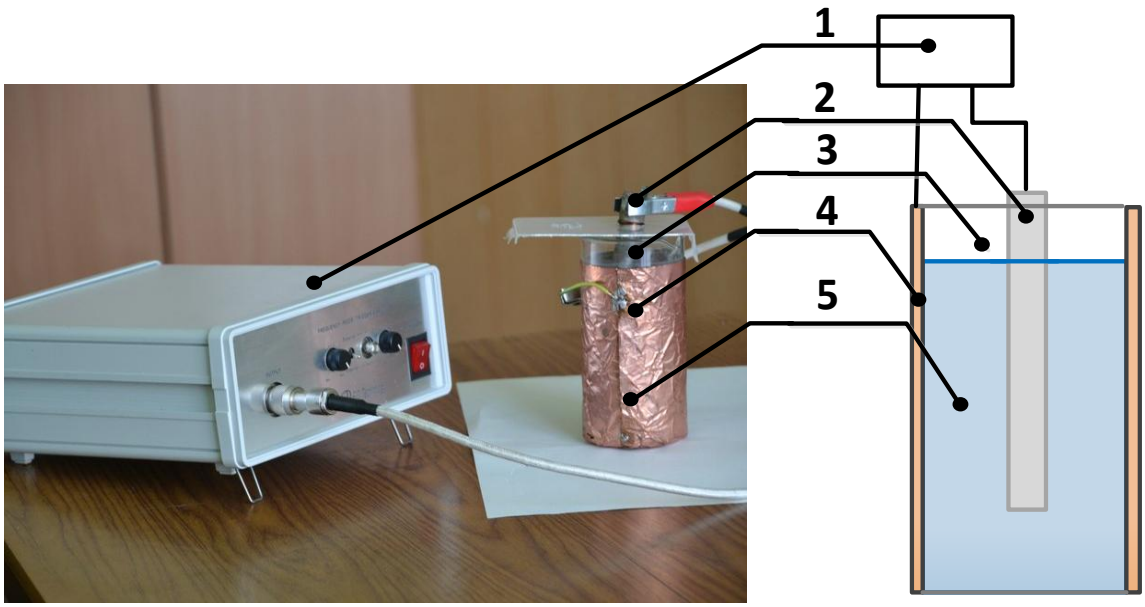


Рис. 1. Экспериментальная установка НЭМИ:
1 – генератор НЭМИ; 2 – круглый стержень с серебряным покрытием;
3 – стакан; 4 – экран из медной фольги; 5 – облучаемая жидкость

Опыт 2. При тех же условиях производилось облучение этой же воды, предварительно увеличив pH до 9,5, с добавлением NaOH. Время облучения 15 мин. После облучения заметное помутнение воды. Результаты анализов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты анализов после облучения сточной воды на выходе очистных сооружений «Участок нейтрализации» Учалинского ГОК

Наименование показателей	Исх.	Облуч. при	
		pH=8,03	pH=9,5
pH	8,03	8,31	11,62
Медь, мг/л	0,077	0,029	0,020
Железо, мг/л	0,050	0,035	0,039
Марганец, мг/л	0,142	0,19	0,019
Сульфаты, мг/л	2875,0	2883,3	2477,8

Из таблицы видно, что при добавлении NaOH, значительно уменьшилось содержание марганца, цинка, меди; заметно уменьшение содержания железа.

Проводились опыты производственной воды на входе очистных сооружений Учалинского ГОК.

Опыт 3. Облучение производилось в стеклянном стакане в экране из медной фольги. Объём воды 600 мл. Излучатель выполнен из одного стержня с серебряным покрытием. Глубина погружения составляет 30 мм. Время облучения 15 мин.

Опыт 4. При тех же условиях производилось облучение этой же воды, предварительно увеличив pH до 9,5, с добавлением NaOH. Время облучения 15 мин. После облучения заметное помутнение воды. Результаты анализов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты анализов после облучения сточной воды на входе очистных сооружений «Участок нейтрализации» Учалинского ГОК

Наименование показателей	Исх.	Облуч. при	
		pH=8,03	pH=9,5
pH	5,59	5,58	11,42
Медь, мг/л	5,989	5,67	0,033
Железо, мг/л	0,321	0,236	0,068
Цинк, мг/л	139,33	146,03	0,807
Марганец, мг/л	19,10	19,2	0,019
Сульфаты, мг/л	2458,4	2550,0	2447,3

Из таблицы видно, что содержание тяжелых металлов уменьшаются от 4,7 до 1000 раз. По проделанным опытам можно сказать о том, что значительное уменьшение тяжелых металлов происходит при больших значениях pH.

Проводились опыты питьевой воды города Учалы на выходе очистных сооружений.

Опыт 5. Облучение производилось в стеклянном стакане в экране из медной фольги. Объём воды 600 мл. Излучатель выполнен из одного стержня с серебряным покрытием. Глубина погружения составляет 30 мм. Время облучения 15 мин. Результаты анализов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты анализов после облучения городской воды после очистки

Наименование показателей	Исх. вода	Облуч. вода
pH	7,55	7,48
Медь, мг/л	0,012	0,011
Железо, мг/л	0,091	0,047
Марганец, мг/л	0,036	0,032

Из таблицы видно заметное уменьшение содержания железа и малые уменьшения содержаний меди и марганца.

Воздействие НЭМИ на воду аналогично процессу радиолиза воды, в результате которого образуются химически активные соединения, основные из которых: гидратированный электрон e-aq, атомарный водород H, перекись водорода, гидроксильный OH*-радикал [3].

Гидратированный электрон, который является активным восстановителем, о чем свидетельствует величина его окислительно-восстановительного потенциала, равная – 2,77 В. Гидратированный электрон взаимодействует со многими веществами, ионы которых содержатся в воде. Уменьшение концентрации ионов железа Fe2+, Fe3+ можно объяснить следующим образом: ионы Fe2+реагируют с гидратированным электроном с образованием ионов Fe+ Продуктом реакции ионов Fe3+ с гидратированным электроном являются ионы Fe2+. Ионы Zn2+ также реагируют с гидратированным электроном, далее происходит образование нерастворимых соединений и выпадение их в осадок [4].

В результате проведенных исследований можно сказать:

1) увеличение pH воды положительно влияет на её очистку с помощью НЭМИ;

2) облучение воды НЭМИ, по эффективности, аналогично методу электрохимической активации;

3) очистка воды с помощью НЭМИ отличается простотой технической реализации;

4) проведенные эксперименты на производственной воде с Учалинского ГОК и на городской питьевой воде показали эффективность очистки от тяжелых металлов с помощью НЭМИ.

По нашему мнению, широкое внедрение этого метода, как в сочетании с биохимической очисткой, так и отдельно, может в определенной степени решить ряд задач, связанных с очисткой воды.

Библиографический список

1. Балакирев, В.Ф. Электроимпульсная обработка водных растворов / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, В.А. Батурин, А.П. Грешняков // Труды VI Международной конференции «Радиационно-термические эффекты и процессы в неорганических материалах». – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – С. 419–423.

2. Шабурова, Н.А. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на расплавы цветных металлов / Н.А. Шабурова // Вестник ЮУрГУ, Серия «Математика, физика, химия». – 2006. – Вып. 7. – № 7(62). – С. 152–156.

3. Пикаев, А.К. Импульсный радиолиз и его применение / А.К. Пикаев и др. – М.: Атомзидат, 1980. – 280 с.

4. Хармут, Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи / Х.Ф. Хармут; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1985. – 370 с.

К содержанию

УДК 539.1.06:537 + 539.16:537

ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНАЯ ОБРАБОТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ РАДИОНУКЛИДОВ

В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Е.В. Литвинова

Рассмотрено влияние облучения наносекундными электромагнитными импульсами на водные растворы радионуклидов ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239}Pu. Экспериментально доказана возможность снижения активности растворов с радионуклидами ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239}Pu.

Ключевые слова: наносекундные электромагнитные импульсы, облучение, растворы радионуклидов.

В наших работах [1–4] сообщалось о действии наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) на свойства различных веществ. В данной работе представлены экспериментальные результаты по воздействию НЭМИ на водные растворы радионуклидов ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239}Pu. В ранее проведенных опытах одновременно использовались различные условия эксперимента: типа генераторов, виды облучателя, величины pH и т. д. Поэтому представляет интерес провести опыты с максимально возможной степенью идентичности.

Экспериментальное оборудование

Для воздействия на водные растворы использовались однополярные положительные импульсы тока длительностью 1 нс с амплитудой 15 кВ и частотой повторения 1 кГц от генератора фирмы «ФИД-технология» (Санкт-Петербург).

Облучение радиоактивных растворов проводилось на двух установках. Установка «стержень в стакане» состоит из медного стержня, который погружается в стакан с жидкостью. Со стержнем соединяется вывод центральной жилы кабеля, вывод оплетки кабеля соединяется с металлическим стаканом. В первой серии опытов использовался металлический сосуд диаметром 64 мм и высотой 94 мм. Внутрь сосуда вставлялся облучатель в виде медного стержня диаметром 6 мм и длиной 100 мм на расстоянии 14 мм от дна сосуда.

Установка проточного типа выполнена в виде двух металлических коаксиальных цилиндров, между которыми проходит спираль из гибкого шланга. Выводы генератора соединяются с цилиндрами. Через шланг пропускается раствор с радионуклидом. В установке имеются расходная и приемная емкости. Скорость пропускания раствора регулируется и составляет 2,1 л/мин.

Первая серия опытов

В этой серии измерение активности растворов всех радионуклидов проводилось на малофоновой установке УМФ-2000 путем отбора 2 параллельных проб объемом 0,1 мл, высушиванием их под лампой и троекратном измерении счетных импульсов за 100 с. Изменяемыми параметрами являются начальная величина pH раствора и время облучения.

Опыт 1. Подготовленные растворы азотнокислого ^{90}Sr объемом по 100 мл с различными значениями pH=5,72 (100 кБк/л) и pH=10,0 (115 кБк/л) облучали в течение 2, 5 и 10 минут. Результаты измерения активностей растворов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Активность проб растворов ^{90}Sr

Проба, время	Значение	pH=5,72 Облученная	pH=10,0 Облученная
2 мин	абсолютное, кБк/л	82±5,1	96±3,9
	% к исходной	–18	–16
5 мин	абсолютное, кБк/л	81±6,3	102±1,1
	% к исходной	–19	–11
10 мин	абсолютное, кБк/л	82±4,1	90±1,1
	% к исходной	–18	–26

Из полученных данных видно, что облучение нейтральных растворов приводит к снижению активности, причем увеличение времени облучения не оказывает существенного влияния. Облучение же щелочных растворов, содержащих ^{90}Sr, показало некоторую зависимость от времени облучения (активность снизилась с 16 до 26 %). Однако через сутки образцы, облученные 10 мин и перелитые в пластмассовые сосуды, имели активность – 100±0,9 кБк/л (pH=5,72) и 106±1,3 кБк/л (pH=10,0).

Опыт 2. Готовили два раствора азотнокислого ^{137}Cs объемом по 100 мл с различным значением pH=5,72 (61 кБк/л) и pH=10,0 (61 кБк/л), соответственно. Полученные растворы облучали в течение 2, 5 и 10 минут. Результаты измерения активностей проб исходного и облученных растворов приведены в таблице 2.

Полученные результаты показали, что облучение значительно снижает активность растворов ^{137}Cs с pH=5,72. Через сутки в образцах, облученных 10 мин и перелитых в пластмассовые сосуды, активность практически не изменилась и составила 39±2,6 кБк/л при pH=5,72 и 51±1,1 кБк/л при pH=10,0.

Опыт 3. Использовались три подготовленных раствора с радионуклидом ^{239}Pu объемом по 100 мл каждый со значением pH=2,54 (142 кБк/л); pH=5,72 (140 кБк/л) и pH=10 (140 кБк/л), которые облучались 5 и 10 мин. Результаты измерений активностей растворов приведены в таблице 3.

Таблица 2

Активность проб растворов ^{137}Cs

Проба, время	Значение	pH=5,72 Облученная	pH=10 Облученная
2 мин	абсолютное, кБк/л	39±1,8	57±1,3
	% к исходной	–36	–7
5 мин	абсолютное, кБк/л	42±0,5	45±0,7
	% к исходной	**–31**	–26
10 мин	абсолютное, кБк/л	42±1,1	52±0,7
	% к исходной	–31	–15

Таблица 3

Активность проб растворов ^{239}Pu

Проба, время	Значение	pH=2,54 Облученная	pH=5,72 Облученная	pH=10,0 Облученная
5 мин	абсолютное, кБк/л	137±0,3	140±0,2	100±0,9
	% к исходной	–4	–0	–29
10 мин	абсолютное, кБк/л	138±0,3	122±3,9	92±0,7
	% к исходной	–3	–13	–34

Из табл. 3 видно, что с увеличением pH исходных растворов и времени облучения происходит снижение активности растворов, что может быть связано с процессами гидролиза плутония особенно в щелочных растворах. Через сутки образцы, облученные 10 мин и перелитые в пластмассовые сосуды, показали следующие значения активностей: 140±0,7 кБк/л (pH=2,50); 130±1,1 кБк/л (pH=5,72) и 130±1,3 кБк/л (pH=10,0).

Вторая серия опытов.

Существенное отличие проведения опытов на установке проточного типа состоит в использовании значительно большего объема растворов, чем в предыдущих опытах. Имеется также возможность повторного пропускания раствора – второй, третий и т.д. прогоны.

Опыт 1. Облучался раствор азотнокислого ^{90}Sr объемом 3,5 л со значением pH=6. Измерение активности растворов проводилось по стандартной методике: отбор проб, высушивание, измерение активности прибором УМФ-2000. Проводилось четырехкратное измерение скорости счета по β-активности в течение 1000 с. Отбор исходной пробы проводился из подготовленного раствора. Отбор облученной пробы производился из приемной емкости.

Для проведения повторного прогона раствора оставшийся раствор из расходной емкости сливался, установка промывалась проточной водой и проводилось повторное облучение раствора. Всего проводилось три прогона. Для проведения повторных измерений активности облученных растворов через 1, 3 и 6 суток были отобраны пробы объемом 50 мл и помещены в сосуды с притертой пробкой. Из этих сосудов отбирались пробы по 1,5 мл для измерения активности. Результаты измерения активностей проб исходного и облученных растворов приведены в таблице 4.

Таблица 4

Активность проб растворов ^{90}Sr, имп/с

Проба, время,	Значение	Исходная	1 прогон	2 прогона	3 прогона
0	абсолютное	7,458 ± 0,120	8,703 ± 0,129	7,614 ± 0,121	7,231 ± 0,118
	% к исходной		+16	+1	–3
1 сут	абсолютное	–	6,702 ± 0,113	6,332 ± 0,110	6,721 ± 0,114
	% к исходной		–10	–15	–10
3 сут	абсолютное	–	–	6,729 ± 0,114	6,866 ± 0,114
	% к исходное		–	–10	–8
6 сут	абсолютное	–	5,986 ± 0,107	6,937 ± 0,112	6,950 ± 0,116
	% к исходной		–20	–7	–13

Из таблицы видно, что увеличение количества прогонов мало изменяет активность растворов сразу после облучения. Значительное уменьшение активности на 20 % происходит в растворе после одного прогона спустя 6 суток после обработки.

Опыт 2. Облучение растворов с радионуклидом ^{137}Cs проводилось также как и растворов стронция. Подготовлен раствор хлористого цезия объемом 3,5 л со значением pH=6. Измерение активности растворов проводилось по стандартной методике на гамма-спектрометре ГАММА-1П. Сосуд с 50 мл исходного раствора ^{137}Cs помещался непосредственно в измерительную камеру спектрометра. Затем проводилось облучение раствора. После чего из приемной емкости 50 мл облученного раствора переливали в такой же сосуд, который вновь помещался в измерительную камеру. После отбора пробы исходного и облученного растворов были оставлены в этих же сосудах закрытыми плотной пробкой для проведения повторных измерений активности через 1, 3 и 6 суток. Повторные прогоны осуществлялись аналогично облучению растворов стронция. Значения активностей исходного и облученных растворов приведены в таблице 5.

Таблица 5

Активность растворов цезия ^{137}Cs, кБк/л

Проба, время,	Исходная	1 прогон	2 прогона	3 прогона
0	37,0±3,7	22,3±3,1	23,0±2,3	24,2±2,4
1 сут	37,0 ± 3,3	23,8 ± 2,4	25,1 ± 2,7	24,8 ± 2,6
3 сут	38,0 ± 3,7	23,3 ± 2,6	25,3 ± 2,6	24,0 ± 2,4
6 сут	39,0 ± 3,2	22,8 ± 2,3	24,8 ± 2,7	25,1 ± 2,7

Из таблицы видно, что после первого прогона происходит уменьшение активности раствора на 40 %. Уменьшение активности растворов после второго и третьего прогонов не происходит. Уменьшенное после первого прогона значение активности раствора сохраняется через 1, 3 и 6 суток.

Опыт 3. Облучение растворов с радионуклидом ^{238}Pu проводилось также как и растворов стронция. Подготовлен раствор азотнокислого плутония ^{238}Pu объемом 3,5 л со значением pH=10. Измерение активности растворов проводилось по стандартной методике. Из анализируемого раствора отбиралась проба объёмом 0,2 мл. Проба наносилась на подложку, высушивалась и помещалась в измерительную камеру альфа-спектрометра СЭА-13П.

Для проведения повторных измерений активности исходного и облученных растворов через 1, 3 и 6 суток были отлиты пробы объемом 50 мл и помещены в сосуды с притертой пробкой. Из этих сосудов отбирались пробы по 0,2 мл для измерения активности. Результаты измерения активностей проб исходного и облученных растворов приведены в таблице 6.

Таблица 6

Активность проб растворов ^{238}Pu, кБк

Проба, время,	Значение	Исходная	1 прогон	2 прогона	3 прогона
0	абсолютное	10,8 ± 1,2	8,7 ± 1,1	6,1 ± 0,6	7,3 ± 1
	% к исходной		–20	–45	–33
1 сут	абсолютное	11,9 ± 1,3	4,3 ± 0,6	6,1 ± 0,7	6,7 ± 0,7
	% к исходной	+1	–60	–44	–38
3 сут	абсолютное	3,5 ± 0,5	3,7 ± 0,6	6,7 ± 1,1	3,8 ± 0,7
	% к исходной	–67	–66	–38	–65
6 сут	абсолютное	2,1 ± 0,5	2,5 ± 0,5	4,1 ± 0,7	4,1 ± 0,7
	% к исходной	–80	–77	–62	–62
14 сут	абсолютное	0,5 ± 0,15	–	–	2,55 ± 0,45
	% к исходной	–95	–	–	–73

Из таблицы видно, что активность исходного раствора со временем значительно уменьшается. Это показывает, что независимо от облучения при больших значениях pH происходит осаждение плутония на дно сосуда. Увеличение количества прогонов уменьшает активность растворов сразу после облучения.

Выводы

Проведенные исследования показали возможность снижения активности растворов с радионуклидами ^{90}Sr, ^{137}Cs, ^{238}Pu, ^{239}Pu после воздействия на них НЭМИ. Для облученных растворов радионуклидов получены различные результаты. У растворов со ^{90}Sr наблюдается уменьшение активности за короткое время облучения. У растворов с ^{137}Cs уменьшение активности достигает 40 % и сохраняется длительное время. У растворов с плутонием наблюдается эффект осаждения радионуклида на дно сосуда.

Теоретические вопросы влияния ионизации и возбуждения атомов электромагнитным полем на процессы радиоактивного распада радионуклидов рассмотрены в работах Д.В. Филиппова. Для ^{137}Cs предложена модель распада в связанное состояние [5]. Происходит увеличение вероятности распада от 2,9 до 12 раз при наложении поля.

Библиографический список

1. Балакирев, В.Ф. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на растворы радионуклидов / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, В.А. Батурин // Труды международного конгресса «Фундаментальные основы технологий переработки и утилизации техногенных отходов». – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – С. 356–359.

2. Krymski V.V., Balakirev V.F., Litvinova E.V., Ibragimova E.A., Kuzmina M.Y. Nanosecond pulse treatment on water and water solution // Journal of Chemistry and chemical engineering. 2013. V 7, № 6. pp. 529–532.

3. Крымский, В.В. Воздействие наносекундных электромагнитных импульсов на свойства веществ / В.В. Крымский, В.Ф. Балакирев // Доклады РАН. – 2002. – Т. 385. – № 6. – С. 786–787.

4. Балакирев, В.Ф. Электроимпульсные нанотехнологии / В.Ф. Балакирев, В.В. Крымский, Б.А. Кулаков, Ри Хосен. – Екатеринбург, УРО РАН, 2009. – 141 с. – URL: http://model.susu.ru.

5. Филиппов, Д.В. Влияние ионизации и возбуждения атомов электромагнитным полем на условия стабильности ядер и процессы радиоактивного распада: автореф. дис. … д-ра физ.-мат. наук / Д.В. Филиппов. – М.: ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, 2008. – 30 с.

К содержанию

УДК 620.97 +621.31

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

С.А. Малюгин

В статье рассматриваются методы повышения эффективности использования солнечной энергии в автономных системах энергоснабжения. Был проведён анализ мирового энергопотребления и выделена актуальность применения солнечной энергетики в сельском хозяйстве. Рассмотрены принципы преобразования солнечной энергии в электрическую при помощи фотоэлектрических преобразователей (ФЭП). Проведён анализ влияния ширины запрещенной зоны ФЭП на преобразование солнечной энергии в электрическую и на его основе были рассмотрены основные методы повышения эффективности преобразования за счёт спектрального разделения светового потока.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь (ФЭП), солнечная энергия, солнечный элемент, солнечный модуль.

Солнечная энергия – возобновляемый и неисчерпаемый источник энергии, который используется для получения как тепловой, так и электрической энергии.

Использование солнечной энергии в разных сферах деятельности человека увеличивается год от года. Бурное развитие отрасли началось в середине 2000-х годов и было вызвано, главным образом, политикой развитых стран по снижению зависимости от углеродного сырья в электроэнергетике и стремлением достичь целей по сокращению выбросов парниковых газов. В частности, Евросоюз поставил задачу довести выработку электроэнергии за счёт возобновляемых источников энергии до 30 % от общего потребления энергии. Так, в 2012 г. мировая установленная мощность солнечных фотоэлектрических станций составила 110,1 ГВт – это менее 2 % суммарного показателя по всей электроэнергетике мира (данная доля увеличилась с 0,2 % в 2007). Основной прирост мощностей фотоэлектрических станций пришёлся на последние 5 лет, когда их объём вырос в 10 раз (рис. 1) [9].

В тройку мировых лидеров в производстве фотоэлектрических модулей входит Япония – 45,3 %, Европа – 28,3 %, США – 8,5 % и Китай – 8,3 %. Для России в тройку лидеров входит Краснодарский край – 39,7 %, Москва и Московская область – 35,7 %, Рязанская область – 24,6 % [5, 8].

По государственной программе Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» от 3 апреля 2013 года № 512-р должно быть достигнуто снижение энергоемкости ВВП в 2020 году на 13,5 % к 2007 году.

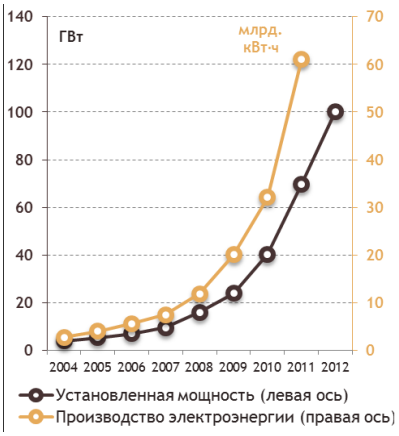


Рис. 1. Развитие фотоэлектрической отрасли в мире

Применительно к сельскому хозяйству солнечная энергетика может быть использована для сушки сена, подогрева воды, создания более эффективных теплиц, для обеспечения энергией отдалённых от линий электропередач жилых домов сооружений и оборудования и т.д. В связи с обязательным использованием мероприятий по энергоснабжению во всех областях роль ВИЭ будет возрастать.

Солнечная энергия преобразуется в энергию электрическую с помощью солнечных фотоэлектрических элементов, действие которых основано на явлении фотоэффекта. Солнечные элементы (СЭ) или фотоэлементы, служат для пространственного преобразования зарядов и создания ЭДС в полупроводниковом переходе [7].

Мощность одного солнечного элемента составляет в среднем 0,7–0,75 Вт. Для получения большей мощности СЭ соединяют между собой последовательно. Так образуются солнечные модули (СМ), которые далее могут собираться в солнечную батарею [7].

Выработка электрической энергии солнечной батареи зависит от ряда условий:

– интенсивности солнечного излучения;
– температуры окружающей среды;
– спектральной характеристики источника света;
– типа фотопреобразователя и т.д.

Вырабатываемая солнечной батареей энергия прямо зависит от интенсивности солнечного излучения, от угла падения солнечных лучей на плоскость, прозрачности атмосферы и т.д. [3]. Максимальная выработка энергии будет достигнута, если угол падения солнечных лучей на плоскость модуля будет равен 90°. Для повышения эффективности использования солнечных лучей, применяют устройства слежения за движением солнца.

Основным материалом используемым для солнечных батарей, получаемых промышленным способом является кремний (Si). КПД фотоэлемента зависит от наличия примесей в кремнии, так для:

– монокристаллического (КПД – 15 %);

– поликристаллического (КПД – (10–12) %);

– аморфного ((5–7) %).

Монокристаллические солнечные батареи применяются в основном для искусственных спутников Земли. В сельском хозяйстве возможно применение поликристаллических и аморфных модулей, КПД которых ещё меньше. Поэтому перед учёнными и разработчиками стоит задача повышения КПД преобразования солнечной энергии, поскольку известно, что повышение КПД на 1 % ведёт к значительному увеличению производства энергии. Известно, что в лабораторных условиях было получено значение КПД 44,7 %.

Из зонной теории твёрдого тела известно что, полупроводники имеют зону проводимости и валентную зону, отделяемых друг от друга запрещенной зоной W_g (рис. 2).

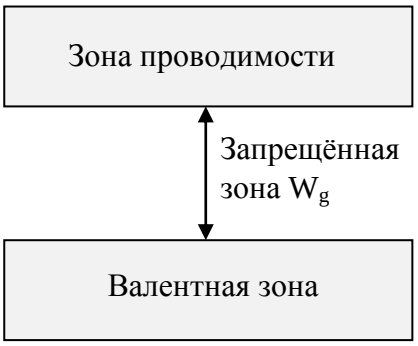


Рис. 2. Иллюстрация запрещённой зоны в полупроводнике

В зависимости от ширины запрещённой зоны, материалы проводников подразделяются на прозрачные и непрозрачные (чувствительные и нечувствительные), для определённых спектров частот электромагнитного излучения.

Граница прозрачности и непрозрачности зависит от типа материала полупроводника. В табл. 1 приведены данные для некоторых полупроводников [1].

Солнечный элемент, подвергающиеся воздействию монохроматического света, при преобразовании излучения в электрическую энергию теоретически могут иметь эффективность, близкую к 100%. Однако, на практике СЭ облучаются широкополосным излучением, которое представляет собой поток фотонов с различной энергией. В этом случае эффективность преобразования ограничивается за счёт двух основных механизмов:

1. Фотоны, энергия которых меньше, чем ширина запрещённой зоны, не способны создать электронно-дырочную пару. Они могут пройти насквозь через материал или, провзаимодействовав с ним, преобразоваться в тепло.

2. Фотоны, энергия которых больше, чем ширина запрещённой зоны, создают электроны и дырки с энергией, превышающей среднюю тепловую энергию этих носителей заряда. Избыток энергии рассеивается в тепло.

Таблица 1

Зависимость нижнего порога
чувствительности полупроводников от запрещённой зоны

Материал	Длина волны λ, нм	Запрещённая зона W_g, эВ	Область, в которой происходит изменение прозрачности материала
Серое олово (α-Sn)	15500	0,08	Дальняя ИК-область
Германий (Ge)	1850	0,67	Инфракрасный диапазон
Кремний (Si)	1130	1,10	Инфракрасный диапазон
Арсенид галлия (GaAs)	920	1,35	Близкая к ИК
Фосфид галлия (GaP)	555	2,24	Видимый свет
Алмаз (C)	230	5,40	Ультрафиолетовое излучение

Таким образом, только часть энергии фотона полезна для преобразования солнечной энергии в электрическую.

Одним из методов повышения КПД солнечной батареи является использование селективного спектрального разделения светового пучка всего частотного диапазона солнечного излучения [1]. Для селективного спектрального разделения применяются:

1. Каскадные фотоэлементы. Суть метода заключается в использовании фотопреобразователей с различной шириной запрещённой зоны, соединённых каскадно друг относительно друга.

2. Фильтрующие элементы. К таким элементам можно отнести интерференционные фильтры и элементы, содержащие раствор сульфата кобальта.

Интерференционные фильтры состоят из ряда слоёв материалов с различными преломляющими способностями. При некоторых частотах потоки отражённого излучения могут складываться, проходя через фильтр, а при других – вычитаться, оставаясь для фильтра непрозрачными.

Сульфат кобальта абсорбирует часть энергии до того, как часть энергии попадёт на находящиеся под ним кремневые диоды, превращая поглощённую энергию в тепло.

3. Голографические концентраторы (рис. 3). Солнечный свет концентрируется и направляется на голографическую пластину, с помощью которой раскладывается по спектру в виде радуги.

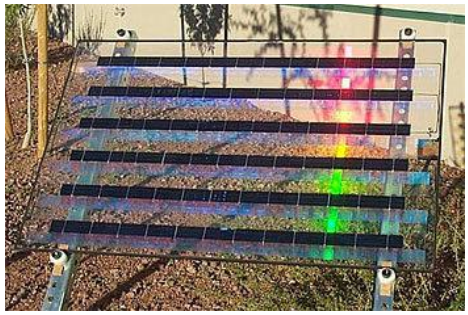


Рис. 3. Общий вид голографического солнечного модуля

4. Люминесцентные концентраторы (ЛСК). В ЛСК молекулы красителей в матрице абсорбируют падающее излучение и эмитируют свет с большей длиной волны. Значительная часть эмитированного света в результате полного внутреннего отражения улавливается в ЛСК и направляется к торцам концентратора, где преобразуется установленными там фотопреобразователями в электричество. Таким образом, ЛСК обеспечивают концентрацию света с одновременной люминесцентной трансформацией солнечного излучения в спектральный интервал максимальной чувствительности ФЭП. Большой плюс ЛСК заключается в том, что они работают без точной ориентации на Солнце и стоимость их изготовления относительно мала (рис. 4) [6].

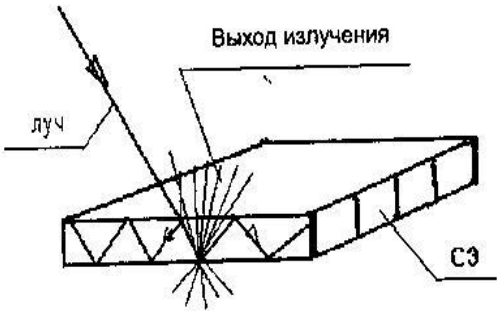


Рис. 4. Схема работы люминесцентных солнечных концентраторов

Таким образом, способ селективного разделения спектра солнечного излучения, является перспективным и экологически чистым, т.к. существующий на сегодняшний день метод повышения КПД солнечных элементов путём очистки кремния от примесей основан на хлорной технологии, загрязняющей окружающую среду.

Задачей данной работы является исследование возможности повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, в установках сельскохозяйственного назначения с использованием селективного разделения спектра.

Библиографический список

1. А. да Роза Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие / А. да Роза; пер. с англ. под ред. С.П. Малышенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.

2. Сибикин, Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. – 2-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2012. – 240 с.

3. Саплин, Л.А. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: учебное пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Л.А. Саплина; Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина, Ю.П. Ильин. – Челябинск: ЧГАУ, 2000. – 194 с.

4. Goldschmidt, J.C. Efficiency enhancement of fluorescent concentrators with photonic structures and material combinations / J.C. Goldschmidt, M. Peters, F. Dimroth. – 2008.

5. Каргиев, В.М. Рынок фотоэлектрических модулей / В.М. Каргиев // Возобновляемая энергия. – 2006. – № 2.

6. УДК 621.384.3:621.3.049.77.001.72. Конструктивно-технологические решения концентраторных люминесцентных солнечных модулей на гибких алюминий-полиимидных платах.

7. Кирпичникова, И.М. Возобновляемые источники энергии / И.М. Кирпичникова, Е.В. Соломин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 50 с.

8. Центры по производству ФЭП и солнечных модулей в России. Исследовательская компания «Abercade».

9. Аналитический центр при правительстве Российской Федерации. Информационная справка: «Развитие солнечных технологий в мире». – Октябрь 2013. – URL: http://ac.gov.ru/files/publication/a/896.pdf/.

К содержанию

УДК 620.97:551.515

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВЭУ В РЕАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЯХ

А.С. Мартьянов

В условиях развивающегося использования возобновляемых источников энергии все большую важность приобретает измерение характеристик ветроэнергетических установок в процессе эксплуатации. При этом существует необходимость в разработке методики, позволяющей получать достоверные результаты в постоянно изменяющихся погодных условиях. Исследованию возможности измерения эффективности ветроэнергетикой установки с вертикальной осью вращения при изменяющейся скорости ветра посвящена предлагаемая статья.

Ключевые слова: моделирование, погода.

Использование возобновляемых источников приобретает все большее значение, как в нашей стране, так и за рубежом. Разрабатываются новые виды ветроэнергетических установок, предлагаются различные решения для повышения эффективности и энергоотдачи. При этом важным вопросом является измерение характеристик ветроэнергетических установок и правильная интерпретация полученных результатов. Исследованию результатов измерения характеристик ветроэнергетических установок посвящена предлагаемая статья.

Основной характеристикой, определяющей эффективность ветроэнергетической установки, является коэффициент использования энергии ветра – отношение генерируемой электрической мощности к аэродинамической мощности ветрового потока, проходящего через поперечное сечение ротора ветроэнергетической установки.

Целью работы являлось исследование возможности измерения коэффициента использования энергии ветра в реальных погодных условиях и выбора лучшего способа измерения этих характеристик.Для исследования этой возможности была разработана математическая модель ветроэнергетической установки с заранее заданным коэффициентом использования энергии ветра.

Математическое описание ветроэнергетической установки представлено следующим образом.

Основное дифференциальное уравнение, описывающее динамику вращательного движения ветроколеса, представлено в виде:

$$J_{ВК}\frac{d\omega}{dt} = M_а - M_с = M_{вала},$$

где: $M_а$ – аэродинамический момент ротора; $M_с$ – момент сопротивления; $J_{ВК}$ – момент инерции системы.

Аэродинамический момент ротора равен$M_a = c_p(\lambda)\frac{\rho * V^2}{2} S * R$, где: Ср(λ) – коэффициент использования энергии ветра (параметрически зависит от быстроходности λ); ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра; S – ометаемая площадь; η_p – момент трения.

Зависимость аэродинамического коэффициентаСр от быстроходности λ достаточно хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$c_p(\lambda) = \left(\frac{c_1}{\lambda} - c_2\right) * e^{-\frac{c_3}{\lambda}} + c_4,$$

где $c_1 \ldots c_4$ – коэффициенты, быстроходность λ определяется уравнением $\lambda = \frac{\omega r}{v}$, где r – радиус ветроколеса.

График зависимости $c_p(\lambda)$ представлен на рис. 1.

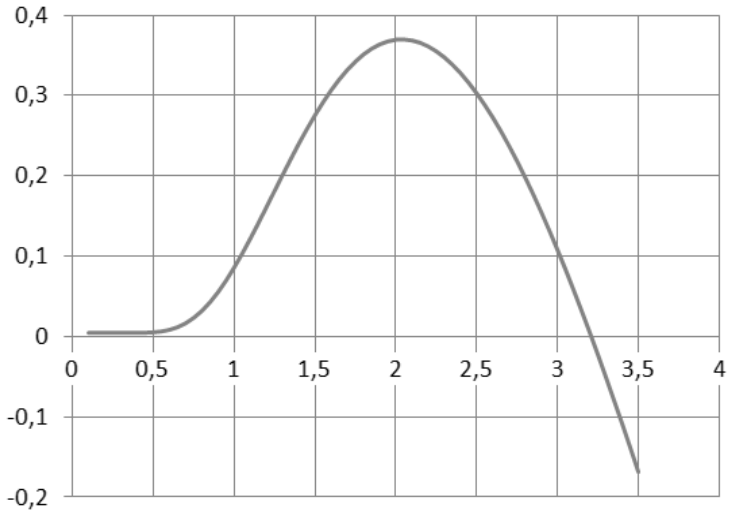


Рис. 1. Зависимоть аэродинамического коэффициента от быстроходности

Момент сопротивления на валу в рабочем режиме: $M_c = \frac{P_M}{\omega}$, где: ω – частота вращения ротора; $P_м$ – механическая мощность на валу генератора.

Основываясь на зависимости коэффициента использования энергии ветра от быстроходности, была определена зависимость аэродинамической мощности от скорости ветра и частоты вращения ротора [1].

График распределения аэродинамической мощности ротора в зависимости от скорости ветра и частоты вращения представлен на рисунке 2. По этому графику можно сделать вывод о том, что для любой заданной скорости ветра существует скорость вращения ротора, при которой мощность ветроэнергетической установки будет максимальной.

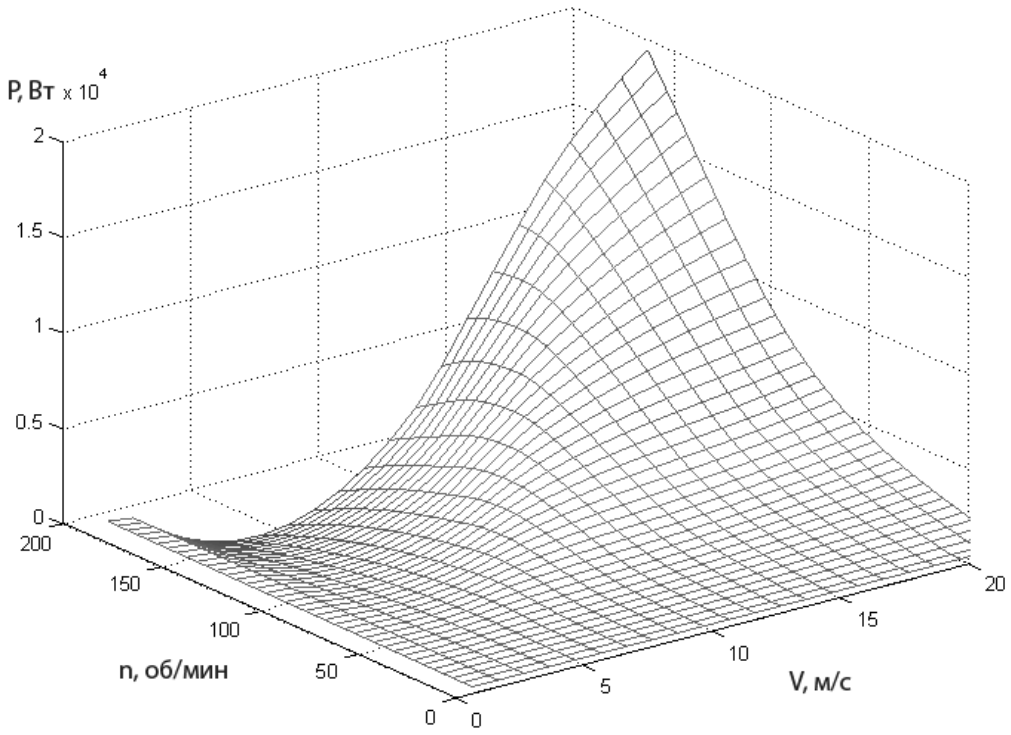


Рис. 2. График распределения мощности ротора
в зависимости от скорости ветра и частоты вращения

Математическую модель генератора можно описать следующими уравнениями:

Мощность тока генератора в фазе равна $P_ф = \frac{P_м}{3}$.

ЭДС в фазе генератора пропорциональна частоте вращения ротора и равна $E_ф = \omega * k_1$, где k_1 – коэффициент пропорциональности.

Ток в фазе генератора равен $I_Ф = \frac{P_ф}{E_ф}$, тогда мощность омических потерь в обмотке генератора равна$P_{ф.пот} = {I_Ф}^2 * R_{вн}$, а мощность потерь в генераторе $P_{ген.пот} = 3 * {I_ф}^2 * R_{вн}$, где $R_{вн}$ – сопротивление фазной обмотки генератора. При этом напряжение на клеммах фазной обмотки генератора будет равно $V_Ф = E_ф - R_{вн} * I_ф$. При соединении обмоток генератора по схеме «звезда», и использовании трехфазного выпрямителя по схеме Ларионова, напряжение на выходе выпрямителя будет $V_{выпр} = 2{,}34 * V_ф$, а мощность тока $P_{выпр} = P_м - P_{ген.пот}$.

Напряжение на выходе выпрямителя генератора поступает на регулятор мощности, который создает такой ток в генераторе, чтобы момент сопротивления на валу генератора способствовал поддержанию определенной быстроходности ротора ветроэнергетической установки при текущей скорости ветра. При этом полезная электрическая мощность, генерируемая в ветроэнергетической установке, расходуется на то, чтобы зарядить аккумуляторную батарею бесконечной емкости.

Для проверки работоспособности математической модели она была реализована в пакете для математических расчетов Матлаб/Симулинк [2]. Общий вид модели представлен на рис. 3.

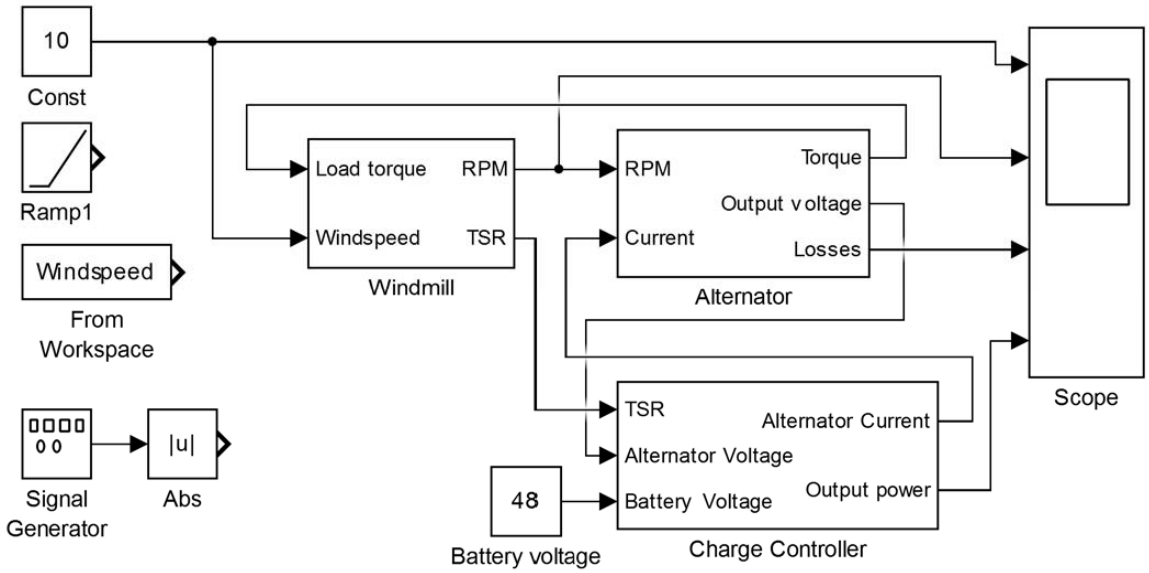


Рис. 3. Общий вид модели в пакете Матлаб/Симулинк

Модель была протестирована воздействием различных сигналов в качестве скорости ветра, и было обнаружено, что она пригодна для дальнейшей работы.

В качестве основной рабочей гипотезы было выдвинуто предположение, что в реальных условиях непосредственное измерение мгновенных значений скорости ветра и генерируемой электрической мощности можно использоватьдля расчета коэффициента использования энергии ветра Ср. Результаты измерения этого коэффициента представлены на рисунке 4.

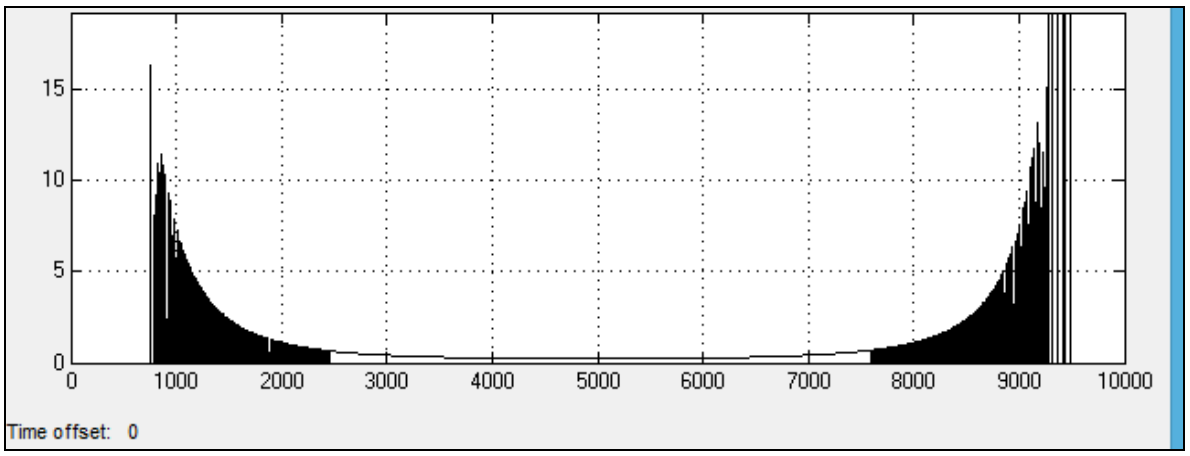


Рис. 4. Результаты измерения коэффициента Ср
в условиях изменяющейся скорости ветра

При анализе полученных значений видно, что значения коэффициента использования энергии ветра весьма далеки от ожидаемых значений, что можно объяснить инерционными процессами, происходящими в системе управления ВЭУ в условиях постоянно изменяющейся скорости ветра.

Поэтому было выдвинуто предположение, что для получения корректных результатов необходимо осреднение измеренных значений за единицу времени. В качестве способов осреднения было предложено два – осреднение за определенный промежуток времени (с помощь фильтра нижних частот с достаточно большой постоянной времени) и осреднение с помощь численного интегрирования с учетом весового коэффициента. В качестве весового коэффициента выбрана аэродинамическая мощность, т.е. средний коэффициент использования энергии ветра $Cp = \frac{\sum P_{эл}(i)}{\sum P_{аэр}(i) Cp(i)}$; где $P_{эл}(i)$ – мгновенное значение генерируемой электрической мощности, $P_{аэр}(i)$ – мгновенное значение аэродинамической мощности, $Cp(i)$ – мгновенное значение коэффициента использования энергии ветра. Схема измерения в среде Матлаб/Симулинк представлена на рис. 5

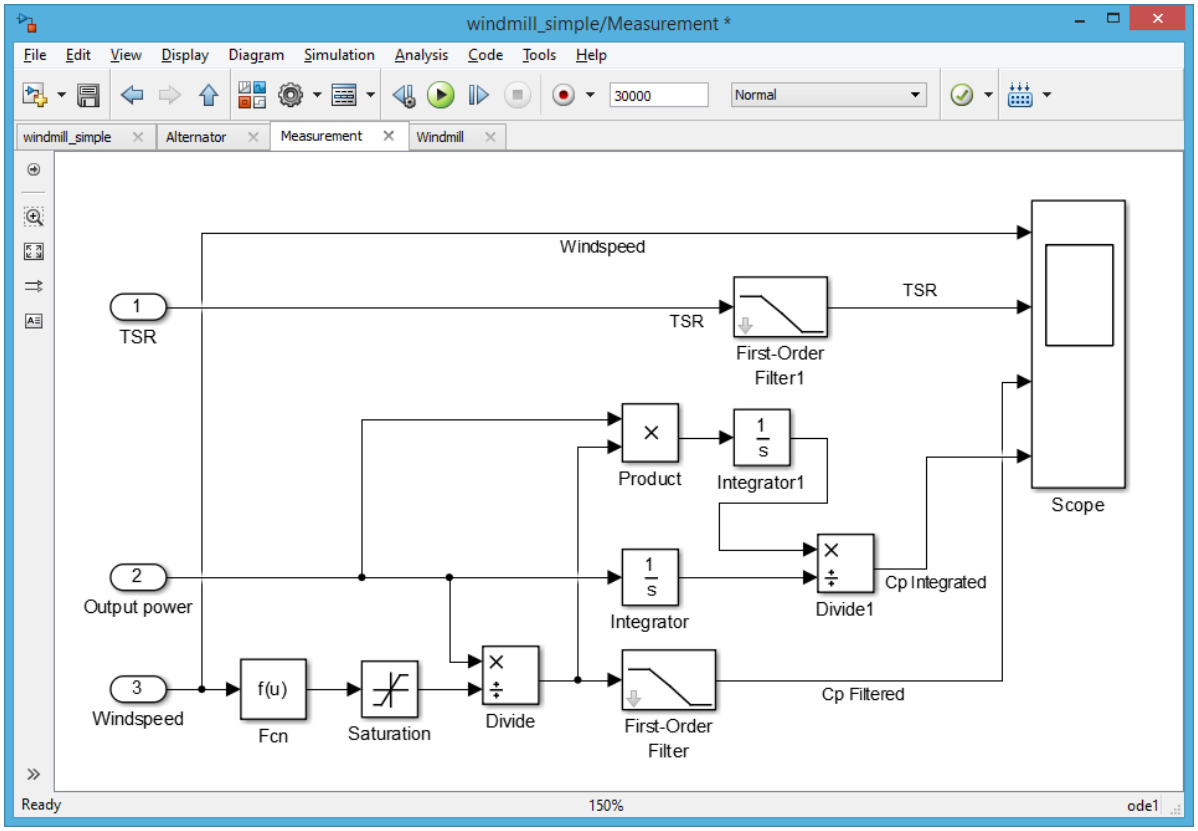


Рис. 5. Схема измерения коэффициента использования энергии ветра

Доработанная модель была исследована при периодическом воздействии нарастающе-затухающей скорости ветра, рисунок 6.

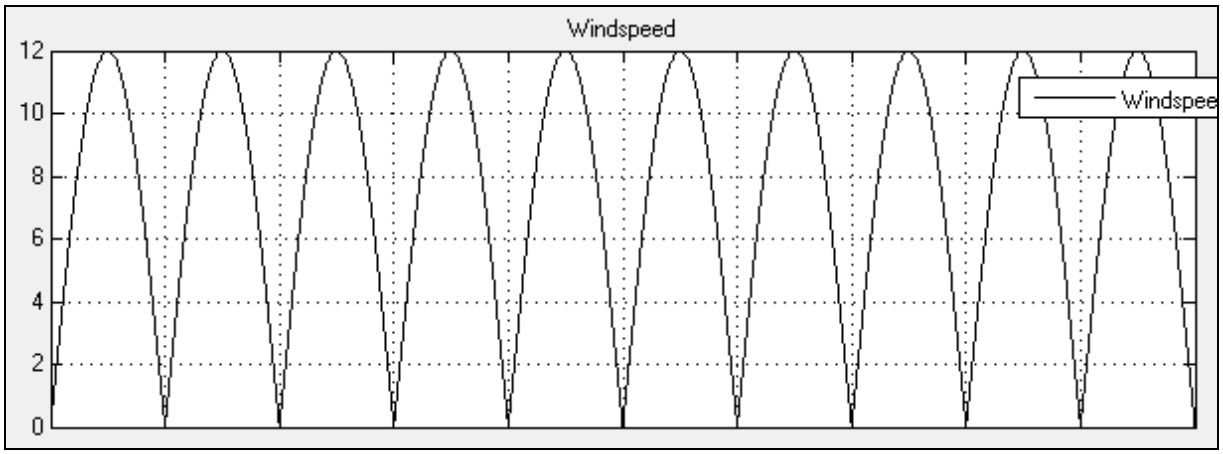


Рис. 6. Нарастающе-затухающая скорость ветра

Результаты измерения Ср при периодическом воздействии нарастающе-затухающей скорости ветра представлены на рис. 7.

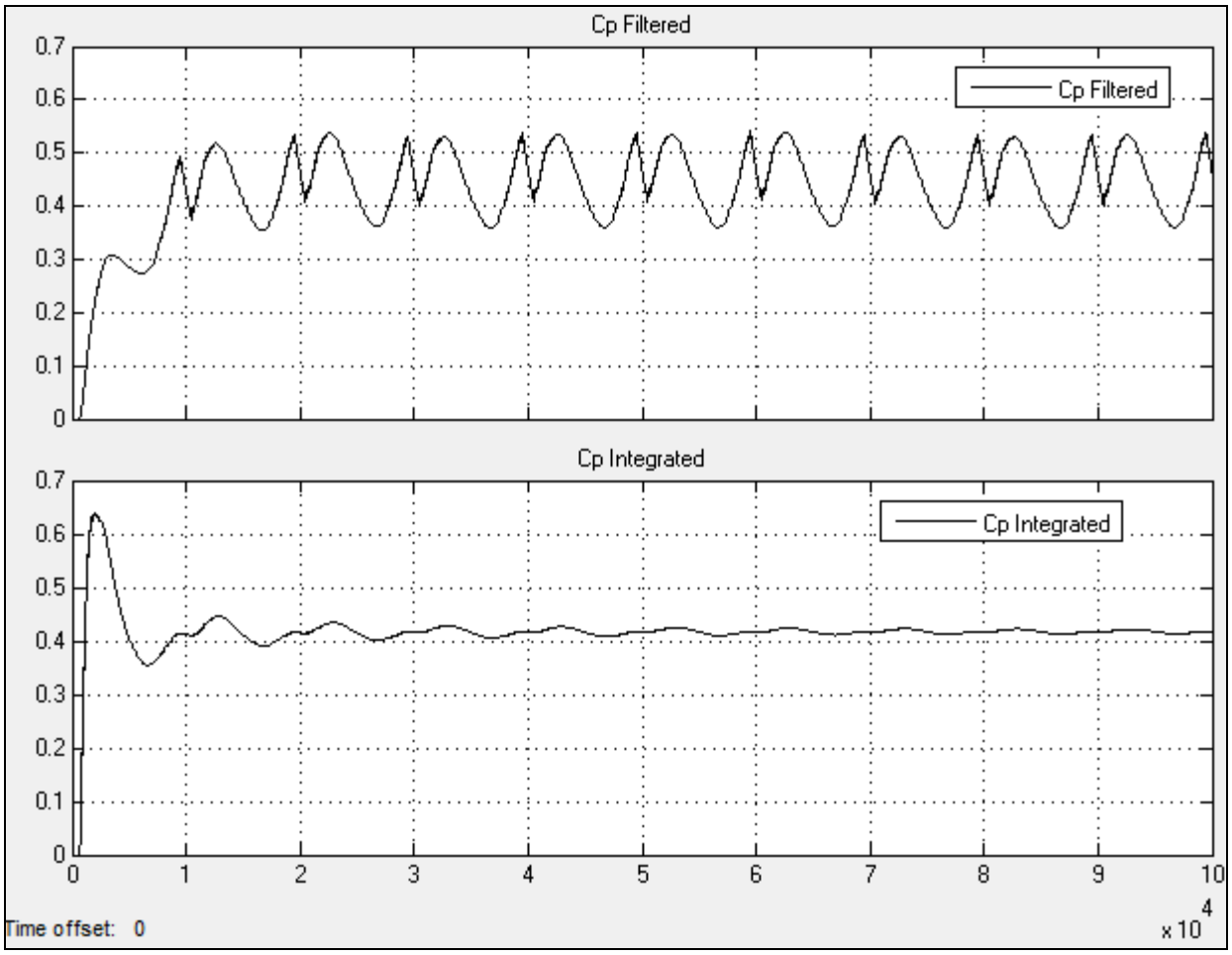


Рис. 7. Результаты измерения Ср при воздействии нарастающе-затухающей скорости ветра

Из графиков на рис. 7 видно, что оба способа осреднения корректно отображают измеренный коэффициент Ср, который колеблется вокруг заложенного в модель значения. При этом можно отметить, что метод фильтрации дает больший размах колебаний измеренного значения, что может сказаться на точности измерения. Измерения коэффициента с использованием метода численного интегрирования позволяет получить более точный результат, однако, чтобы обеспечить хорошую точность требуется большее время измерения. В качестве дополнительно исследования модель была подвергнута воздействию скорости ветра, полученной записью значений, измеренных с помощью реального анемометра.

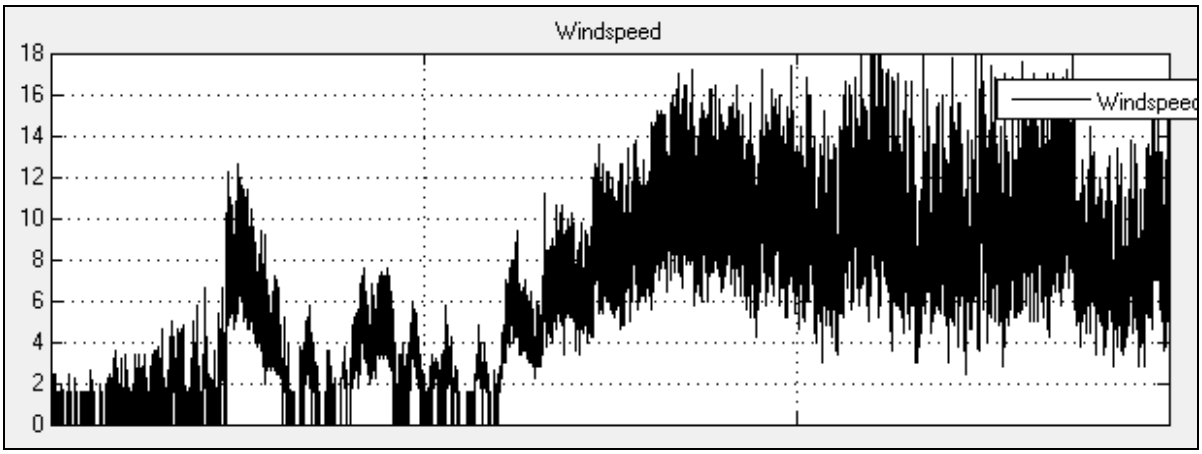


Рис. 8. Измеренное значение скорости ветра,
использованое при воздействии на математическую модель

Результаты измерения коффициента Ср в условиях случайно меняющеся скорости ветра представлены на рис. 8. При этом видно, что полученные значения значительно отличаются от значений, полученных в предыдущих экспериментах.Это может быть объяснено следующими причинами: момент инерции ротора ветроэнергетической установки не позволяет своевременно реагировать на изменение ветровой обстановки, а алгоритмы управления ветроэнергетической установкой позволяют системе изменять электрическую мощность для получения высокой эффективности при возникающих порывах ветра. Таким образом, задача определения коэффициента использования энергии ветра в реальных условиях эксплуатации не имеет простого решения и требует разработки соответствующей методики.

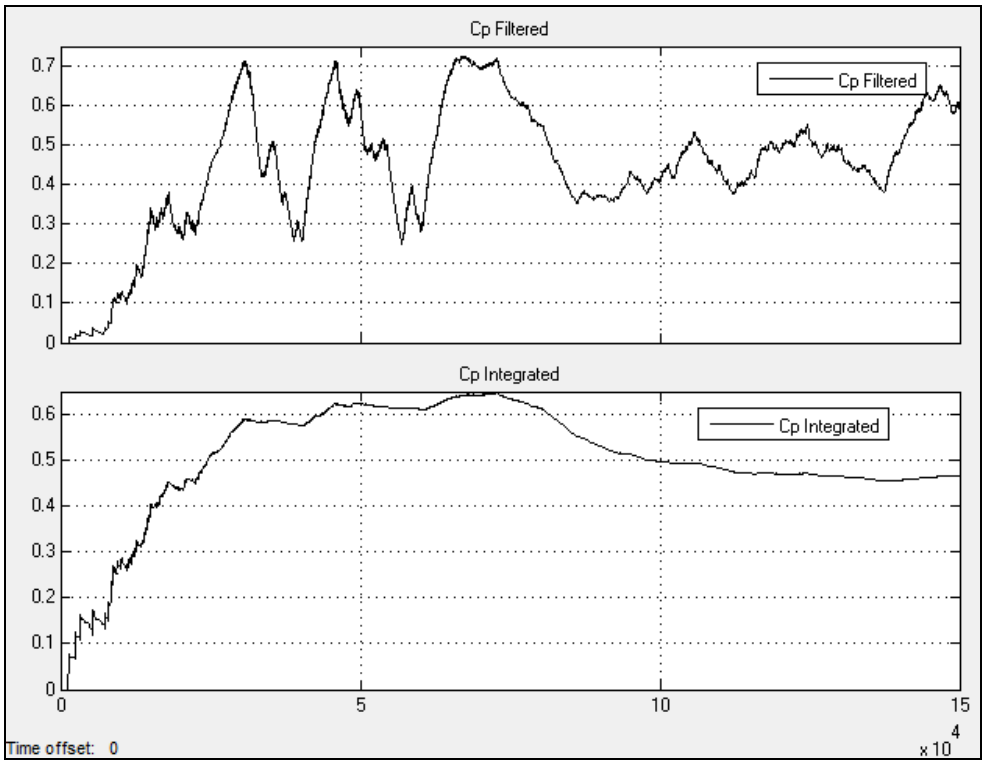


Рис. 9. Измеренное значение скорости ветра,
использованое при воздействии на математическую модель

Основываясь на проведенных измерениях можно сделать следующие выводы:

1. Измерение коэффициента использования энергии ветрав условиях постоянно меняющейся скорости ветра является сложной задачей.

2. При прямом измерении мгновенных значений скорости ветра и генерируемой мощности ВЭУ требуется учет не только текущих значений, но и предыдущего состояния системы.

3. Вышеназванные причины свидетельствуют о необходимости разработки методики определения коэффициента использования энергии ветра ВЭУ в реальных погодных условиях, которая была бы применима к различным ветроэнергетическим установкам.

Библиографический список

1. Мартьянов, А.С. Регулирование мощности в ветроэнергетической установке / А.С. Мартьянов // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т.2. – С. 206–209.

2. Мартьянов, А.С. Разработка математической модели ветроэнергетической установки мощностью 3 кВт производства ООО «ГРЦ-Вертикаль в пакете Matlab / А.С. Мартьянов, Н.В. Пронин, Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 5. – С. 41–44.

К содержанию

УДК 62-83.01 + 621.314

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМУМА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

В.И. Смолин, И.Г. Топольская

Рассмотрены алгоритмы адаптивного управления синхронным электроприводом, позволяющие реализовать энергоэффективный режим по критерию максимума коэффициента мощности. Решение задачи основано на теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей и энергетической модели электрической машины.

Ключевые слова: трехфазный электромеханический преобразователь, синхронный двигатель, система управления, математическая модель, коэффициент мощности.

Современный электропривод переменного тока занимает доминирующее место в доле потребления электрической энергии. Вопросы автоматизации промышленного производства неразрывно связаны с использованием энергосберегающих режимов работы электропривода. Энергоэффективное управление трехфазными электромеханическими преобразователями (ЭМП) может осуществляться согласно [1] следующими способами: 1) поддержанием постоянства $\cos\varphi_1$ [2]; 2) поддержанием постоянства скольжения ротора асинхронного двигателя; 3) управлением ЭМП с использованием модели двигателя; 4) с помощью поисковых алгоритмов. В настоящей работе рассмотрены алгоритмы энергоэффективного управления трехфазным синхронным двигателем (СД), полученные методом обобщенного энергопотока ЭМП [3] и энергетической модели электрической машины [4].

Рассмотрим частотно-регулируемый синхронный электропривод (рис. 1), содержащий монитор нагрузки А1 с реализованной в нем энергетической моделью электрической машины (рис. 2). Данная модель получена путем суммирования мгновенной энергии и мощности трех фаз СД в единой энергопоток. Такое преобразование осуществляется согласно [1] по уравнениям свертки:

$$I_i^2(t)=i_{ia}^2+i_{ib}^2+i_{ic}^2,\ U_i^2(t)=u_{ia}^2+u_{ib}^2+u_{ic}^2,$$
$$P_1(t)=u_a\cdot i_a+u_b\cdot i_b+u_c\cdot i_c, \qquad (1)$$
$$\cos\varphi_1(t)=\frac{P_1(t)}{U_1(t)\cdot I_1(t)},\ P_{L1}(t)\cong L_1\cdot I_1(t)\cdot\frac{dI_1(t)}{dt},\ P_{L0}(t)\cong L_0\cdot I_0(t)\cdot\frac{dI_0(t)}{dt}.$$

Обобщенные токи и напряжения модели ST3 не содержат гармонических составляющих и являются чисто аналоговыми функциями времени. Такое их свойство позволяет отказаться от векторного анализа и представить математическую модель сквозного электромеханического преобразования энергии в виде баланса мгновенной активной и реактивной мощности в обобщенных токах и напряжениях:

$$\begin{bmatrix} U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 - I_1^2 \cdot R_1 - P_{L1} - P_{L0} \\ U_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1 - I_1^2 \cdot X_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & E_0 \cos\varphi_2 \\ X_0 & E_0 \sin\varphi_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0^2 \\ I_2 \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

$E_0 \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 = \omega_0 \cdot \left(M_c + J \frac{d\omega_0}{dt} \right)$. Индекс t функциональной зависимости переменных опущен.

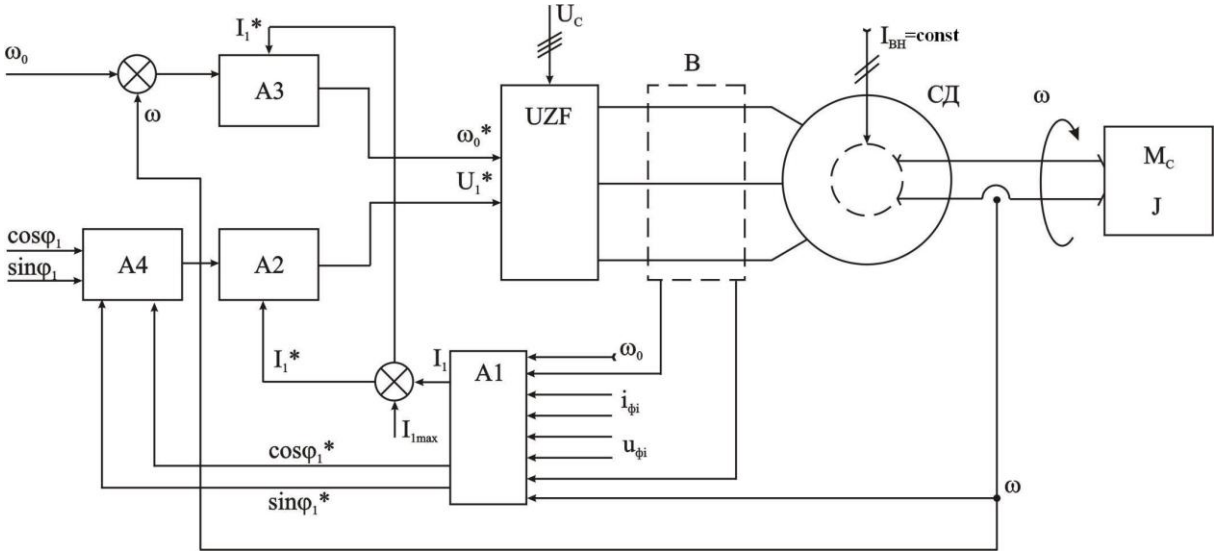


Рис. 1. Система фазового управления амплитудой напряжения синхронного двигателя: B – блок измерительных преобразователей; UZF – преобразователь частоты; A1 – монитор нагрузки; A2 – блок регуляторов канала управления амплитудой; A3 – блок регуляторов канала управления синхронной частотой; A4 – узел сравнения; ω_0, $\cos\varphi_1$, $\sin\varphi_1$ – входы управления; I_1* – входы токовой защиты; ω_0*, U_1*, $\cos\varphi_1$*, $\sin\varphi_1$* – адаптированные переменные управления

Вычисление тока $I_1(t)$, напряжения $U_1(t)$ и мощностей $P_1(t)$, $P_{Li}(t)$ осуществляется в мониторе нагрузки по мгновенным значениям фазных токов и напряжений i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}, u_a, u_b, u_c. Выделение первых гармоник токов и напряжений осуществляется путем аналого-цифровой фильтрации в блоке измерительных преобразователей и интерфейсе монитора нагрузки.

Возможность вычисления мгновенного сдвига фаз в виде $\cos\varphi_1(t)$ позволяет сформировать переменную управления амплитудой трехфазного напряжения U_1*. В свою очередь амплитуда напряжения оказывает непосредственное влияние на электромагнитное состояние СД.

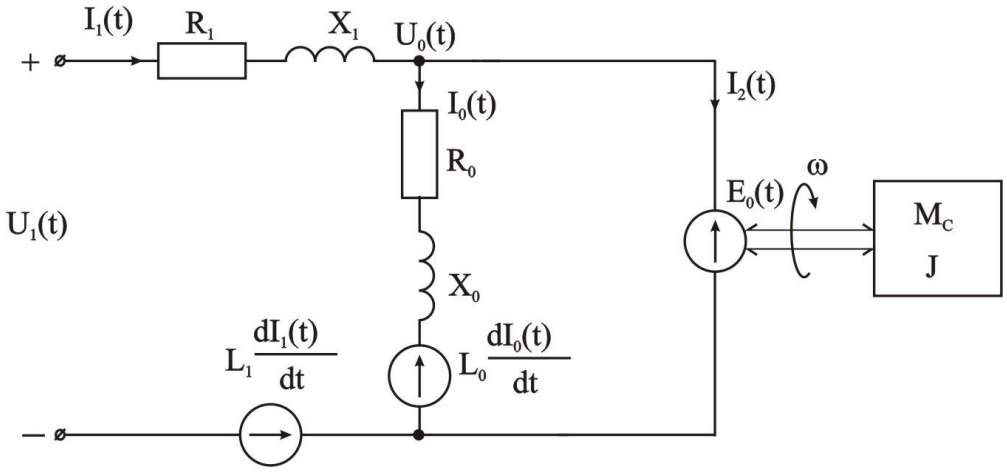


Рис. 2. Аналоговая энергетическая модель трехфазного СД (модель ST3): $I_0(t)$ – ток ветви намагничивания, $I_2(t)$ – условный ток ротора, $X_1=X_{1H}(\omega_0(t)/\omega_{0H})$, $X_0=X_{0H}(\omega_0(t)/\omega_{0H})$, $R_0=R_{0H}(\omega_0(t)/\omega_{0H})^2\cdot(I_0(t)/I_{0H})^2$

Энергосберегающему режиму СД соответствует максимум коэффициента мощности $\cos\varphi_1(t)=1$ (рис. 3).

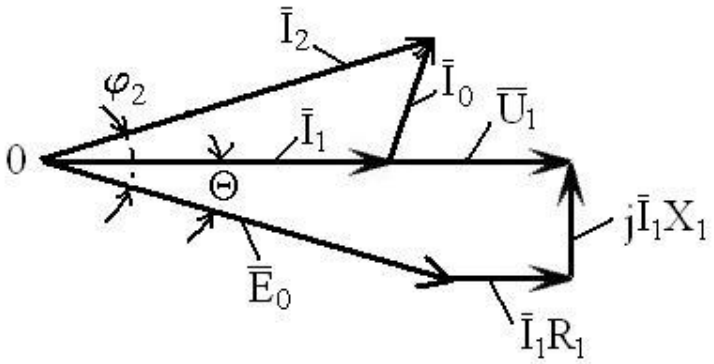


Рис. 3. Векторная диаграмма синхронного двигателя в режиме $\cos\varphi_1=1$

Будем считать, что такой режим обеспечивается при оптимальном значении переменной управления $U_1^*= U_{1H}^*$. В режимах малых нагрузок электромагнитная система СД может принимать активно-емкостной характер, если $U_1^* < U_{1H}^*$. В режимах кратковременных перегрузок необходимо обеспечить $U_1^* > U_{1H}^*$ (активно-индуктивный характер СД). Переменная управления U_1^*, полученная непосредственно по уравнениям свертки (1), имеет нулевую чувствительность в оптимальном режиме СД. Данный фактор позволяет считать реализацию такого режима теоретически невозможной. Но имеется возможность поддержания оптимального режима СД на некотором уровне, например, $\cos\varphi_1(t) \geq 0{,}97$ (рис. 4). Энергетические характеристики СД в таком случае близки к оптимальным, а требования к точности информационно-измерительного оборудования являются вполне приемлемыми.

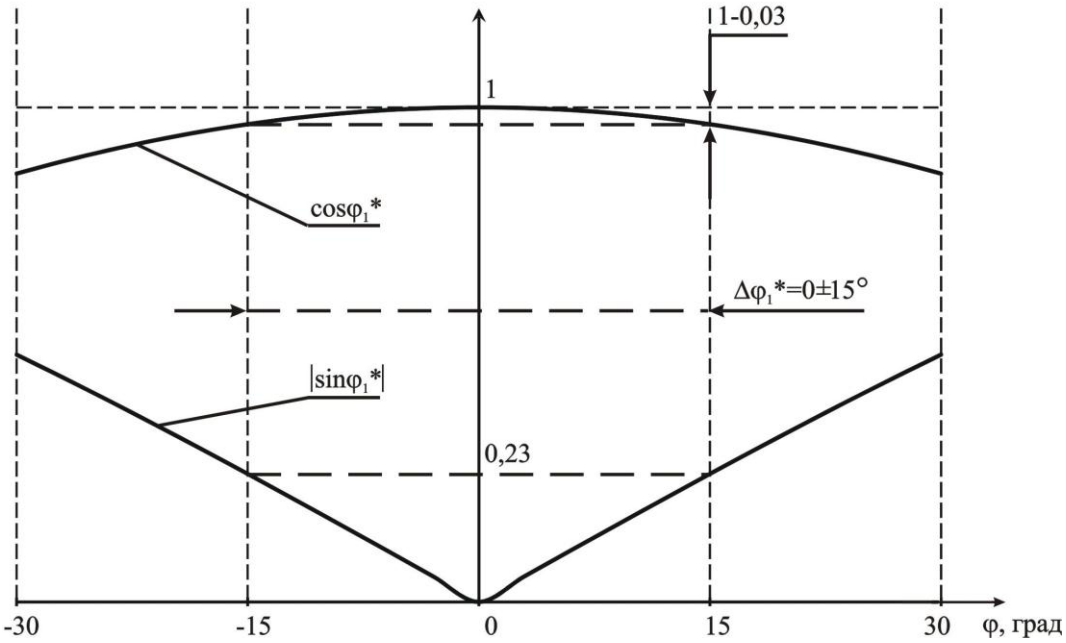


Рис. 4. К формированию переменных управления

Важное качество рассмотренного алгоритма управления состоит в его универсальности. Метод не требует привязки к техническим данным СД в виде параметров схемы замещения. Дальнейшее повышение чувствительности в оптимальном режиме возможно путем формирования дополнительной переменной управления $\sin\varphi_1^*$. Математическая модель СД, реализуемая в мониторе нагрузки, приобретает в этом случае более сложный вид (рис. 2), а система управления теряет свои универсальные свойства.

Библиографический список

1. Браславский, И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учебное пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

2. Энергосберегающая технология электроснабжения народного хозяйства: В 5 кн. Кн. 2 Энергосбережение в электроприводе / под ред. В.А. Веникова. Н.Ф. Ильинский, Ю.В. Рожанский, А.О. Горнов. – М.: Высшая школа, 1989. – 127 с.

3. Смолин, В.И. Основы теории обобщенного энергопотока трехфазных электромеханических преобразователей / В.И. Смолин, И.Г. Топольская. – Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Энергетика». – 2013. – Т. 13. – № 1. – С. 128–136.

4. Смолин, В.И. Амплитудное управление моментом трехфазного асинхронного двигателя на основе принципов обобщенного энергопотока / В.И. Смолин, И.Г. Топольская. – Электротехника. – 2014. – № 4. – С. 23 – 27.

К содержанию

УДК 621.311.24

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ МИРОВОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ЗА 2010–2013 ГОДА

Е.В. Соломин, А.С. Аникин, Е.А. Сироткин

Статья описывает динамику изменения рынков ветроэнергетической промышленности за последние три года (2010–2013 г), отмечены страны-лидеры по производству электрической энергии за счет ветра.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, рынки ветроэнергетической промышленности.

В последнее время ветроэнергетическая промышленность стала отдельной энергетической отраслью в таких странах как Китай, Испания, США, Дания, Голландия.

В июне 2013 года общая мировая мощность, получаемая за счет энергии ветра, достигала почти 300000 МВт.На сегодняшний день все ветроэнергетические установки, расположенные в различных уголках мира,производят около 3,5 % электроэнергии от мирового спроса.

Глобальный потенциал ветроэнергетики непрерывно возрастает (рис. 1). На 5 % потенциал увеличился в течение шести месяцев (в 2012 на 7 %, в 2011 на 9 %) и на 16,6 % за год (в середине 2013 по сравнению с серединой 2012 года). Для сравнения, годовые темпы роста в 2012 году был существенно выше (19 %).

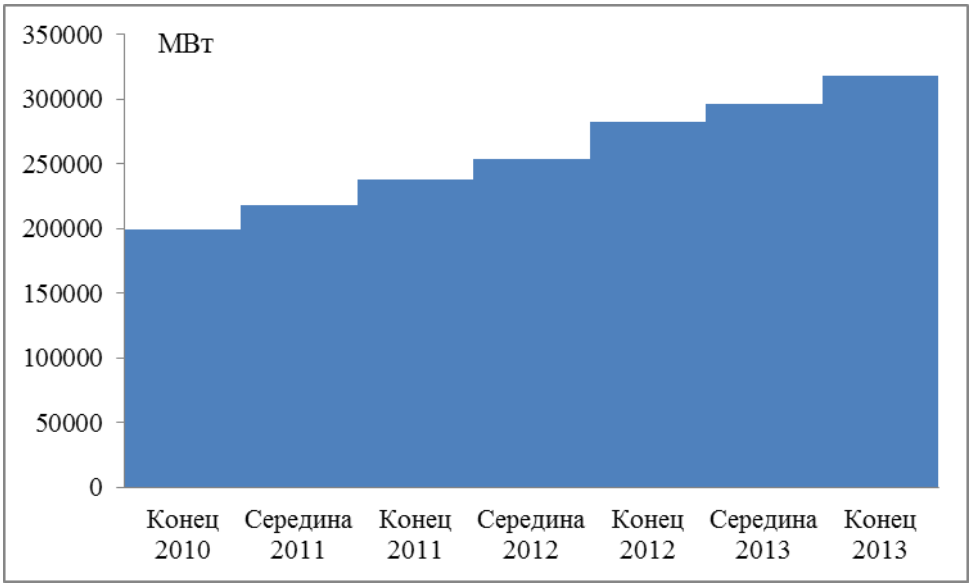


Рис. 1. Общая установленная мощность за 2010–2013 г.

Страны-лидеры в отрасли ветроэнергетики (Китай, США, Германия, Испания и Индия) в сумме представляют 70 % глобальных ветровых мощностей. Тем не менее, в последнее время роль США и Испания снизилась в этой отрасли и их доля на мировом рынке составляет менее 1 %, поэтому новые мощности снизились только на 57 %. Великобритания же стала играть одну из главенствующих ролей на мировом рынке ветроэнергетических установок и заняла второе место.

Четырем странам удалось достичь установленной мощности более 1 ГВт в 1-ой половине 2013 года: Китай (5,5 ГВт), Великобритания (1,3 ГВт), Индия (1,2 ГВт) и Германия (1,1 ГВт). В 2012 году только три страны сумели достичь мощности более 1 ГВт.

У лидирующих стран по ветроэнергетике наблюдается разнообразная динамика рынка на 1-ую половину 2013 года: пять стран усилили позиции по сравнению с 2012 годом: Китай, Германия, Великобритания, Канада, Дания. А другие пять стран ослабили позиции на рынке: Испания, Индия, Италия, Франция, а также США, которые полностью прекратили продажу ветроэнергетических установок, после того как установили новый рекорд на 13 ГВт в 2012 году. Португалия не вошла в список 10 лидирующих стран на мировом рынке и в настоящее время находится на месте 11.

Следует отметить, что динамично развивающиеся рынки можно также обнаружить и в других странах: Швеция (526 МВт), Австралия (475 МВт), Дания (416 МВт), Румыния (384 МВт), и Канада (377 МВт). Бразилия является 10-м по величине рынком в ветроэнергетике в 281 МВт мощности. Можно отметить, что это крупнейшая латиноамериканская страна с наиболее развитой ветроэнергетической промышленностью.

Одна африканская страна сделала серьезный шаг в освоении энергии ветра: Марокко показало самые высокие темпы роста (34,4 %) и увеличение рынка в течение всего лишь шести месяцев, затем Румыния (21,6 %), Австралия (18,4 %) и Великобритании (16,2 %).

Европа по-прежнему обладает самой большой установленной ветроэнергетической мощностью, но в тоже время европейский рынок показал довольно хаотическую динамику развития в 1-ой половине 2013 года: Великобритания с ее 1,3 ГВт новой мощности заняла большую часть на рынке, в основном благодаря крупнейшим прибрежным установкам. С общей мощностью 9,6 ГВт, Великобритания закрепила свои позиции на третьем месте в Европе и на шестом месте в мире.

Германия по-прежнему остается бесспорным лидером рынка ветроэнергетики в Европе, с новой мощностью 1,1 ГВт и общей 32,4 ГВт. Также заметен рост мощности и в других европейских странах: Швеция (526 МВт новой мощности), Дания (416 МВт новой мощности) и Румынии (384 МВт новой мощности), а Испания ослабила свои позиции на европейском рынке, установив ветроэнергетических установок всего лишь на 122 МВт.

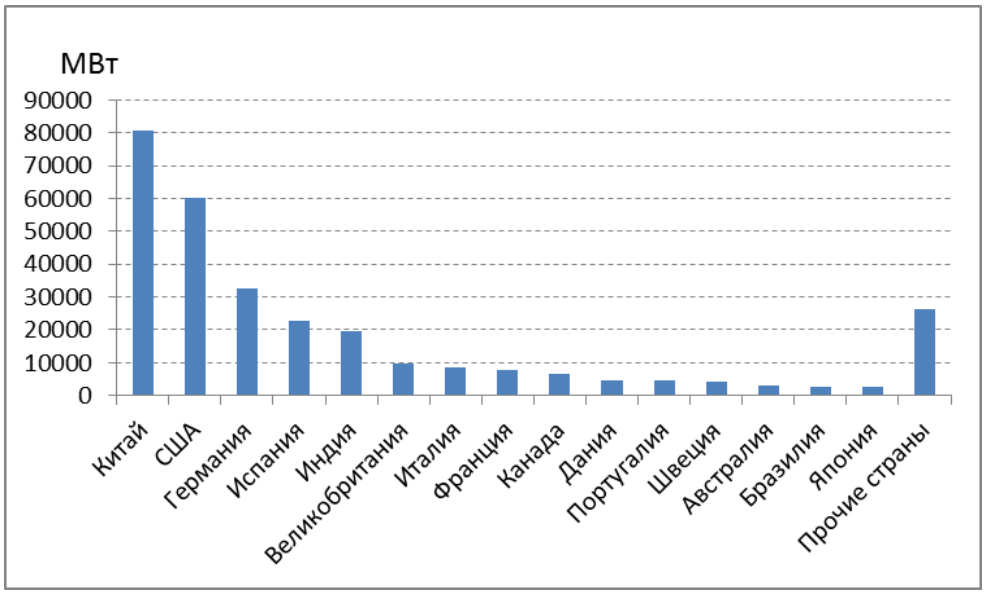


Рис. 2. Общий установленный объем мощностей на 2013 год

В 2013 году Китай стал самым крупным рынком ветроэнергетики, добавив 5,5 ГВт в течение шести месяце – еще больше, чем в предыдущем году (5,4 ГВт). На долю Китая приходится 39 % мирового рынка новых ветроэнергетических установок, и это больше, чем в 2012 (29 %). К июню 2013 года Китай достиг общей установленной мощности 80,8 ГВт. Индия прибавила 1,2 ГВт, но меньше, чем в 1-ой половине 2012 года (1,5 ГВт). Перспективы на индийском рынке по-прежнему неясны из-за неопределенной политики государства.

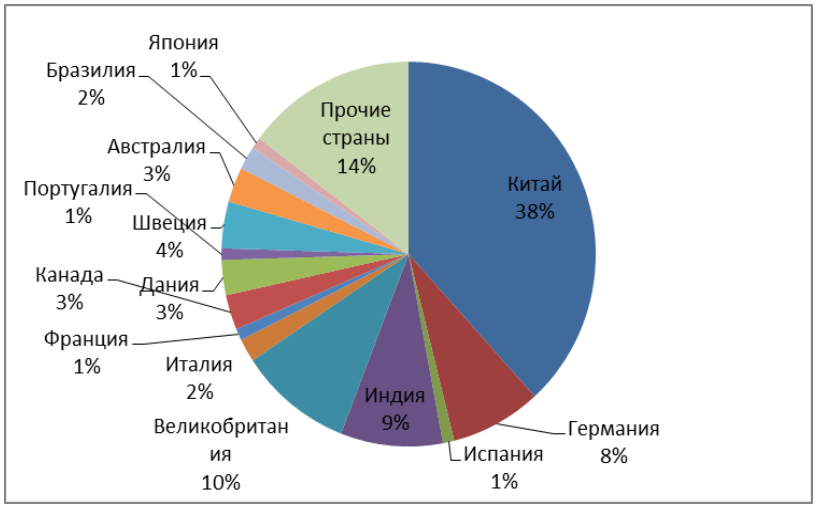


Рис. 3. Новая установленная мощность за 2013 год

Японский и корейский рынки по-прежнему растут с очень слабыми показателями, у обеих стран темпы роста менее 2 % в первой половине 2013 года. Однако согласно прогнозам, с учетом заявлений ряда префектур о переходе на 100 % энергоснабжение от возобновляемых источников, Япония может уже в ближайшее время занять лидирующее место. Впервые Монголия установила ветропарк мощностью 50 МВт.

Таблица

Рейтинг стран по производству электрической энергии за счет ветра

Страна	Мощность						
	Общая	Добавленная	Общая	Добавленная	Общая	Добавленная	Общая
	2013		2012		2011		2010
	МВт						
Китай	80824	5500	75324	5410	62364	8000	44733
США	60009	16	60007	2883	46919	2252	40180
Германия	32422	1143	31308	941	29075	766	27215
Испания	22907	122	22785	414	21673	480	20676
Индия	19564	1243	18321	1471	15880	1480	13065
Англия	9610	1331	8228	822	6018	504	5203
Италия	8415	273	8152	320	6877	460	5797
Франция	7821	198	7623	650	6640	400	5660
Канада	6578	377	6201	246	5265	603	4008
Дания	4578	416	4162	56	3927	–	3734
Португалия	4564	22	4542	19	4379	260	3702
Швеция	4066	526	3743	–	2798	–	2052
Австралия	3059	475	2584	–	2226	–	1880
Бразилия	2788	281	2507	118	1429	–	930
Япония	2655	41	2614	–	2501	–	2304
Прочие страны	26204	2030	24174	3026	18778	3200	15805

На рынке США произошел резкий спад в первой половине 2013 года, было добавлено только 1,6 МВт новой мощности в период с января и в июне 2013, по сравнению с 2,9 МВт год назад. Эту ситуацию вызвала неопределенность с возможными налогами на производственный сектор.

В 2012 году большинство инвесторов пытались объединить свои ветро-

парки в единую сеть для того, чтобы сумма предполагаемого налога была меньше. Но в сложившейся ситуации строительство многих ветропарков было приостановлено, которые могли бы быть открыты в 2013 году. Есть только несколько не замороженных новых проектов. Можно ожидать, что рынок США снова вернется на прежние позиции в 2014 году.

Канада установила 377 МВт мощности в течение 1 половины 2013 года, на 50 % больше, чем за предыдущий период 2012 года.

Став самым крупным латиноамериканским ветроэнергетическим рынком, Бразилия, заняла 14-е место на мировом рынке, установив 281 МВт в 1-ой половине 2013 года, достигнув общей мощности 2,8 ГВт, с темпом роста 11,2 %. Ожидается, что Бразилия по-прежнему будет оставаться лидером в своем регионе.

Обнадеживают темпы роста ветроэнергетики в Австралии, где установлено 475 МВт дополнительной мощности за 2013 год, в 2012 году темпы роста были аналогичными (18 %). Австралия теперь занимает 13-е место на международном уровне, прежде занимала 15 позицию.

Один новый крупный ветропарк мощностью 100 МВт был установлен в Марокко, увеличив мощность страны, получаемую от ветра до 391 МВт. Благодаря Марокко, ветроэнергетическая мощность Африки выросла почти на 10 %.

Библиографический список

1. Сайт Мировой Ассоциации Ветроиндустрии (The World Wind Energy Association). – URL: http://www.wwindea.org/home/index.php.

2. Соломин, Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ–Вертикаль / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 10–15.

3. Сайт Инициативной Глобальной Группы по переходу на возобновляемые источники энергии Global 100%RE –http://go100re.net/.

4. Соломин, Е.В. Ветроэнергетическая экономика / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 2. – С. 28–30.

К содержанию

УДК 621.311.24

МИРОВАЯ МАЛАЯ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА, АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ

Е.В. Соломин, Е.А. Сироткин

В статье, являющейся переводом Отчета Мировой Ассоциации Ветроиндустрии в области малой ветроэнергетики, приведены данные по состоянию данного сегмента рынка. Также приведена статистика использования малых ветроустановок.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветроэнергетика, малые ВЭУ.

Мировой рынок малой ветроэнергетики демонстрирует дальнейший сильный рост: по состоянию на конец 2011 года, по крайней мере, 730000 малых ветроустановок были установлены по всему миру (не считая двух крупных рынков Индии и Италии), 74000 из которых были установлены в этом году. В течение 2011 года количество установленных малых ветроустановок выросло на 11 %. Китай продолжает затмевать остальные крупные рынки, в том числе США и Великобританию, с его совокупным числом установленных единиц 500000, что составляет 68 % рынка. Согласно расчетам, около половины китайских ВЭС продолжать производить электричество, подтверждая, что этот рынок зародился еще в начале 1980-х.

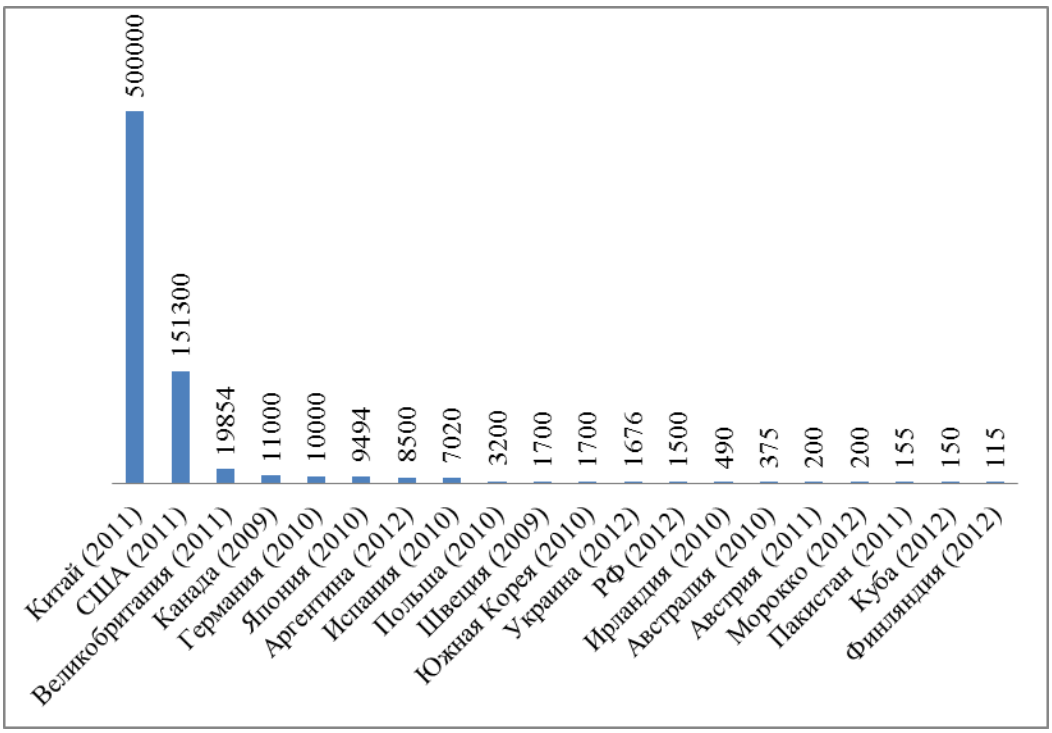


Рис. 1. Общее количество малых ветроэнергетических установок в мире

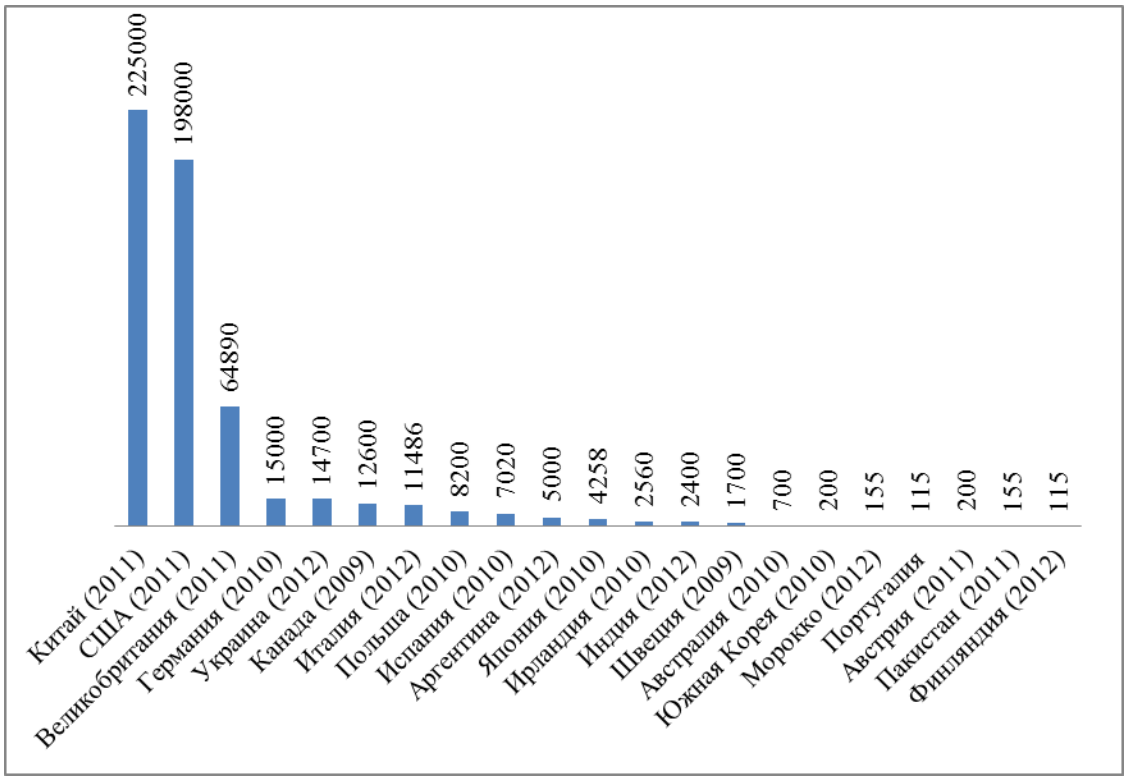


Рис. 2. Общая установленная мощность
малых ветроэнергетических установок в мире

Общемировая установленная мощность малой ветроэнергетики достигла более 576 МВт по состоянию на конец 2011 года. На долю Китая приходится 40 % этой мощности, а на США – 35 %. Более 120 МВт новых малых ветроустановок было установлено в 2011 году, что соответствует глобальному повышению производительности на 27 %. Согласно новой установленной мощности, это означает почти удвоение роста рынка (в 2010 году эта цифра составляла 64 МВт). Во всем мире происходит увеличение среднего размера малых ветроустановок: в 2010 году средняя установленная мощность равнялась 0,66 кВт, а к 2011 году достигла 0,77 кВт. Средняя мощность ВЭУ в 2011 году составила 1,6 кВт. В Китае средняя установленная мощность возросла с 0,37 кВт (по состоянию на конец 2010 года) до 0,45 кВт в 2011 году. В США этот показатель увеличился до 1,31 кВт в 2011 году, по сравнению с 1,24 кВт в 2010, а малые ВЭУ Великобритании показали прирост мощности с 2 кВт в 2010 до 3,3 кВт в 2011 году. В связи с увеличением цен на ископаемое топливо и повышением спроса на электроэнергию, как в промышленных, так и в развивающихся странах, возрастает интерес к небольшим ВЭУ. В частности, в развивающихся странах в местах, где отсутствует возможность подключения к централизованной сети, малая ветроэнергетика часто оказывается экономически конкурентоспособной и представляет собой реальную альтернативу традиционной энергетике. Кроме того, в странах с хорошо развитой инфра-

структурой, небольшие ВЭУ могут производить электроэнергию по доступной цене и способны заменить ископаемые или ядерные источники энергии. Тем не менее, в обеих областях остаются нерешенными регуляторные и финансовые проблемы, а рынок малой ветроэнергетики по-прежнему не является стабильным. И несмотря на это, лишь немногие страны предлагают достойные схемы поддержки ветроэнергетической отрасли, которые необходимы, чтобы обойти главный барьер для многих потенциальных пользователей малых ветроустановок – первоначальные вложения.

На пять стран (Канада, Китай, Германия Великобритания и США) приходится более 50 % мелких производителей ветроустановок. К концу 2011 года, насчитывалось более 330 мелких производителей ветероустановок, предлагающих цельные системы, и порядка 300 дополнительных фирм, поставляющих детали, технологии, консультации и услуги по продажам.

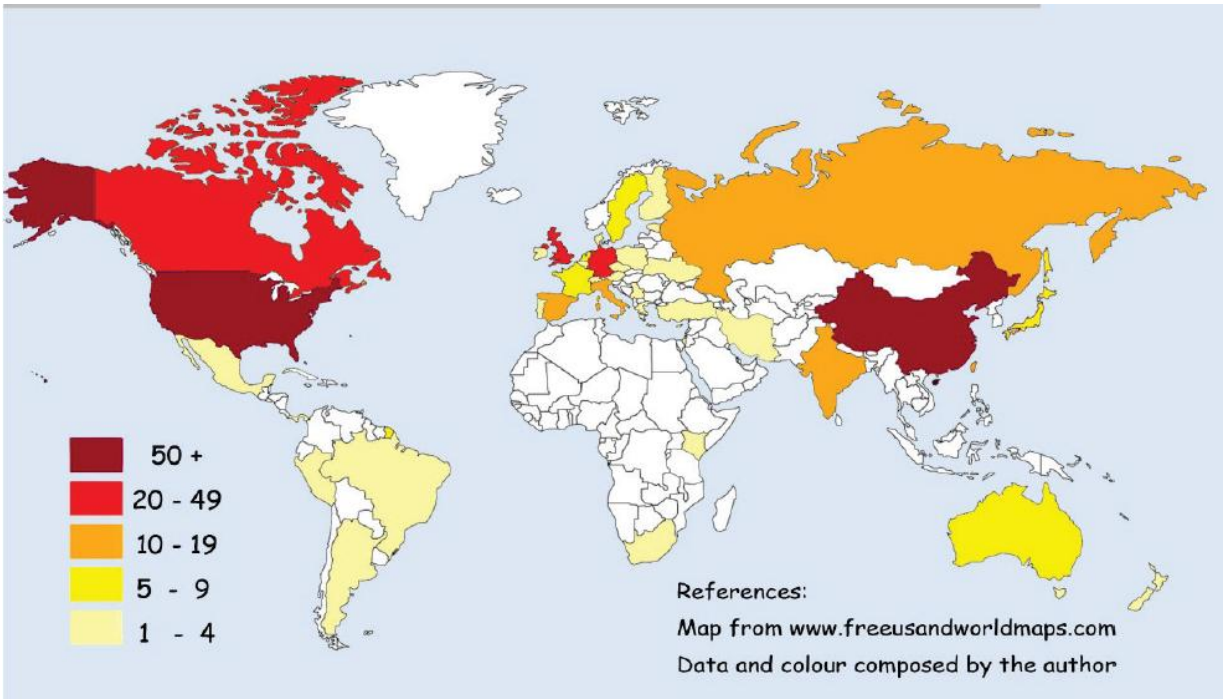


Рис. 3. Распределение производителей малых ветроустановок на конец 2011

Основываясь на распределении мировых поставщиков ветроустановок, производство остается сконцентрированным в нескольких регионах мира: в Китае, Северной Америке и в ряде европейских стран. Развивающиеся страны продолжают играть незначительную роль в малой ветроэнергетике. Очевидно, что огромные ветровые ресурсы Африки, Юго-Восточной Азии и Латинской Америки, где многие регионы идеально подходят для применения малых ветроустановок, еще не привели к созданию отечественных производителей оборудования, и было бы целесообразно совместными усилиями этих стран и международного сообщества инициировать международные программы для изменения этой ситуации.

В целом же малая ветроэнергетика уже продемонстрировала значительный рост в последнее десятилетие: потребительский интерес увеличивается, многие новые компании вошли в сектор. На рисунке 7 показан рост отрасли малой ветроэнергетики в последнее десятилетие: появилось более 120 новых производителей между 2000 и 2010 во всем мире. Один только Китай имеет производственные мощности для выпуска более чем 180000 единиц в год (по состоянию на 2011 г.). Это свидетельствует о том, насколько значительным может стать сектор малой ветроэнергетики в других регионах мира. Сравнивая с потенциальными возможностями использования энергии ветра, малая ветроэнергетика за пределами Китая по-прежнему развита слабо.

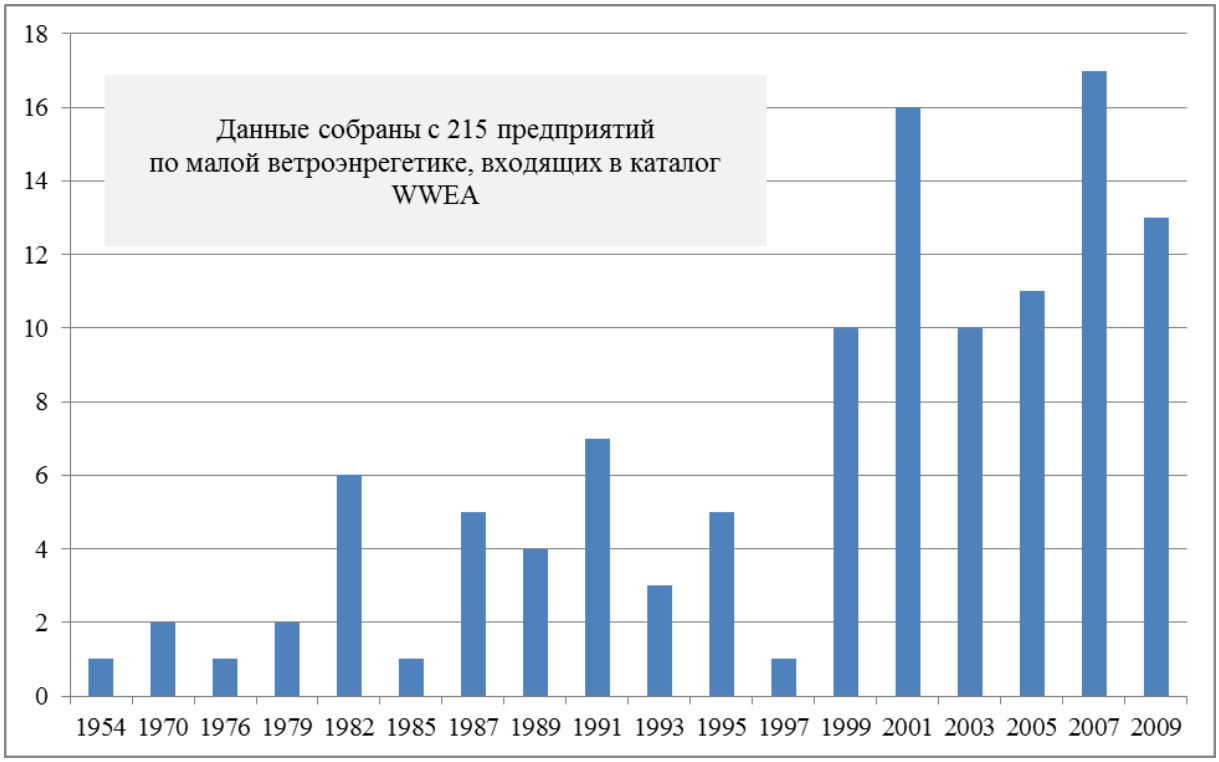


Рис. 4. Количество производителей малых ВЭУ по годам

Технология производства ГОВЭУ преобладает на рынке уже более 30 лет. На основании изучения 327 мелких производителей ветроустановок по состоянию на конец 2011 года известно, что 74 % используют технологию горизонтально-осевых ВЭУ, в то время, как только 18 % предлагают ВОВЭУ, и только 6 % производителей применяют обе технологии (рис. 5). Поскольку большинство вертикально-осевых моделей были разработаны в течение последних 5–7 лет, масштабы этой доли рынка остаются сравнительно небольшими.Средняя номинальная мощность ВОВЭУ оценивается в 7,4 кВт со средний мощностью лишь 2,5 кВт. Из 157 моделей ВОВЭУ, перечисленных в данной статье, 88 % имеют мощность меньше 10 кВт, 75 % – ниже 5 кВт.

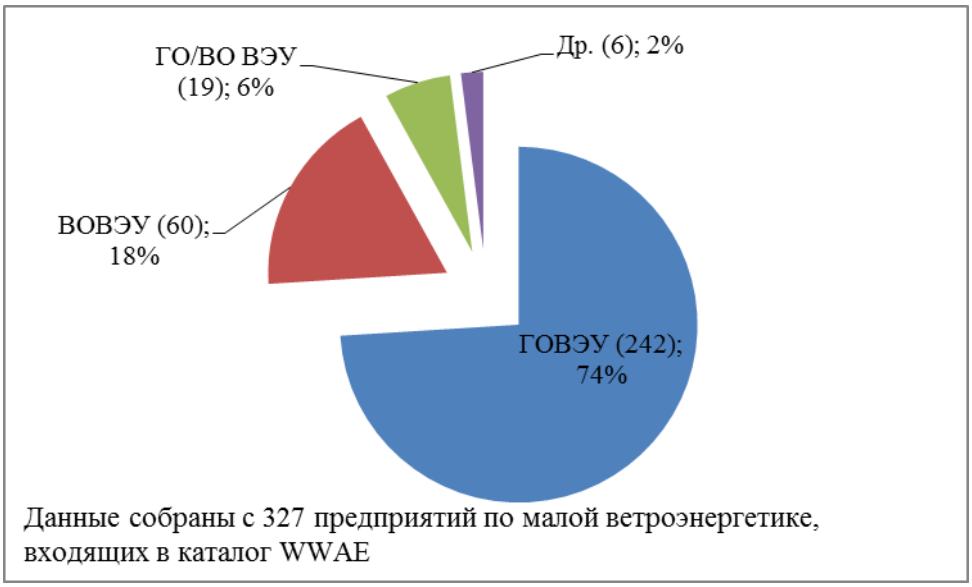


Рис. 5. Статистика конструкций ВЭУ на 2011

Это хорошо соотносится с реальным спросом на рынке, т.к. средняя мощность ВЭУ, проданных в 2011 году, составляет 1,6 кВт. Несмотря на тенденцию рынка к сетям с большей емкостью, возможность автономного применения продолжает играть важную роль в отдаленных районах развивающихся стран. Автономное применение включает электрификацию сел, питание телекоммуникационных станций, оффшорные и гибридные системы с дизельными и солнечными установками. В Китае, вне централизованной сети было расположено 97 % рынка в 2009 году, но 2,4 млн домохозяйств все еще не электрифицированы. По этой причине автономные системы будут продолжать играть значительную роль в Китае и во многих других странах с не электрифицированными районами. В последние годы рынок крупных сетевых систем увеличился, в частности, в некоторых развитых странах, например, в США, Великобритании или Дании. По состоянию на конец 2011 года, 25 мелких производителей ветроустановок в мире могут изготавливать турбины от 50 кВт и 100 кВт.

Будущее малой ветроэнергетики зависит от стоимости технологий, принимаемых местным правительством мер поддержки и экономического стимулирования, цен на ископаемое топливо, интереса инвесторов, осведомленности потребителей, сертификации и обеспечения качества, регулирующих процессы и правила, а также инструментов оценки ветрового потенциала. Эксперты ожидают высокие темпы роста производства малых ВЭУ, при условии роста потребительского спроса.

Высокая стоимость остается одним из основных факторов, сдерживающих распространение малой ветроэнергетики. В США расходы на установку десятка малых ВЭУ в 2011 году составляют от $2300/кВт до $10000/кВт, а средняя стоимость установки малых ВЭУ составила $6040/кВт, что означает увеличение на 11 % с 2010 года.

Китайская малая ветроэнергетика дала сравнительно более низкий средний оборот 12000 юаней / кВт (1900 USD - 1500 EUR). Малая ветроэнергетика находится в стадии разработки и без сомнения будет способствовать снижению производственных затрат в будущем. Тем не менее, для сокращения расходов важно, чтобы рынки малой ветероэнергетики могли продемонстрировать свою перспективность. Это требует надлежащей правовой базы и механизмов поддержки. Поэтому политические стимулы продолжают играть ключевую роль в более широком развертывании малой ветроэнергетики.

Успех малой ветроэнергетики зависит от стабильных схем поддержки этой сферы. Сегодня льготные тарифы, налоговые льготы, а также капитальные субсидии являются основными источниками поддержки в энергетической политике, направленной конкретно на малую ветроэнергетику. Сектор малой ветроэнергетики особенно выигрывает от растущей глобальной тенденции льготных тарифов на «зеленую энергию». К сожалению, лишь немногие страны реализовали конкретные схемы, подходящие для развития малой ветроэнергетики, которые можно было бы рассматривать как лучший инструмент для подключения к сети малых ветроустановок. Дополнительные политические меры, поощряющие использование возобновляемых источников энергии в принципе, также играют важную роль в развитии малой ветроэнергетики. Тем не менее, налоговые кредиты и капитальные субсидии не могут быть столь же эффективными, как производственные стимулы, поскольку они способствуют непосредственно продажам установок, но не производству энергии, и, следовательно, не могут привлечь инвестиции.

Основным условием успешного использования энергии ветра является, конечно же, наличие самого ветра. Точный прогноз скорости ветра необходим, чтобы рассчитать параметры ВЭУ, представляющие основу для ее экономической оценки. Инструменты для оценки параметров ветра являются дорогостоящими по отношению к стоимости малой ВЭУ, что представляет собой реальную проблему для малой ветроэнергетики. Однако, важно подчеркнуть важность таких данных. Особые проблемы возникают в городских условиях, где затенение и турбулентность создают сложнопрогнозируемые завихрения ветра. Традиционной карты ветровых ресурсов оказывается недостаточно, так как ветровые условия оцениваются на высоте 50 м, в то время как большинство малых ветроустановок не достигают высоты в 30 метров. В результате спрос на недорогие и эффективные методы прогнозирования и сбора местных данных о ветре будет являться еще одним ключевым движущим фактором, который позволит в дальнейшем совершенствовать и сокращать затраты.

Растущий спрос на экологичные и недорогие источники энергии во всем мире приводит к увеличению спроса и на малую ветроэнергетику.

В частности, в развивающихся странах малая ветроэнергетика может легко и быстро внести свой вклад в электрификацию сельской местности. Правительства и международные организации, такие как IRENA начали все больше и больше поощрять развитие малой ветроэнергетики в своих программах возобновляемых источников энергии. Также, у некоторых развитых стран есть планы на увеличение доли малой ветроэнергетики. Политическая поддержка, как ожидается, может дополнительно увеличить установленную мощность малой ветроэнергетики в ближайшие годы. Повышение цен на ископаемые виды топлива, глобальное потепление и постоянно растущий спрос на электроэнергию по-прежнему будут тремя постоянными двигателями малой ветроэнергетики. Для того, чтобы малая ветроэнергетика созрела, необходимы соответствующие стандарты и благоприятная политическая обстановка. Прогноз основан на отчетах отраслевых экспертов и моделях роста крупной ветроэнергетики, а также на исторической тенденции роста солнечной и фотоэлектрической индустрии в течение прошлого десятилетия. Соответственно, от малой ветроэнергетики не следует ожидать аналогичных моделей роста, как это было в крупной ветроэнергетике и солнечной энергетике до 2020 года. Но, тем не менее, малая ветроэнергетика уверенно прибавляет установленную мощность (за последние годы на 35 %). Темпы роста, как ожидается, будет сохраняться до 2015 года. За этот период времени, отдельные страны и международное сообщество малой ветроэнергетики сможет установить более строгие и структурированные стандарты и политику по регулированию рынка и поддержки инвестиций. На основе консервативного прогноза, рынок может впоследствии иметь устойчивый темп роста на 20 % с 2015 по 2020 год. Ветроиндустрияспособна достичь примерно 1000 МВт новой установленной мощности, добавляемой ежегодно, в 2020 году и достичь общей установленной мощности 5 ГВт к 2020 году.

Библиографический список

1. Сайт Мировой Ассоциации Ветроиндустрии (The World Wind Energy Association). – URL: http://www.wwindea.org/home/index.php.

2. Web site of WWEA Small Wind Section. – URL: http://small-wind.org/.

3. Web site of Free US and World Maps. – URL: www.freeusandworld-maps.com.

4. Соломин, Е.В. Ветроэнергетическая экономика / Е.В. Соломин // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – № 2. – С. 28–30.

К содержанию

УДК 621.31 + 004.45

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ SCADA-СИСТЕМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

Д.В. Топольский, И.Г. Топольская

Особую популярность в последние десятилетия получили так называемые SCADA-системы, позволяющие осуществлять диспетчеризацию и сбор данных в автоматизированном режиме. В настоящее время на рынке присутствует большое количество SCADA-систем зарубежного и отечественного производства. Задача выбора SCADA-системы в электроэнергетике является неоднозначной. На основании проведенного анализа современных программно-аппаратных средств автоматизации технологических процессов разработаны рекомендации по выбору программно-аппаратных средств передачи информации в SCADA-систему для объектов электроэнергетики.

Ключевые слова: SCADA-система, InTouch, Citect, iFIX, SIMATIC WinCC, TRACE MODE.

Современное развитие электроэнергетики предусматривает неуклонный рост уровня интеллектуализации оборудования. В настоящее время приоритетными являются задачи создания цифровых подстанций, измерительных систем, включающих smart-счётчики и smart-датчики, систем диагностики оборудования «on-line» и многих других интеллектуальных систем. Все эти электротехнические системы и комплексы требует специального программного обеспечения, использующего последние достижения информационных и инженерных технологий. Особую популярность в последние десятилетия получили так называемые SCADA-системы, позволяющие осуществлять диспетчеризацию и сбор данных в автоматизированном режиме. В настоящее время на рынке присутствует большое количество SCADA-систем зарубежного и отечественного производства. Задача выбора SCADA-системы в электроэнергетике является неоднозначной. Она неразрывно связана с оборудованием и спецификой технологического процесса. В этой связи был выполнен анализ SCADA-систем, представленных на рынке, с целью выработки рекомендаций для оптимального выбора данного программного обеспечения для вновь разрабатываемых электротехнических систем и комплексов, включая альтернативные источники энергии.

На основании проведенного анализа современных программно-аппаратных средств автоматизации технологических процессов разработаны следующие рекомендации по выбору программно-аппаратных средств передачи информации в SCADA-систему для объектов электроэнергетики:

1. Разработка специализированной SCADA-системы (micro-SCADA) для передачи информации объекта управления в настоящее время требуется далеко не всегда. Процесс разработки программного обеспечения (ПО) для энергетики важно упростить, сократить временные и прямые финансовые затраты на его разработку, минимизировать затраты труда. Процесс разработки собственного ПО может стать слишком долгим, а затраты на его разработку – недопустимо высокими. Подход, когда создавались программы под конкретный объект управления, в настоящее время не является актуальным в связи с появлением универсальных решений, которые, как правило, базируются на использовании семейства операционных систем Windows. Вариант с непосредственным программированием может быть привлекателен лишь для простых систем или небольших фрагментов большой системы, для которых нет стандартных решений или они в принципе не устраивают потребителя в силу ряда причин.

2. Специализированных аппаратных средств для подключения объектов управления к SCADA-системе обычно не требуется. Существующие универсальные SCADA-системы уже имеют в своих базах данных необходимую информацию об оборудовании. В том случае если информация о конкретном виде аппаратуры отсутствуют, то специальные инструментальные средства позволяют смоделировать тот или иной контроллер. К этому классу инструментального ПО относятся имеющие открытую архитектуру пакеты типа InConrol (Wonderware, USA) и т.п. В качестве локальных PLC в системах контроля и управления различными технологическими процессами в настоящее время применяются контроллеры как отечественных, так и зарубежных производителей. На рынке представлены сотни типов контроллеров, способных обрабатывать от нескольких десятков до нескольких десятков тысяч переменных. Однако следует помнить, что к аппаратно-программным средствам контроллерного уровня управления предъявляются жесткие требования по надежности, времени реакции на исполнительные устройства, датчики и т.д. Программируемые логические контроллеры должны гарантированно откликаться на внешние события, поступающие от объекта, за время, определенное для каждого события. Для критичных с этой точки зрения объектов рекомендуется использовать контроллеры с операционными системами реального времени (ОСРВ). Контроллеры под управлением ОСРВ функционируют в режиме жесткого реального времени. Разработка, отладка и исполнение программ управления локальными контроллерами осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения, широко представленного на рынке.

3. Наиболее применяемыми в России являются SCADA-системы InTouch [1, 2, 3], Citect [4, 5], iFIX [6, 7], SIMATIC WinCC [8, 9], TRACE MODE [10, 11], которые хорошо зарекомендовали себя при автоматизации производственных процессов, в том числе и электроэнергетике.

4. Рекомендуется примерный перечень критериев оценки SCADA-систем при их выборе, в котором можно выделить три большие группы показателей [12]:

• технические характеристики;
• стоимостные характеристики;
• эксплуатационные характеристики.

Данный перечень критериев уже сравнительно давно обсуждается в специальной периодической прессе. Выбор SCADA-системы представляет собой достаточно трудную задачу, аналогичную принятию решений в условиях многокритериальности, усложненную невозможностью количественной оценки ряда критериев из-за недостатка информации. К трудностям освоения SCADA-систем в России относятся как отсутствие эксплуатационного опыта, так и недостаток информации о различных SCADA-системах. В мире насчитываются несколько десятков компаний, занимающихся разработкой и внедрением SCADA-систем. Каждая SCADA-система является ноу-хау компании, и в этой связи информация о той или иной системе не столь обширна.

В качестве рекомендации при выборе SCADA-системы следует отметить, что технические характеристики у пяти вышерассмотренных систем InTouch, Citect, iFIX, SIMATIC WinCC, TRACE MODE сопоставимы. Все эти системы удовлетворяют практически всем требованиям, предъявляемым в настоящее время к SCADA-системам. Наибольшее количество инсталляций имеют системы InTouch, iFIX, SIMATIC WinCC. Системы Citect и TRACE MODE имеют важную техническую особенность – единое сетевое время.

По стоимостным характеристикам необходимо отметить, что системы InTouch, iFIX, SIMATIC WinCC, имеющие наибольшее количество инсталляций, имеют сопоставимые стоимостные характеристики. Несколько меньшую стоимость имеет пакет TRACE MODE российского производства. Также следует отметить, использование в российской энергетике отечественного программного продукта во многом упрощает юридическую сторону вопроса, делает энергетику менее зависимой от импорта. Однако производители Citect предлагают пользователям систему разработки бесплатно, а цена системы исполнения сравнима с другими SCADA-пакетами. Это обстоятельство при высоких технических характеристиках в сочетании с низкой стартовой ценой обеспечивают сильные рыночные позиции пакета Citect.

По эксплуатационным характеристикам системы InTouch, Citect, iFIX, SIMATIC WinCC, TRACE MODE так же имеют сопоставимые высокие показатели. Следует учитывать, что большое значение при внедрении современных систем диспетчерского управления имеет не только выбор SCADA-системы исходя из требований и особенностей технологического

процесса, но кадровое сопровождение. Подготовка специалистов по разработке и эксплуатации систем управления на базе программного обеспечения SCADA осуществляется на специализированных курсах различных фирм, курсах повышения квалификации. В настоящее время в учебные планы ряда учебных заведений начали вводиться дисциплины, связанные с изучением SCADA-систем. В частности проводится обучение специалистов по работе с системами InTouch и Citect. Однако специальная литература по SCADA-системам практически отсутствует, а имеются лишь отдельные статьи и рекламные проспекты.

Библиографический список

1. Factory Suite компании Wonderware. – URL: http://old.intouch.ru/catalog/fsuite.shtm.

2. SCADA система intouch. – URL: http://autoworks.com.ua/verxnie-urovni-asu-tp/scada-sistema-intouch.

3. Human Machine Interface (HMI) & SCADA Solutions. – URL: http://global.wonderware.com/EN/Pages/WonderwareHMISCADA.aspx.

4. CitectSCADA 7.30 – переход к объектно-ориентированной системе. – URL: http://www.rtsoft.ru/press/product/detail.php?ID=2145.

5. Применение ПО Citect в России и за рубежом. – URL: http://scada.ru/ru/integration/.

6. Терлецкий, М.Ю. Применение SCADA-пакета iFIX компании Intellution для построения АСУТП и АСКУЭ в энергетике / М.Ю. Терлецкий. – URL: http://masters.donntu.edu.ua/2011/etf/suchorukov/library/article4.htm.

7. Proficy HMI/SCADA-iFIX 5.5. – URL: http://www.ge-ip.com/power.

8. New – SIMATIC WinCC develops into a plantwide information system. – URL: http://www.automation.siemens.com/mcms/human-machine-interface.

9. SCADA система. SIMATIC WinCC V7.0 // ООО Сименс. Информация по продуктам. – URL: http://iadt.siemens.ru/assets/files/infocenter/catalogs_and_brochures/as/ProductInfo/13_WinCC_V70_r.pdf. – С. 126–129.

10. URL: http://www.adastra.ru.

11. Анзимиров, Л.В. Использование SCADA Trace Mode для разработки систем учета электроэнергии (АСКУЭ/АСТУЭ) / Л.В. Анзимиров // Информатизация и системы управления в промышленности. – 2008. – № 4 (20).

12. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е.Б. Андреев, Н.А. Куцевич, О.В. Синенко. – М.: Издательство «РТСофт», 2004. – 176 с.

К содержанию

ФАКУЛЬТЕТ ВОЕННОГО ОБУЧЕНИЯ

УДК 358.119.1 + 623.438

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕБНЫХ МАШИН БРОНЕТАНКОВОГО ВООРУЖЕНИЯ И ТЕХНИКИ

Ю.Н. Зайчиков, М.Н. Таземдинов

Выполнен анализ путей совершенствования подготовки специалистов для вооруженных сил. Проанализированы современные учебно-тренажерные средства, предложены направления их совершенствования.

Ключевые слова: боевая подготовка, учебно-тренажерные средства, бронетанковое вооружение.

В условиях годичного срока службы по призыву, когда в войска поступают современные вооружение и военная техника, требуется достичь натренированности военнослужащих в соответствии со своими функциональными обязанностями в короткие сроки. Применение для решения этой задачи штатных средств вооружения и военной техники приводит к значительным затратам (расход горюче-смазочных материалов и боеприпасов), ускоренному расходованию ресурса.

В настоящее время сложность и стоимость вооружения и военной техники достигла такого уровня, при котором в развитых государствах считается экономически целесообразным строить систему военного обучения максимально, используя современные технические средства обучения, основанные на передовых научных и технических достижениях.

Возрастает необходимость поиска новых путей совершенствования боевой учебы. Исходя из этого, намечены некоторые направления выхода из сложившейся ситуации, это:

– изменение периодов комплектования соединений Сухопутных войск и, как следствие – смещение начала учебного года по мере их комплектования;

– оптимизация сети полигонов и создание перспективной учебной материальной базы военных округов;

– совершенствование приказарменной учебной материальной базы боевой подготовки соединений за счет насыщения ее современными учебно-тренировочными средствами, позволяющими отрабатывать вопросы слаживания подразделений до роты (батареи) включительно;

– создание центров боевой подготовки, позволяющих в короткие сроки осуществить проверку готовности соединений к выполнению задач по предназначению.

Анализ современных тенденций развития УТС для бронетанкового вооружения и техники (БТВТ) в армиях развитых стран мира показывает, что в области подготовки личного состава происходит переход от тренажеров одиночной подготовки и подготовки в составе экипажа к использованию тренажерных комплексов, позволяющих в разной степени моделировать задачи тактических действий с учетом критериев эффективности применения штатного вооружения.

Разработка, производство и внедрение в войсках тренажерных средств направлены на решение таких основных задач, как:

– повышение боеготовности экипажей за счет увеличения времени тренировок, разнообразия моделируемых боевых ситуаций как на реальной, построенной на основе цифровых карт, так и на вымышленной местности, широты охвата вовлеченных в тренировки военнослужащих от рядового до высшего командного состава, отработки взаимодействия внутри экипажа, подразделения, между подразделениями и родами войск;

– проведение подготовки экипажей в условиях, которые невозможно смоделировать с использованием реальной техники, например – в условиях применения оружия массового поражения, использование техники в городе, среди мирного населения;

– существенное снижение себестоимости обучения за счет экономии топлива и моторесурсов боевой техники.

Основными проблемами развития и формирования современной системы УТС для БТВТ являются:

– отсутствие обоснованной единой методологии применения УТС, что приводит к тенденции нерационального создания новых дорогостоящих технических средств обучения без единого замысла и методического обеспечения;

– принятые на снабжение Вооруженных Сил УТС для БТВТ [1] морально и физически устарели, не отвечают современным требованиям боевой подготовки ;

– низкая унификация и ограниченная возможность интеграции различных учебнотренировочных средств;

– отсутствие модульности и взаимного сопряжения УТС для БТВТ;

– длительный период внедрения в учебный процесс существующих разработок новых УТС для БТВТ из-за отсутствия необходимого финансирования;

– низкая укомплектованность существующих учебных центров современными учебно-тренировочными средствами;

– отсутствие УТС на ряд образцов бронетанкового вооружения и техники, уже принятых на вооружение;

– отсутствие в номенклатуре УТС мультимедийных технических систем с использованием в учебном процессе интерактивных информационных обучающих программ.

Названные проблемы и объективные предпосылки для разработки и внедрения в процесс профессиональной подготовки экипажей БТВТ принципиально новых технологий обучения с использованием тренажерных систем предопределили проведение в рамках государственного оборонного заказа опытно-конструкторских работ серии «Бароскоп» и «Статоскоп» по созданию перспективных УТС: учебных компьютерных классов в стендовом исполнении, компьютерных стендов боевых отделений и динамических тренажеров экипажей и вождения с использованием последних достижений в области компьютерных технологий.

Внедрение в учебный процесс разработанных тренажеров и классов позволит обеспечить:

– оценку по установленным критериям уровня профессиональной подготовленности военнослужащих по той или иной военноучетной специальности;

– возможность совершенствования имеющихся и восстановления утраченных навыков в зависимости от квалификации обучаемого с использованием программ различной сложности;

– увеличение интенсивности мероприятий боевой подготовки и качества обучения военнослужащих.

Вместе с тем устранение отмеченных проблем в развитии УТС для БТВТ возможно путем решения следующих задач:

1. Формирование единых требований к разработке, организации поставок и эксплуатации УТС для БТВТ.

2. Создание сети учебных центров боевой подготовки нового поколения, способных решать весь спектр задач обучения подразделений и частей, органов управления тактического звена на основе единой системы синтезирования визуальной обстановки, систем объективного контроля результатов выполнения учебно-боевых задач, моделирования боевых действий на любом театре военных действий.

3. Укомплектование военных учебно-научных центров, учебных центров по подготовке младших специалистов, учебных центров боевой подготовки и боевого применения достаточным количеством современных учебно-тренировочных средств для БТВТ.

4. Широкое применение в обучении экипажей БТВТ мультимедийных технических систем с использованием в учебном процессе интерактивных информационных обучающих программ, трехмерного моделирования объектов изучения.

5. Создание условий для унификации УТС, модульности их построения с возможностью сопряжения в едином информационном поле.

6. Разработка методик применения УТС, программ боевой подготовки с использованием УТС в системе обучения.

Таким образом, развитие системы УТС для БТВТ должно происходить по следующим основным направлениям:

– улучшение реалистичности и качества изображения системы визуализации, совершенствование моделей движения машины и стрельбы;

– совершенствование системы автоматизированного управления обучением, разработка пакетов обучающих программ и блоков автоматического контроля качества подготовки;

– широкое внедрение учебных компьютерных классов в стендовом исполнении и компьютерных стендов боевых отделений для повышения качества изучения основ эксплуатации БТВТ;

– разработка комплексных тренажеров и тактических тренажерных систем для подготовки экипажей БТВТ танковых (мотострелковых) подразделений – для отработки взаимодействия экипажей и подразделений при выполнении тактических задач, в рамках решения задачи перехода к использованию в боевой подготовке тренажеров, позволяющих моделировать задачи тактических действий, ООО ПФ «Логос» уже разработан тактический тренажер усиленного мотострелкового взвода;

– внесение изменений в руководящие документы Министерства обороны, регламентирующие порядок разработки технических заданий на создание новых образцов вооружения и военной техники (в частности, БТВТ), для недопущения принятия на вооружение нового образца без создания соответствующего комплекта УТС (на примере разработки ТТЗ для создания унифицированных платформ БТВТ и машин на их базе);

– массовое создание тренажеров нового типа (с возможностью их использования в мобильных и стационарных вариантах) с раздельными платформами (стационарными, динамическими) для использования в индивидуальном обучении экипажей БТВТ. Обязательное условие при этом – возможность их объединения в единый комплекс для обеспечения подготовки подразделений, частей и органов военного управления путем внедрения результатов ОКР серии «Бароскоп», как единой платформы для создания тренажеров образцов вооружения и военной техники;

– разработка технических систем и соответствующего программного обеспечения по созданию для каждого члена экипажа электронной системы учета уровня его обученности в процессе всего срока военной службы.

В последние годы предприятия-разработчики УТС создали необходимые заделы в научной и производственной сфере своей деятельности, позволяющие реализовать указанные мероприятия. Проведение испытательных и исследовательских работ осуществляют специалисты НИИЦ БТ 3 ЦНИИ Минобороны России, имеющие необходимый опыт и располагающие соответствующим лабораторным оборудованием.

Проведение вышеуказанных мероприятий позволит достичь следующих результатов:

1. Внедрение в процесс боевой подготовки войск УТС для БТВТ с использованием новейших достижений вычислительной техники, программного обеспечения, математического, виртуального и полунатурного моделирования.

2. Создание технической основы для формирования сети учебных центров боевой подготовки нового поколения, обеспечивающих эффективное освоение нового вооружения, военной и специальной техники (в том числе БТВТ) и современных форм и способов действий войск.

3. Повышение унификации технологий, моделей, вычислительных и программных средств для межвидового взаимодействия за счет создания перспективных УТС (тактических тренажерных комплексов) и их применения для боевой подготовки войск.

4. Повышение уровня профессиональной подготовки военнослужащих.

5. Переход к оптимальному соотношению в проведении мероприятий боевой подготовки на УТС и на реальных образцах БТВТ, обеспечив при этом внедрение эффективных и малозатратных технологий.

Реализация представленных мероприятий совершенствования системы боевой подготовки позволит существенно повысить уровень готовности соединений и воинских частей к выполнению задач по предназначению.

Библиографический список

1. Альбом учебно-тренировочных средств по бронетанковому вооружению и технике. – М.: Воениздат, 1988. – 168 с.

2. Евдокимов, И.А. Общие требования к новому поколению тренажеров вождения военной автомобильной техники / И.А. Евдокимов, В.В. Чистяков // Грузовик. – 2012. – № 3. – С. 15–21.

К содержанию

УДК 358.11 + 623.47

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ БОЕПРИПАСОВ И ВЗРЫВАТЕЛЕЙ

А.Н. Каляженков, А.В. Тычков, Д.П. Мальгин

Рассмотрены тенденции развития современных боеприпасов и взрывателей.

Ключевые слова: Боеприпас, взрыватель, выстрел.

История артиллерийских боеприпасов началась задолго до изобретения пороха. Снаряд как средство поражения противника прошел длительный путь развития от простого камня до сложного устройства, обладающего огромной разрушительной силой.

Первыми снарядами, применяемые человеком для защиты и охоты были камни, палки и кости. В XII–XIII в.в. с появлением пороха и изготовлением огнестрельного оружия стали применяться каменные, а впоследствии свинцовые, железные и чугунные ядра произвольной формы. В дальнейшем артиллерийские снаряды стали различаться по размерам (калибрам), массе, назначению и принципу действия.

В 1-й мировой войне применялись следующие боеприпасы: фугасные, шрапнельные, зажигательные, химические, осветительные, бронебойные и другие виды снарядов. Некоторые из них находятся на вооружении и в XXI веке.

В годы 2-й мировой войны впервые применялись активно–реактивные, кумулятивные и управляемые снаряды. После окончания войны были разработаны и приняты на вооружение самоприцеливающиеся с коррекцией траектории снаряды, с различными типами боевых частей – кассетными, противотанковыми, осколочно–фугасными, бетонобойными, получили широкое применение активно–реактивные снаряды.

Современная артиллерия обладает мощным и точным огнем, большой дальностью стрельбы. Номенклатура артиллерийских, минометных, реактивных выстрелов к орудиям, минометам и реактивным системам залпового огня постоянно совершенствуется, систематически ведется рестайлинг существующих боеприпасов.

Под ***артиллерийским (минометным) выстрелом (реактивным снарядом)*** понимается совокупность элементов, необходимых для производства одного выстрела (пуска) из орудия, миномета, боевой машины, пусковой установки.

В состав *артиллерийского (минометного) выстрела* в различных сочетаниях входят следующие элементы: снаряд (мина), взрыватель, пороховой заряд, гильза (картуз), средства воспламенения и вспомогательные элементы (средства обтюрации, пламегасители и флегматизаторы, размеднители пр.).

В состав *реактивного снаряда* входят головная часть, взрывательное устройство, реактивный двигатель, ракетная часть, средства воспламенения и вспомогательные элементы.

Тенденции развития современных боеприпасов направлены на увеличение точности и дальности поражения целей. К ним относятся как усовершенствованные образцы существующих типов артиллерийских выстрелов и их элементы, так и качественно новые высокоточные боеприпасы с самонаводящимися и самоприцеливающимися элементами.

К основным направлениям зарубежных и отечественных разработок боеприпасов относятся:

- ***Электромагнитные боеприпасы*** (ЭМБ) начали использовать относительно недавно. Теперь, когда бой превратился в противоборство начиненных электроникой машин, они находят широкое применение.

Для поражения электроники в цели (и следовательно, всей цели) достаточно пережечь токовым импульсом полупроводниковый элемент размером в десятитысячные доли миллиметра. При этом для уничтожения цели, в состав которой входит электроника, достаточно импульса радиочастотных электромагнитных излучений, энергия которого в сотни тысяч или в миллионы раз меньше энергии, необходимой для уничтожения той же цели ударной волной или осколками.

Такое оружие может быть создано как в виде стационарных и мобильных электронных комплексов направленного излучения, так и в виде электромагнитных боеприпасов, доставляемых к цели с помощью артиллерийских снарядов, мин, управляемых ракет (рис. 1), авиабомб и т.п. Уже существуют реактивные боеприпасы (рис. 2) с пьезоэлектрическим и имплозивным магнитным генератором частоты.

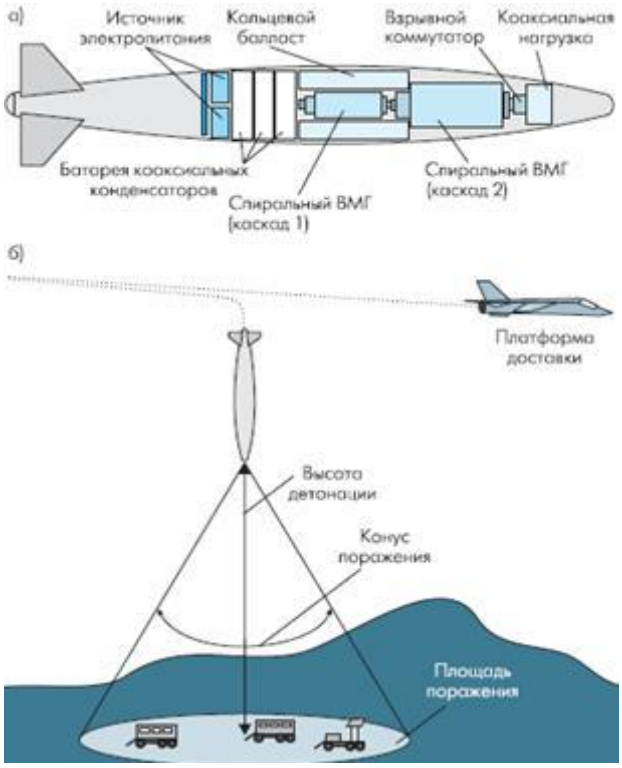


Рис. 1. Конструкция и принцип применения ЭМБ

Рис. 2. Общий вид ЭМБ

Электромагнитные боеприпасы потенциально обладают значительно большим радиусом поражения радиоэлектронных средств, чем традиционные, однако для достижения их максимальной эффективности необходимо выводить боеприпас по возможности как можно ближе к объектам поражения с помощью высокоточных систем наведения.

- ***Осколочные снаряды направленного действия.*** Тенденция развития таких боеприпасов предусматривает переход к направленным осколочным потокам, точнее, к потокам готовых поражающих элементов (ГПЭ).

В зависимости от конфигурации осколочного поля выделяют различают боеприпасы с круговым, осевым и радиально направленным полем.

Осколочные боеприпасы с круговым полем являются наиболее распространенными. Их главные преимущества заключаются в максимальном коэффициенте использования энергии взрывчатого вещества, в возможности расположения боевой части в любом месте снаряда и поражения цели при произвольной стороне промаха. Основной недостаток ОБП с более или менее широкими круговыми полями, требуемыми для уверенного накрытия цели, – низкая плотность осколочного поля.

- ***Кумулятивные боевые части и боевые части на основе ударного ядра.*** Специфический механизм формирования ударного ядра из металлической тонкостенной облицовки с помощью заряда мощного взрывчатого вещества обеспечивает высокий отбор химической его энергии с трансформацией значительной ее доли в кинетическую энергию поражения цели.
- ***Кассетные боеприпасы.*** Основные разработки касаются систем высокоточного оружия с самонаводящимися и самоприцеливающимися боевыми элементами (рис. 3).

Рис. 3. Реактивный снаряд с кассетной ГЧ с самоприцеливающимися БЭ

- ***Боеприпасы объемного взрыва.*** В настоящее время разработан и совершенствуется большой спектр термобарических боеприпасов (рис. 4).

Рис. 4. Реактивный снаряд с термобарической головной частью

- ***Разведывательные боеприпасы.*** Целью разработки являлось обеспечение возможности наблюдения с позиции артиллерийского подразделения за районом расположения поражаемых целей (точность определения координат объектов существующих образцов до 50 м).

- ***Системы модульных метательных зарядов*** позволяют автоматизировать процесс заряжания орудия, способствуя повышению скорострельности.
- ***Безгильзовые боеприпасы.*** Основным их преимуществом является значительное упрощение конструкции затвора оружия, что позволяет резко увеличить скорострельность оружия, снизить массу как самого оружия, так и самого боеприпаса.
- ***Снаряды увеличенной дальности***являются продолжением разработки активно-реактивных боеприпасов.
- ***Умные боеприпасы.*** Обилие самонаводящихся СП поражает воображение: «умные» ракеты, бомбы, гаубичные снаряды и др. Успех в создании 20-мм самонаводящихся снарядов открывает дорогу к еще более впечатляющей системе – самонаводящимся снайперским пулям.
- ***Боеприпасы нелетального действия.*** При формулировании требований к снаряду военные специалисты выдвигают непременное условие: при его срабатывании должен создаваться более сильный звуковой эффект, чем при взрыве обычного боеприпасов.

Одной изважнейшей составной частью артиллерийского выстрела (реактивного снаряда) является взрыватель**.**

Артиллерийские взрыватели представляют собой устройства, предназначенные для приведения в действие снаряжения снаряда в требуемой точке траектории.

По виду действия взрыватели подразделяются: на ударные, на дистанционные, на дистанционно-ударные и неконтактные.

Ударные взрыватели срабатывают при встрече с преградой (целью). По времени (быстроте) действия ударные взрыватели подразделяются на взрыватели мгновенного (время срабатывания не превышает 0,001 с), инерционного действия (от 0,001 до 0,01 с) и замедленного действия (0,01–0,1 с).

Дистанционные взрыватели срабатывают на траектории в соответствии с произведенной перед выстрелом установкой. Они могут быть пиротехнические, механические, электрические и электромеханические. Наибольшее распространение получили взрыватели с часовым механизмом (механические).

Дистанционно-ударные взрыватели представляют собой сочетание двух механизмов: дистанционного и ударного.

Неконтактные взрыватели вызывают взрыв снаряда при сближении с целью, срабатывая под воздействием какой-либо энергии или поля, отраженных или излучаемых ею.

Неконтактные взрыватели (радиовзрыватели) излучают энергию и реагируют на нее после отражения от цели.

В России взрыватели производят несколько предприятий: НИИ «Дельта», НИИ «Импульс», НИИЭП, ЦНИИ ТОЧМАШ, ГНПП «Прибор» и ФГУП «НИИ «Поиск».

К настоящему времени прослеживается *тенденция вытеснения механических взрывателей* превосходящими по техническим и экономическим характеристикам *электронными аналогами*, что особенно заметно на фоне быстро растущего рынка электронных взрывателей. При этом данные типы взрывателей, так же как и механические, имеют ряд особенностей, рассмотрение которых заслуживает отдельного внимания.

Например, в состав современных ***взрывателей для РСЗО*** входит *электронное временное устройство* собранное из специализированных микросхем, обеспечивающих высокую точность отсчета установленного времени действия без использования прецизионных элементов в задающем генераторе временного устройства. Требуемое время дистанционного действия устанавливается аппаратурой дистанционного управления.

Таким образом, тенденции совершенствования современных боеприпасов направлены, как на модернизацию существующих, так и создание технически новых систем, соответствующих требованиям современного общевойскового боя.

Библиографический список

1. Развития современных боеприпасов и взрывателей: научное издание / Р.Н. Акиншин, В.Г. Дмитриев и др. – М:. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013.

2. Конструкция средств поражения, боеприпасов, взрывателей и систем управления средствами поражения: учебное пособие / С.В. Партала, В.И. Алчинов и др. – Пенза: ПАИИ, 2004.

3. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Часть 1: Учебник для вузов / под ред. чл.- кор. РАРАН А.А. Королева и чл.- кор. МАНПО В.Г. Кучерова; ВолгГТУ. – Волгоград. 2002.

К содержанию

УДК 623.437

КОНЦЕПЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К ВОЕННОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

И.А. Мурог, В.В. Окольников

В статье обосновывается необходимость и порядок разработки новых тактико-технических требований к военной автомобильной техники.

Ключевые слова: военная автомобильная техника, система вооружения, тактико-технические требования, ведущие колеса.

Военная автомобильная техника (ВАТ) является неотъемлемым элементом системы вооружения. Около 94 % подвижного наземного вооружения и военной техники (ВВТ) ВС РФ монтируется на автомобильных базовых шасси (АБШ). Ими обеспечивается подвижность 100 % технических служб тыла, 99 % ВВТ РВСН, ВВС, 92 % ВВТ ВМФ, 71 % ВВТ СВ. Для большинства ВВТ способность или неспособность АБШ обеспечить требуемые режимы их функционирования по параметрам подвижности, готовности, живучести равносильно таким оценкам, как «задача выполнена» или «задача не выполнена».

Переход Вооруженных Сил Российской Федерации к новому облику предопределяет обеспечение паритета отечественной и зарубежной ВАТ по основным свойствам. При этом финансовые возможности России в ближайшей и долгосрочной перспективе будут существенно уступать возможностям ведущих зарубежных стран. Таким образом, существует сложная научно-техническая и организационно-экономическая проблема значительного ускорения темпов развития ВАТ в условиях финансового дефицита. Решение этой проблемы возможно только на основе системного подхода, и требует на первом этапе обоснования новых тактико-технических требований к военной автомобильной техники в изменившихся современных и перспективных условиях и задачах ее применения.

Развитие ВАТ всех видов и типов целиком и полностью определяется состоянием и направлениями развития системы вооружения, развитием форм и способов вооруженной борьбы и другими факторами.

Следует ожидать, что тенденция повышения роли ВАТ как в целом в системе вооружения ВС РФ, так и в обеспечении требуемых уровней подвижности, готовности, живучести образцов, комплексов и систем подвижного наземного ВВТ сохранится. Этому способствуют следующие обстоятельства:

- наличие устойчивой тенденции увеличения количества образцов ВВТ на АБШ, а также тенденции придания самоходных качеств ранее буксируемым или перевозимым системам вооружения;

- договорные ограничения на численность боевых бронированных машин обусловили поиск приемлемых вариантов их замены наВАТ, способных обеспечить решение задач без существенного снижения боевых возможностей ВВТ, подразделений и частей. Это требует организации работ по созданию высокомобильных автомобилей с повышенными защитными свойствами, а также повышения защитных свойств традиционных автомобилей многоцелевого назначения (АМН);

- отдельные виды боевого обеспечения, большинство технических средств которых монтируется на АБШ, перерастают в самостоятельные боевые единицы. Многие средства боевого обеспечения интегрируются между собой и со средствами поражения в комплексные многофункциональные системы, играющие существенную роль в достижении целей боя;

- опыт войн и военных конфликтов последнего десятилетия показывает наличие тенденции ведения боевых действий формированиями, объединяющими под единым командованием разнородные силы и средства вооруженной борьбы. Наиболее характерными станут высокоманевренные действия подразделений и частей автономно, с отрывом от главных сил при высокой степени тактической и огневой самостоятельности;

- совершенствование организационно-штатной структуры ВС РФ, создание новых формирований, основным средством обеспечения подвижности которых является ВАТ;

- возрастание потребностей войск в материальных средствах и, как следствие, увеличение объемов перевозок и интенсивности использования автомобильного транспорта. Потребности в подвозе материальных средств войсками в среднем за каждые 5–6 лет возрастает на 20–25 %, а масса заправки мсд и тд за каждые 5 лет увеличивается в 1,25–1,28 раза;

- подвижность стала одной из основных составляющих боевой мощи ВС, обуславливая необходимость совершенствования одного из основных средств ее обеспечения.

Основой для определения оперативно-тактических требований к ВАТ являются оперативно-тактические условия использования, под которыми понимается совокупность факторов, обусловленных назначением и характером задач, выполняемых ВАТ, их местом в системе вооружения, а также особенностями театров военных действий.

В целом оперативно-тактические условия использования ВАТ будут характеризоваться:

– использованием ВАТ на всех континентальных ТВД, в самых разнообразных климатических, гидрографических и дорожно-грунтовых условиях, включая экстремальные;

– широким применением ВАТ во всех элементах боевого порядка (оперативного построения) войск, все более широкое использование ВАТ под монтаж образцов, комплексов, систем вооружения, определяющих боевую мощь частей и соединений;

– возрастанием значения ВАТ в осуществлении перевозок войск и материальных средств, особенно в войсковом и оперативном звеньях.

В условиях отсутствия железных дорог, или их разрушения, автомобильный транспорт становится практически единственным средством осуществления воинских перевозок на ТВД.

Множество факторов, влияющих на условия и режимы функционирования ВАТ, условно разделяются на две основные группы:

– факторы, определяемые условиями ТВД;

– факторы, определяемые характером задач, решаемых войсками.

К факторам, определяемым особенности ТВД, относятся: природно-климатические и дорожно-грунтовые условия и их сезонные изменения, развитие дорожной сети и степень возможного ее разрушения, рельеф, растительный покров, наличие водных преград и др.

Основными факторами, относящимися ко второй группе, являются области применения и задачи ВАТ, режимы функционирования, место в боевых порядках и характер воздействия противника, габаритно-массовые характеристики ВВТ на АБШ и перевозимых грузов, объемы и интенсивность воинских автомобильных перевозок, требуемые уровни выполнения задач и др.

Климатические и дорожно-грунтовые условия являются одним из основных факторов, определяющих оперативно-тактические условия использования ВАТ. Важным показателем климатических условий являются средние и экстремальные температуры окружающего воздуха и средние погодные условия, а также их сезонные изменения. Перепад между максимальной (летом) и минимальной (зимой) температурой окружающего воздуха на территории России и прилегающей к ней территориях стран СНГ достигает более 100 ^{o}С. Минимальная температура в северо-восточных районах страны может достигать минус 60…69 ^{o}С. Значительные колебания температуры оказывают влияние на готовность ВАТ и условия работы водителей (экипажей, расчетов).

В качестве основных климатических факторов, при районировании территории России для технических целей, приняты температура и относительная влажность воздуха. Возможность использования ВС России в составе коалиционных сил расширяет перечень климатических районов для исследования особенностей влияния природно-климатических факторов на использование ВАТ.

Анализ требований ГОСТ 16350 показывает, что ВАТ должны использоваться в районах с температурой воздуха в диапазоне от минус 64 ^{o}С до

плюс 50 °С и средней относительной влажностью воздуха от 70 % до 87 %. Средняя декадная высота снежного покрова, влияющего на проходимость ВАТ, достигает 0,4 м. Все это порождает ряд особенностей использования ВАТ в различных климатических районах.

С военной точки зрения, территория России разделена на стратегические направления и районы, характеризующиеся различными природно-климатическими условиями. Так, например, Северо-западное стратегическое направление включает районы Заполярья, лесисто-болотистой, каменисто-озерной местности и районы умеренного и умеренно-холодного климата; Южное направление (Ближневосточное и Средневосточное) – горную и пустынно-песчаную местность; Дальневосточное стратегическое направление – горно-таежную местность и очень холодный, холодный, умеренно-холодный климатические районы.

Сезонные изменения температуры окружающего воздуха, влажность, количество выпадаемых осадков, а также глубина снежного покрова являются основными показателями климата, которые определяют уровень требований к образцам ВАТ с точки зрения обеспечения живучести и стойкости к внешним природным воздействиям. Одним из основных требований к ВАТ является обеспечение ее работоспособности при температуре окружающего воздуха в пределах от минус 50 °С до плюс 50 °С.

К особым природно-климатическим зонам относятся горные, пустынные районы, районы Крайнего Севера, лесисто-болотистая местность, где наряду с климатическими факторами велико значение рельефа местности и дорожно-грунтовых условий.

Горные районы представляют собой труднопроходимую местность. Если низкие (500…1000 м) горы, как правило, хорошо освоены, в них имеется развитая сеть дорог, то для средневысотных гор (1000…2000 м) характерны крутые, нередко покрыты лесом склоны, труднодоступные вне дорог для колесных, а местами и для гусеничных машин. Дороги обычно проходят по долинам, ущельям, склонам и карнизам гор.

Значительная крутизна скатов, характерная для высоких (свыше 2000 м) гор, в большинстве своем исключает передвижение ВАТ вне дорог. Перевалы лежат на высоте 1000…3000 м, большую часть года они закрыты снегом и недоступны для движения.

В горных районах узкие, извилистые с закрытыми поворотами дороги характеризуются наличием чередующихся подъемов и спусков крутизной 3…6 %, а иногда 15…20 %. Подъемы и спуски занимают на некоторых участках до 40 % протяженности маршрута, длина отдельных спусков (подъемов) достигает 15…20 км. Проезжая часть дорог покрыта в основном каменистым грунтом. Проходимость дорог резко меняется в зависимости от времени года и погодных условий.

Погодные условия в данной местности характеризуются большой неустойчивостью. Значительные колебания температуры наблюдаются на различных высотах (у подножия перевала и на перевале) и достигают летом в течении суток: днем – от плюс 40 ^{o}C и выше; ночью – до минус 5 ^{o}C, а в зимнее время – от $\pm$ 5 ^{o}C днем до минус 40 ^{o}C ночью. Значительно затрудняют передвижение ВАТ в горах частые снежные метели, гололед, туманы, оттепели, обвалы, осыпи, камнепады, оползни, селевые потоки, снежные лавины.

Пустынные районы на Южных и некоторых Дальневосточных направлениях занимают значительные площади. На использовании ВАТ в этой особой зоне большое влияние оказывают высокая температура воздуха и грунта, запыленность воздуха. Средние температуры теплого месяца в пустынях плюс 32 ^{o}C. Максимальная температура летом достигает плюс 55 ^{o}C днем и падает ночью до 10 ^{o}C, при такой температуре почва нагревается до 70 ^{o}C.

Зима не устойчивая, но холодная. Морозы достигают до минус 36 ^{o}C. Снежный покров незначительный и кратковременный. Частые ветры большой силы (скорость ветра 10…30 м/с) вызывают песчаные и пылевые бури.

В зоне Крайнего Севера на использование ВАТ оказывают влияние низкие температуры воздуха, обширные труднопроходимые районы тундровой, заболоченной, лесотундровой и каменисто-озерной местности. Эти районы характеризуются суровым климатом, продолжительной зимой, глубоким снежным покровом, частыми бурями и буранами, длительной полярной ночью.

В октябре–ноябре образуется устойчивый снежный покров, достигающий 1,5…2 м. Автомобили повышенной проходимости способны преодолевать заносы снега глубиной 0,4…0,5 м.

Сезонные изменения погодных условий оказывают значительное влияние на проходимость ВАТ. Глубокий снежный покров делает некоторые районы непроходимыми для колесной и труднопроходимыми для военной гусеничной техники. В период весенней и осенней распутицы, ранее хорошо накатанные грунтовые дороги могут стать непроходимыми для колесной техники.

Рельеф местности является одним из важных факторов физико-географических условий, влияющим на применение ВАТ, особенно на ее проходимость. Вместе с тем рельеф является самым стабильным фактором, что необходимо учитывать при разработке нового поколения ВАТ. Анализ данных НИУ МО показывает, что для обеспечения эффективного использования ВВТ АБШ и автотранспорт должны быть способными преодолевать подъемы крутизной не менее 30° и устойчиво передвигаться по косогорам до 20°.

Реки и другие водные преграды составляют серьезные препятствия для передвижения, особенно для объектов, не способных передвигаться на плаву. На Западном направлении, например, на 100 км глубины действий войск при ведении боевых действий возникнет необходимость преодолевать в среднем 14 рек, из них 68 % – широкой до 65 м, 14 % – 65…100 м, 14 % – 100…300 м и 4 % – шириной более 300 м. В интервале глубин рек 0,7…2,0 м вероятность возникновения потребности преодоления рек глубиной 1,6…1,8 м на Западномнаправлении составляет 0,226, а на Северо-Западном направлении – 0,305.

В связи с этим улучшение бродоходимости армейских автомобилей (увеличение глубины преодолеваемого брода) от 1,5 до 1,75…1,8 м увеличивает количество преодолеваемых ими водных преград на 22…30 %.

Сложные гидрографические условия, жесткие нормативы на сроки переправ соединений, наличие автомобилей в подразделениях, системах и комплексах вооружения наряду с другими видами плавающей техники обуславливают высокие требования кВАТ по преодолению водных преград, вплоть до способности части ВАТ к преодолению их на плаву.

В ходе боевых действий состояние дорожной сети может изменяться – до 20 % протяженности дорог с усовершенствованным и до 50 % дорог с облегченным покрытием могут быть разрушены при воздействии противника по находящимся на них технике, сооружениям и населенным пунктам. Разрушенные участки дорог по трудности их преодоления ВАТ приближаются к необорудованной местности. Дороги с облегченным покрытием и грунтовые дороги могут стать труднопроходимыми в результате интенсивного движения по ним транспорта, особенно военной гусеничной техники.

Значительным препятствием для ВАТ являются зоны завалов и разрушений, площадь таких зон в полосе армии может составить 1500…2000 км^2, а зоны сплошных пожаров – 1100…1500 км^2 [69].

Дорожно-грунтовые условия влияют на формирование требований кВАТ по проходимости, а в совокупности с показателями проходимости и экономическими показателями – на определение оптимального, для данных условий, количества ВАТ разных типов в автомобильном парке.

Таким образом, анализ природно-климатических зон и дорожных условий показал, что каждая из них создает специфические условия, в том числе и экстремальные (низкие температуры на Севере и высокие на Юге, запыленность воздуха и нехватка источников воды, труднопроходимая местность, крутые подъемы и спуски и т.д.), влияющие на использовании ВАТ. С учетом того, что возможные боевые действия могут вестись на любом стратегическом направлении, ВАТ всех классов грузоподъемности и должны обеспечивать выполнение возложенных на них задач в любых природно-климатических и дорожно-грунтовых условиях.

Оперативно-тактические требования войск к ВАТ определяются их качественными потребностями, под которыми понимается совокупность требований, характеризующая конструктивное исполнение образцов, их технический уровень (прежде всего подвижность и надежность), готовность к использованию (применению), живучесть, стойкость к внешним воздействиям, рациональная унификация с бронетанковой техникой и автомобильной техникой хозяйственного предназначения, эксплуатационные свойства. Технический уровень, эксплуатационные характеристики и возможности ВАТ должны обеспечивать требуемые уровни решения задач войсками и подвижными наземными образцами.

Основой для определения перспектив развития ВАТ являются требования войск и ВВТ к тактико-техническим характеристикам образцов автомобильной техники, обусловленные прогнозируемыми условиями ее использования.

Основным методом определения значений параметров ТТХ, является анализ требований, задаваемых войсками, применительно к автомобилям каждого класса грузоподъемности, с учетом возложенных на них задач. Номенклатура основных параметров ТТХ может быть получена в результате анализа материалов, представленных НИУ Министерства обороны России.

В целом номенклатуру параметров тактико-технических характеристик ВАТ условно можно разделить на группы:

а) параметры назначения

1) грузоподъемность;

2) удельная грузоподъемность (использование снаряженной массы);

3) допустимая масса буксируемого прицепа;

4) коэффициент прицепной нагрузки;

5) энерговооруженность (мощность двигателя и удельная мощность ВАТ);

б) параметры подвижности (мобильности)

1) максимальная скорость движения ВАТ;

2) средняя скорость движения ВАТ по грунтовым дорогам;

3) энерговооруженность (тип двигателя, мощность двигателя и удельная мощность ВАТ).

4) проходимость (опорная и геометрическая, включающие в себя параметры: дорожный просвет; удельное давление на грунт; глубину преодолеваемого брода; ширину преодолеваемого рва);

5) запас хода;

6) транспортабельность;

в) параметры надежности

1) безотказность (наработка на отказ);

2) долговечность (ресурс до капитального ремонта);

3) гарантийные обязательства предприятия-изготовителя (гарантийный срок, гарантийная наработка);

г) параметры технологичности

1) периодичность технического обслуживания;

2) удельная оперативная трудоемкость технического обслуживания;

3) оперативная продолжительность замены силового агрегата;

д) параметры живучести

1) стойкость к воздействию поражающих факторов (уровень защиты от ОМП, уровень защиты от обычного оружия, стойкость при подрыве на мине);

2) защищенность экипажа при пожаре;

3) стойкость к воздействию окружающей среды;

4) скрытность;

5) обеспечение обитаемости;

е) параметры готовности;

ж) специальные требования войск.

Часть вышеперечисленных параметров ТТХ ВАТ:

– назначения (грузоподъемность, удельная грузоподъемность, допустимая масса буксируемого прицепа, коэффициент прицепной нагрузки);

– подвижности (максимальная скорость движения, средняя скорость движения по грунтовым дорогам, тип двигателя, мощность двигателя, удельная мощность ВАТ, дорожный просвет, глубина преодолеваемого брода);

– надежности (наработка на отказ, ресурс до капитального ремонта, гарантийный срок, гарантийная наработка);

– технологичности (периодичность технического обслуживания, удельная оперативная трудоемкость технического обслуживания, оперативная продолжительность замены силового агрегата) являются параметрами технического уровня, оставшаяся часть определяет специфические и специальные требования войск.

Требования видов (родов войск) ВС формируется исходя из места и роли ВАТ в системе вооружения и военной техники. Военная автомобильная техника является системообразующим компонентом системы вооружения ВС РФ. Ее характеристики в существенной степени определяют боевую эффективность подвижных комплексов ВВТ. Из четырех основных свойств комплексов ВВТ, таких как, огневая мощность, подвижность, живучесть и управляемость, ВАТ полностью определяет подвижность и в значительной степени живучесть. Последнее обусловлено тем, что около 70 % демаскирующих факторов подвижных комплексов ВВТ приходится на шасси. В результате, снижение заметности автомобильных базо-

вых шасси становятся ключевым элементом в общей системе снижения заметности средств подвижности вооружения.

Кроме этого, в условиях интенсивного развития средств разведки и поражения одним из наиболее эффективных способов обеспечения живучести становиться своевременный уход из под удара по сигналу предупреждения. Это требует от автомобильного базового шасси принципиально нового уровня технической готовности к использованию по назначению. Кроме этого, все большее количество образцов ВВТ используют силовую установку шасси для привода установленного вооружения и военной техники. В результате, силовая установка ВАТ вовлекается в процесс непосредственного использования ВВТ, а следовательно, оказывает существенное воздействие и на боевые возможности комплексов ВВТ.

Таким образом, ВАТ непосредственно определяет три из четырех основных свойств подвижных комплексов ВВТ. Исходя из проведенного анализа, в качестве основных свойств ВАТ следует выделить: подвижность, готовность, комплексную защищенность и надежность.

Библиографический список

1. Келлер, А.В. Принципы и методы распределения мощности между ведущими колесами автомобильных базовых шасси / А.В. Келлер, И.А. Муров. – Челябинск, 2009. – 218 с.

2. Буренок, В.М. Теория вооружения / В.М. Буренок, В.М. Ляпунов, В.И. Мудров. – М.: 46 ЦНИИ МО, 2002. – 234 с.

К содержанию

УДК 623.4.004.67

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ПОДВИЖНЫХ СРЕДСТВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА В ВООРУЖЁННЫХ СИЛАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Ф. Сорокин, А.М. Хуснутдинов, К.Н. Крикунов

Проанализированы современное состояние средств технического обслуживания и ремонта, предложена концепция создания подвижного пункта технической разведки.

Ключевые слова: средства технического обслуживания и ремонта, вооружение и военная техника, техническая разведка.

При образовании в 1991 году Вооружённых Сил Российской Федерации в соединениях, воинских частях и подразделениях существовала стройная система технического обслуживания и ремонта вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), опиравшаяся, в основном, на подвижныесредства технического обслуживания и ремонта (ПСТОР). Данная система и её техническая основа – ПСТОР, в основном сохранилась до настоящего времени.

Все ПСТОР условно можно разделить на три основные группы, предназначенные для выполнения определённой задачи технического обеспечения войск:

– эвакуационные средства: бронированные тягачи для эвакуации с поля боя, автомобильные и многоосные колёсные тягачи для эвакуации и транспортировки неисправных ВВСТ вне воздействия огня противника;

– средства для оказания помощи экипажам боевых машин (водителям автомобильной техники) при проведении номерных технических обслуживаний (ТО-1, ТО-2): машинытехническогообслуживания для различных видов ВВСТ;

– средства для выполнения различных видов ремонтных работ (слесарных, сварочных и т.д.): специализированные мастерские.

Многие образцы ПСТОР в звене батальон, полк, бригада способны выполнять не только задачи по прямому предназначению, но и обеспечивать несложный текущий ремонт ВВСТ. Так, например, бронированные ремонтно-эвакуационные машины (БРЭМ-1, БРЭМ-Л) предназначены не только для эвакуации ВВСТ из-под огня противника, но и своей крановой установкой обеспечивают подъём крупных агрегатов (двигатель, коробка передач, башня), сварочные работы, оснащены оборудованием, для демонтажа узлов и агрегатов ходовой части; машинытехническогообслуживания (МТО-80, МТО-АТ, МТО-УБ и др.) кроме того, оснащены несложным слесарным оборудованием для обеспечения текущего ремонта ВВСТ и способны выполнять работы по подзарядке аккумуляторных батарей.

Не касаясь количественной насыщенности войск ПСТОР, их номенклатура, с учётом повышения универсальности образцов, полностью обеспечивает выполнение задач технического обеспечения войск в звене батальон-воинская часть-соединение.

Но среди задач технического обеспечения войск, таких как техническое обслуживание, эвакуация,ремонт неисправных ВВСТ, совершенно не обеспечена специальными средствами техническая разведка.

Если рассматривать мотострелковый (танковый) батальон, то в настоящее время для организации пункта технического наблюдения батальона чаще всего используется БРЭМ из состава взвода обеспечения (взвода технического обслуживания) батальона. Данная бронированная машина, обладая достаточной защищённостью, оснащённая средствами связи и вооружённая пулемётом для самообороны полностью отвечает требованиям к подвижному наблюдательному пункту, но её предназначение в бою другое – эвакуация неисправных ВВСТ из-под огня противника в укрытие или в тыл. Выполнение основной задачи противоречит требованиям к ведению технической разведки. Выделение БМП (БТР) из состава бронегруппы мотострелкового батальона теоретически возможно, но ослабит резерв, предназначенный для ведения боя, выделение бронированной машины из состава танкового батальона вообще невоможно по причинеотсутствия «свободных» машин.

В условиях увеличения плотности средств поражения на современном поле боя давно назрела необходимость в принятии на вооружение специализированной бронированной машины для ведения технической разведки. Аналоги такой машины давно состоят на вооружении подразделений артиллерии и противовоздушной обороны: ПРП (подвижный разведывательный пункт, кстати, разработан в КБ ЧТЗ) и ППРУ (подвижный пунктразведки и управления).

Наиболее целесообразным представляется создание подвижного пункта техническойразведки на базе МТЛБ для подразделений на гусеничной технике, и на базе БТР для подразделений на БТР. Немотря на то, что использование базы БМП позволяет унифицировать номенклатуру ВВСТ подразделения, использование хорошо зарекомендовавшей себя базы МТЛБ, имеет ряд преимуществ. МТЛБ обладает прекрасной подвижностью и проходимостью, существенно лучшими, чем БМП, а её выносливость и неприхотливость в техническом обслуживании несравнимы ни с одним из современных образцов ВВСТ. МТЛБ обладает лучшей плавностью хода, чем БМП, что существенно влияет на условия наблюдения из машины. Более слабое, по сравнению с БМП, бронирование не имеет принципиального значения – машина не предназначена для ведения боя или прорыва вражеской обороны, она должна действовать позади боевых порядков, где плотность поражающих элементов существенно ниже. Компоновка с большим

транспортным отсеком позволит, в отличие от БМП, в экстренных случаях эвакуировать с поля боя раненых и поражённых. Кроме того, база МТЛБ экономически существенно дешевле, чем прочие образцы.

Машина должна быть оборудована средствами наблюдения, в том числе в условиях ограниченной видимости; двумя радиостанциями для работы в радиосетях батальона и системы управления техническим обеспечением старшего начальника; переносными средствами связи для работы вне машины. Необходимо вооружить машину пулемётом для самообороны и средствами постановки дымовах завес. В состав экипажа должны входить, кроме механика-водителя (водителя) разведчик, санинструктор со средствами оказания первой медицинской помощи. Старшим такого пункта технического наблюдения может быть назначен заместитель командира роты по вооружению одной из рот батальона.

Библиографический список

1. Сози, Д.А. Направления совершенствования технического обслуживания и ремонат военной автомобильной техники в современных условиях / Д.А. Сози // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 6. – С. 7–11.

2. Демчук, В.И. Совершенствования функционирования системы техничесокго обслуживания и ремонта военной техники как аспект национальной безопасности государства / В.И. Демчук // Проблемы безопасности российского общества. – 2012. – № 3. – С. 187–190.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. АША

УДК 669.187 + 669.141.243

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ В ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

С.А. Меденков

В работе рассмотрены современные условия эксплуатации мощных дуговых электропечей с точки зрения используемого сырья. Проанализировано влияние использования металлизированных окатышей на качество и себестоимость получаемой в электропечах стали, отмечены некоторые особенности проведения электроплавки с использованием в качестве шихты различного количества металлизированных окатышей, имеющих неодинаковое процентное содержание металлической составляющей. Отмечено значительное повышение качества выплавляемого металла, получаемого из металлизированных окатышей, и потенциальные возможности использования этого фактора в современных рыночных экономических отношениях.

Ключевые слова: дуговая электропечь, металлизированные окатыши, содержание углерода, перемешивание ванны, показатели качества металла.

Эффективная работа мощной дуговой сталеплавильной печи требует решения проблемы рациональной шихтовки плавки для быстрого и экономичного расплавления загруженной шихты. Особое значение имеют соотношение долей легко- и тяжеловесного лома в шихте, количество лома, чугуна, кокса и металлизированных окатышей, рациональная подготовка лома к плавке.

Для выплавки стали в дуговых печах в настоящее время используют следующие виды металлолома:

1) тяжеловесный лом, образующийся непосредственно на металлургических предприятиях (обрезь прокатных цехов, прежде всего обжимных и толстолистовых станов);

2) лом машиностроительных предприятий (обрезь при штамповке, стружка при механической обработке и т.д.);

3) легковесный амортизационный лом.

Наиболее качественным ломом является обрезь прокатных цехов металлургических предприятий. Такой лом имеет высокую насыпную плотность (> 1,5 т / м^3), практически не содержит примесей цветных металлов и неметаллических примесей, примерный состав его обычно известен. При разливке стали в изложницы доля прокатной обрези составляет 20–30 % от массы слитков. Недостаток такого лома заключается в длительном расплавлении.

Переход на непрерывную разливку стали в водоохлаждаемый кристаллизатор резко снижает количество прокатной обрези (до 5–10 %), поэтому с увеличением количества металла, разливаемого на МНЛЗ, доля высококачественного тяжеловесного лома, используемого в отечественном электросталеплавильном производстве, будет уменьшаться.

К сожалению, амортизационный лом имеет обычно небольшую насыпную плотность (0,8–1,0 т / м^3), сильно загрязнен всевозможными примесями (цветные металлы, пластмассы, резина, мусор), химический состав его, как правило, неизвестен.

Амортизационный лом отличается повышенным содержанием серы и меди. Для рационального использования требуется специальная подготовка такого лома, вследствие чего повышается его стоимость. Лом машиностроительных предприятий в значительной степени перерабатывается в литейных цехах этих предприятий, но часть его попадает и на металлургические заводы. Качество такого лома также невысоко: металлическая стружка загрязнена масляной эмульсией, химический состав лома, как правило, неизвестен. Для рационального использования в сверхмощных дуговых печах такого лома также требуется специальная подготовка лома (брикетирование стружки и т.д.).

Перерабатывают амортизационный лом методом фрагментации (измельчение лома в роторном дробителе молоткового типа с последующей магнитной сепарацией и сортировкой дробленого металла). Извлечение цветных металлов из дробленного лома дает возможность уменьшить загрязнение стали вредными примесями, особенно медью. Это имеет большое значение, так как за последние годы содержание меди в углеродистых сталях отечественного производства увеличилось более, чем вдвое (с 0,10–0,12 до 0,25–0,27 %) и значительно приблизилось к предельно допустимому (0,4 %).

Лом, подготовленный методом фрагментации, содержит намного меньше меди (< 0,25 %), очищен от неметаллических примесей, усреднен по составу и размерам (25–100 мм), имеет большую насыпную плотность (1,0–1,5 т/м^3) и более высокое качество.

Чугун традиционно применяется в электросталеплавильном производстве для повышения содержания углерода в шихте. Чугун можно считать высококачественным железосодержащим шихтовым материалом. Содержание серы и фосфора в нем сравнительно невелико, и практически не содержится примесей цветных металлов. В связи с высокой (по сравнению с ломом) стоимостью чугуна его использование в электросталеплавильном производстве значительно уменьшилось. В качестве науглероживателя шихты обычно используют кокс и другие дешевые углеродсодержащие материалы. В настоящее время чугун в электроплавке стали применяют обычно для разбавления некачественного лома (понижения содержания вредных примесей в расплаве) [1].

Металлизированное сырье является очень чистым, высококачественным материалом. Использование металлизированного сырья в электроплавке стали имеет следующие достоинства: химический состав металлизированного сырья точно известен, однороден, отсутствуют нежелательные примеси. Постепенно растет производство электростали на таком сырье, которое на практике показывает высокую эффективность использования окатышей.

Обычно металлизированные окатыши получают и используют диаметром 3–20 мм; реже – в виде брикетов с размерами, не превышающими 70 мм. Металлизированные окатыши обычно содержат 2–8 % пустой породы с основностью 0,3, остальное – железо (металлическое и в виде оксидов). Степень металлизации окатышей ($Fe/FeO_{общ}$), как правило, колеблется в пределах 0,90–0,97.

Металлизированное сырье практически не содержит цветных примесей и имеет довольно низкое содержание серы (0,005–0,025 %) и фосфора (0,011–0,035 %) [2].

В таблице 1 приведены данные о среднем содержании остаточных элементов в скрапе и металлизированном сырье на заводах США.

Таблица 1

Процентное содержание (по массе) остаточных элементов в различных видах железосодержащих материалов

Вид материала	Содержание, %		
	Cu	Sn	S
Металлизованное сырьё	0,005	0,002	0,010
Заводские отходы и пакеты	0,060	0,005	0,025
Покупные пакеты	0,120 – 0,480	0,016 – 0,060	0,040 – 0,100
Скрап: переработанный	0,210	0,027	0,040
фракционированный	0,050	0,020	0,030

Содержание углерода в металлизированном сырье может колебаться в широких пределах (0,2–2,0 %), оно определяется технологией процесса металлизации. Насыпная плотность металлизированных окатышей достаточно высока (1,2–1,5 т/м^3) и близка к насыпной плотности лома, специально подготовленного для мощных электропечей. Металлизированные окатыши обладают магнитными свойствами, это облегчает их транспортировку, перегрузку и подачу в печь.

Вследствие большой удельной поверхности металлизированное сырье имеет большую склонность к вторичному окислению при длительном хранении или перегрузках, особенно при повышенной влажности атмосферы, что значительно усложняет транспортировку и хранение такого сырья.

Ниже приведены показатели качества металлизированных окатышей, используемых в электросталеплавильном цехе ОЭМК:

Содержание железа, % (не менее):

– общего – 88;

– металлического – 79.

Содержание, % (не более):

– фосфора – 0,015;

– серы – 0,010;

– кремнезема – 0,5.

Количество окатышей диаметром до 3 мм не более 0,5 %.

Степень металлизации 90 %.

Содержание углерода в окатышах, %:

– 1-го класса – 0,9–1,7;

– 2-го класса – 1,71–2,3;

– 3-го класса – 2,3 [3].

Проведение плавки с применением металлизированного сырья имеет некоторые особенности.

С середины 60-х годов двадцатого века, когда были разработаны и реализованы новые эффективные способы прямого восстановления железа и основные идеи технологии электроплавки с непрерывной загрузкой металлизированных материалов, получила распространение выплавка электростали с использованием железа прямого восстановления.

Опыт показал, что мощная дуговая печь лучше других агрегатов подходит для передела металлизированного сырья в высококачественную сталь.

Использование металлизированных окатышей увеличивает производительность печи, при плавлении меньше шума, допускается расширение производства при минимальных капитальных затратах. Неоднородное (неравномерное) размещение лома в печи вызывает большие колебания мощности при плавлении, непрерывные изменения длины дуги. Увеличивается электрическое сопротивление печной установки, снижается эффективная мощность.

Плавление непрерывно загружаемого металлизированного сырья происходит при более устойчивом горении дуг, полезная мощность печи увеличивается (на 10–14 %). Акустический шум снижается на 10–15 дБ и обычно не превышает 89–92 дБ.

Железо прямого восстановления как шихтовый материал имеет ряд специфических особенностей, определяющих и особенности технологии электроплавки с его применением. Содержание оксидов железа в окаты-

шах составляет 3–12 %. Большое количество кислой пустой породы и оксидов железа в металлизированном сырье значительно повышает кратность шлака при выплавке стали в дуговой печи и приводит к увеличению расхода энергии на плавку. Но вместе с тем при высоком содержании оксидов железа в окатышах ускоряется их плавление. Это наряду с увеличением количества шлака улучшает службу футеровки стен электропечи.

Низкое содержание примесей в металлизированном сырье дает возможность использовать такое сырье при производстве стали в двух направлениях: получение металла очень высокого качества при большой доле металлизированного сырья в шихте или применение дешевого скрапа низкого качества в шихте для получения стали обычного качества, но при более низкой ее стоимости. В настоящее время используют оба направления.

Содержание серы в металле обычно составляет не более 0,010 %, а часто даже не более 0,006 %, что позволяет отказаться от десульфурации металла в ковше с использованием дорогих сплавов кальция, циркония и РЗМ [3].

Длительное интенсивное перемешивание ванны в результате ее кипения дает возможность получать к концу плавки с использованием металлизированного сырья сталь, практически чистую от неметаллических включений, содержащихся в ломе. Для получения высококачественного готового металла большое значение имеет выбор рациональной схемы окончательного рафинирования расплава: раскисления и внепечной обработки.

Раскисление металла обычно проводят в ковше во время выпуска, в качестве способов внепечной обработки используют продувку металла в ковше аргоном или вакуумную обработку в порционном вакууматоре. При использовании описанной схемы реальным результатом применяемых способов внепечного рафинирования является интенсивное перемешивание металла для выравнивания температуры и состава металла, регулирования температуры, удаления неметаллических включений.

В настоящее время стоимость металлизированного сырья в 2–2,5 раза выше стоимости подготовленного лома, поэтому металлизированное сырье в больших количествах экономически и технически целесообразно применять лишь тогда, когда необходимо существенное улучшение качества металла или требуется получение стали со специальными свойствами.

Тем не менее, и с экономической точки зрения рациональное применение металлизированного сырья возможно. В случае высокого качества металлизированного сырья, рациональной шихтовки плавок, применения рациональной технологии производительность мощной печи превышает производительность печей, работающих на ломе [2].

Влияние металлизированного сырья на качество и свойства стали проявляется по-разному. Прежде всего, применение металлизированного сырья приводит к улучшению пластических свойств, вследствие снижения содержания примесей цветных металлов, серы и фосфора в стали, обу-

словленного малым количеством этих примесей в металлизированных окатышах. Специфическая технология плавки при использовании металлизированных окатышей (длительное интенсивное кипение ванны под толстым слоем окисленного шлака сравнительно невысокой основности, имеющего малую газопроницаемость) и низкое содержание азота в окатышах позволяют получать сталь с очень низким содержанием газов, особенно азота. Имеются сведения об использовании металлизированного сырья специально для производства стали с низким содержанием азота. По данным исследовательской работы улучшение качества стали при использовании металлизированного сырья достигается благодаря низкому содержанию в ней серы, фосфора, азота и обычных сопутствующих (цветных) примесей.

В условиях отечественных заводов набольший экономический эффект от применения металлизированного сырья может быть получен в дуговых печах при выплавке высококачественных сталей с жесткими требованиями по содержанию неудаляемых примесей, серы и азота. Металлизированное сырье рационально применять для выплавки в электропечах следующих групп высококачественной электростали:

1) пружинно-рессорных сталей с повышенным пределом усталости, пониженной склонностью к хрупкому разрушению;

2) конструкционных сталей с гарантированной прокаливаемостью, размером зерна, низкой загрязненностью неметаллическими включениями, высокой пластичностью, пониженной склонностью к хрупкому и вязкому разрушению.

При работе на 100 % металлизированного сырья в шихте можно получать в готовой стали не более 0,001 % азота и добиваться получения низкого (0,01 %) содержания серы, что обеспечивает уменьшение размеров сульфидных строчек в готовой стали. Выпуск плавки из печи в ковш с остатками окислительного шлака обеспечит отсутствие сложных шлаковых глобулярных включений в металле. Рациональное раскисление металла, тщательное перемешивание продувкой аргоном и при порционной вакуумной обработке должны привести к уменьшению конечного содержания кислорода в металле и снижению размеров и количества оксидных строчечных включений. Внепечное вакуумирование приведет к снижению содержания водорода и уменьшению склонности к флокенообразованию. Разливка металла на МНЛЗ в водоохлаждаемый кристаллизатор резко уменьшит ликвацию серы и кислорода в металле, что также способствует получению стали с небольшими оксидными и сульфидными строчечными включениями.

Использование металлизированного сырья повышает характеристики готового металла: относительное удлинение, усталостную прочность, ударную вязкость, обрабатываемость, свариваемость, изотропию свойств, качество поверхности слитков и заготовок [1].

Все вышеперечисленное позволяет электрометаллургическим производствам, не имеющим своего стабильного качественного сырья, с большой долей уверенности определить свою стратегию, ориентированную на производство качественных сталей, в направлении вертикальной интеграции в части производства металлизированных окатышей.

Библиографический список

1. Поволоцкий, Д.Я. Электрометаллургия стали и ферросплавов: учебник для вузов / Д.Я. Поволоцкий, В.Е. Рощин, Н.В. Мальков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1995. – 592 с.

2. Борнацкий, И.И. Производство стали / И.И. Борнацкий, В.Ф. Михневич, С.А. Яргин. – М.: «Металлургия», 1991. – 400 с.

3. Рябов, А.В. Внепечная обработка стали: учебное пособие / А.В. Рябов, И.В. Чуманов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 43 с.

К содержанию

УДК 620.9

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

А.В. Мохова

В докладе проведен анализ современных экологически безопасных альтернативных источников энергии. Дана характеристика современного состояния развития наиболее перспективных возобновляемых источников энергии – ветровой, солнечной, геотермальной и водородной энергетики, биотоплива.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, ветровая энергетика, солнечная энергетика, геотермальная энергия, биотопливо, водородная энергетика.

В настоящее время ископаемое топливо является основным источником энергии в мире. Постоянное сжигание природных углеводородов приводит к ряду негативных последствий для окружающей среды. Кроме того, высокий уровень потребления нефти в мире служит основанием для высказываемого рядом ученых и специалистов предположения о неизбежности скорого истощения нефтяных запасов. Наиболее часто высказывается точка зрения об исчерпании мировых нефтяных запасов к концу XXI века. Поэтому использование энергии возобновляемых (альтернативных) источников (энергии Солнца, ветра, биомассы, геотермальной энергии, энергии морей и океанов) является приоритетным направлением развития

мировой энергетики. За время практического использования энергии возобновляемых источников ее объем ежегодно увеличивается.

Некоторые страны особенно интенсивно развивают ветроэнергетику. Запасы энергии ветра более чем в 100 раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. По данным European Wind Energy Association в 2011 году в Дании с помощью ветрогенераторов производилось 28 % всего электричества, в Португалии – 19 %, в Ирландии – 14 %, в Испании – 16 % и в Германии – 8 % [1]. Наиболее эффективно размещать ветровые электростанции на морских побережьях или на вершинах гор, как это осуществляется в Испании.

Наряду с ветровой энергетикой, актуальной областью остается солнечная энергия. Полное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность Земли, только за неделю превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и урана. Как полагают эксперты Международного энергетического агентства, солнечная энергетика уже через 40 лет при соответствующем уровне распространения передовых технологий будет вырабатывать 20–25 % всего необходимого электричества, и это обеспечит сокращение выбросов углекислого газа [2].

Простейшим примером использования энергии солнца является нагрев воды для бытовых нужд в специальных солнечных коллекторах. Этот метод широко используется в южных странах, таких как Израиль, Турция, Греция, Китай, где энергия солнца очень выгодна.

Энергия солнца может использоваться для генерации электроэнергии. Существует два основных способа преобразования солнечной энергии в электрическую:

– фотохимическое преобразование солнечного света на полупроводниковых солнечных батареях;

– концентрация солнечной энергии, получение тепловой энергии с последующей трансформацией в электрическую.

Основным материалом для изготовления современных фотоэлементов является кремний. Себестоимость производимых полупроводниковых солнечных батарей достаточно высокая из-за особенностей современной полупроводниковой технологии, требующей высоких температур и вакуума. Наиболее перспективными и наиболее дешевыми считаются фотоэлектрические панели на основе органических материалов [3].

Гелиоэнергетические программы организованы в настоящее время более чем в 70-и странах мира. Их реализация способствует сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу Земли, что приводит к снижению негативного воздействия мирового топливно-энергетического комплекса на окружающую среду.

Развивать солнечную энергетику целесообразно не только в жарких странах и в тех государствах, которые импортируют энергоресурсы. Как

показали последние исследования ученых, развитие солнечной энергетики в России экономически выгодно. Например, среднегодовое поступление энергии Солнца в Забайкалье выше, чем в Испании.

Универсальным возобновляемым источником энергии является биомасса – производная энергии Солнца в химической форме. Биомассу можно переработать в большое количество разных топлив, что позволяет применять ее для различных целей. Ее можно использовать для генерации тепла и электричества, сжигая в современных устройствах и на ТЭЦ. Из нее можно делать жидкие топлива, такие как этанол, для двигателей внутреннего сгорания. Энергетика, работающая на биомассе, может обеспечивать экономический рост без нанесения урона окружающей среде. Другим экологическим преимуществом биомассы является снижение выбросов серы и нитридов.

Среди источников энергии растительного происхождения можно выделить биоэтанол, биодизель и биогаз [4].

Биоэтанол – спиртосодержащий заменитель бензина, производимый из зерновых культур, сахарной свеклы и маиса, соевых бобов и сахарного тростника. С его использованием производят несколько видов бензина. К примеру, E5 состоит из 95 % бензина и 5 % биотоплива, а E85 – 17 % бензина и 83 % биотоплива. E100 состоит из этанола (96,5 %) и воды (3,5 %).

Биодизель добывают из масел семян рапса и пальмового масла. Существуют три категории дизельных смесей: B5, B7, B10, где число – процент содержания растительных масел.

Эти виды топлива относятся к так называемому «первому поколению биотоплива». Оно производится непосредственно из растений, поэтому считается возобновляемым ресурсом и, в некоторых регионах, – относительно дешевым и надежным источником энергии.

Биогаз – замена природного газа, получаемого из отходов животноводческих хозяйств и мусора, прошедших процесс разложение без кислорода с участием бактерий.

Биогаз и некоторые другие виды биотоплива относятся ко «второму поколению». Это синтетическое топливо, получаемое из биомассы, например из органических отходов жизнедеятельности, соломы или целлюлозы.

Биотопливо – это альтернативный источник энергии для транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания. Согласно современным исследованиям, использование биоэтанола позволяет снизить выбросы углекислого газа по сравнению с бензиновыми двигателями.

Значительный энергетический потенциал содержится в отходах животноводства, твердых бытовых отходах и отходах различных отраслей промышленности. Используют их с помощью термохимических и биохимических методов. В первом случае речь идет в основном о твердых бытовых

отходах, которые либо сжигают, либо газифицируют на мусороперерабатывающих фабриках. Во втором случае сырье – навоз или жидкие бытовые стоки – перерабатывают в биогаз, состоящий из 70 % метана и 30 % диоксида углерода.

Использование тепла, поступающего из недр Земли, также важный источник получения энергии. **Исландия** стала наиболее удачным примером использования геотермальной энергии. В настоящее время население страны получает энергию только из возобновляемых источников. Ископаемые виды топлива завозятся в страну только для нужд транспорта.

Запасы геотермальной энергии в России чрезвычайно велики. Особенно перспективно развитие геотермальной энергетики на Камчатке и Курильских островах [5].

Большинству возобновляемых источников присущ крупный недостаток – их энергия поступает непостоянно. Работающие на ней установки должны иметь либо аккумуляторы, либо установки-дублеры, работающие на традиционном топливе, или же электрическая сеть должна иметь достаточные емкость и маневренность. Чтобы компенсировать неритмичность работы энергия возобновляемых источников может запасаться в виде другого носителя энергии, например, в форме водорода.

В связи с этим прорабатывается концепция водородной энергетики [6], которая предполагает получение водорода с использованием возобновляемых источников (солнечных, ветровых, геотермальных и т.д.), его хранение, транспортировку и эффективное использование в энергетике. Водородная энергетика может быть ориентирована на использование водорода в качестве универсального топлива для транспортных энергетических установок [7], которые являются основными потребителями ископаемого топлива и загрязнителями окружающей среды (на долю транспорта приходится до 90 % атмосферных загрязнений в мегаполисах). Огромные транснациональные компании мирового автопрома (Toyota (Япония) ,General Motors (США), Volkswagen (Германия), Hyundai Motor (Южная Корея), Ford (США)) имеют разработки по внедрению водородных автомобилей в серийное производство. В таких городах как Лондон, Амстердам, Барселона, Мадрид уже 20 лет проходят показательные испытания городских автобусов на водородном топливе. Показательна динамика роста водородных заправочных станций – 35 станций в 2013 году, свыше 1000 – в 2012 году.

Основные преимущества водорода – экологическая безопасность и высокая энергетическая отдача. При горении водорода образуется только вода, а теплота его сгорания примерно в 5 раз выше, чем у углеводородов. Чтобы использовать водород в качестве топлива, надо сначала извлечь его, то есть решить задачи эффективного производства, методов хранения и транспортировки, высокоэкономичного использования водорода для получения тепла, электрической и механической энергии.

Сейчас водород получают, главным образом, из природного газа методом каталитической конверсии с водяным паром. Пока это самый дешевый способ. Неиссякаемым источником водорода может служить вода. Электролиз воды технически осуществить довольно просто, но этот процесс требует значительных энергозатрат. Технология будет экономически выгодной только в том случае, если использовать дешевую электроэнергию, получаемую желательно из возобновляемых источников, – за счет энергии воды, ветра, солнца.

В последнее время появился интерес к технологиям получения водорода из биомассы, остающейся после переработки сельскохозяйственного сырья. Здесь есть несколько возможностей: конверсия спресованной биомассы, ферментация либо использование бактерий, способных продуцировать водород.

Хранение водорода можно осуществлять в баллонах, в сжатом виде. Его можно хранить и транспортировать в теплоизолированных сосудах-криостатах. Уже испытаны криогенные баки для автомобилей с экранно-вакуумной изоляцией. Но наиболее перспективны способы хранения водорода с помощью твердых носителей, например в виде гидридов металлов. Например, кусок палладия определенного объема способен поглотить до 800 таких же объемов водорода. Особый интерес представляют интерметаллические сплавы титана, железа, магния, никеля, лантана, ванадия.

Главный недостаток металлогидридов в том, что накопители водорода на их основе слишком много весят. Для хранения водорода можно использовать и более легкие вещества – например, углеродные нанотрубки и стеклянные микросферы.

Основное условие перехода к водородной энергетике – создание надежных и экономически выгодных топливных элементов на основе водорода. В таком элементе химическая энергия, высвобождающаяся в реакции водорода с кислородом, превращается непосредственно в электрическую. Коэффициент полезного действия топливного элемента может достигать 90 % [8].

Широкий диапазон возможностей применения водорода делает его практически универсальным энергоносителем, ориентируясь на который можно постепенно перестроить экономику. Исландия, например, декларирует переход в ближайшие 20–30 лет именно на водородную энергетику.

Использование возобновляемых источников энергии поддерживается всеми европейскими странами. В каждом регионе необходимо искать свои нетрадиционные источники энергии. При этом органические и альтернативные энергоресурсы должны взаимно дополнять друг друга для создания гармоничной структуры энергопроизводства.

Библиографический список

1. Энергия ветра: статистика европейских стран за 2011 год. – URL: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_2011_European_statistics.pdf.

2. Гвоздкова, И.А. Солнечная энергетика: подрастающий игрок / И.А. Гвоздкова, Д.Ю. Паращук // Химия и жизнь. – 2007. – № 3. – С. 6–9.

3. Алферов, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 8. – С. 937–947.

4. Биотопливо. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/.

5. Шейндлин, А.Е. Размышления о некоторых проблемах энергетики / А.Е. Шейндлин // Наука и жизнь. – 2004. – № 4. – URL: http://www/nkj/ru/archive/articles/1971.

6. Козлов, С.И. Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / С.И. Козлов, В.Н. Фатеев; под ред. Е.П. Велихова. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – 520 с.

7. Янченко, В.С. Перспективы применения электрохимических генераторов на основе топливных элементов в строительной и коммунальной мобильной технике / В.С. Янченко, С.А. Григорьев, Ю.И. Фокин // Транспорт на альтернативном топливе. – 2010. – № 4 (16). – С. 71–73.

К содержанию

УДК 621.771.01

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТОЛСТЫХ ПОЛОС В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВАЛКАХ

Е.Е. Чванова, Е.А. Шкуратов

Одним из видов несимметрии при прокатке полос и листов является задача полосы под углом. В ряде случаев это делается специально, а в ряде случаев является результатом неправильной настройки. Влияние угла задачи полосы на технологические параметры процесса прокатки изучены недостаточно. В связи с этим проведено экспериментальное исследование и получены зависимости распределения обжатий по высоте полосы и энергосиловых параметров процесса от величины угла задачи полосы в валки. В процессе прокатки толстых полос применяется обжатие кромок в вертикальных валках. В этом случае пластическая деформация проникает не на всю глубину очага деформации и применение известных зависимостей для расчета энергосиловых параметров становится невозможным. Поэтому разработана методика определения технологических параметров процесса прокатки в вертикальных валках, основана на методе линий скольжения.

Ключевые слова: прокатка, несимметрия, валки, деформация, обжатие, методика, линии скольжения.

При производстве толстой горячекатаной полосы применяют различные схемы расположения основного и вспомогательного оборудования. Современные толстолистовые станы содержат в своем составе, как правило, клети с вертикальными и горизонтальными валками. Прокатка в вертикальных валках обеспечивает тщательную проработку кромки полосы, снижает расходный коэффициент металла, увеличивает выход годного. Прокатка в горизонтальных валках может осуществляться с задачей полосы под углом. Это происходит либо из-за неправильной настройки оси стана, либо в результате работы луперов в межклетевых промежутках непрерывных станов.

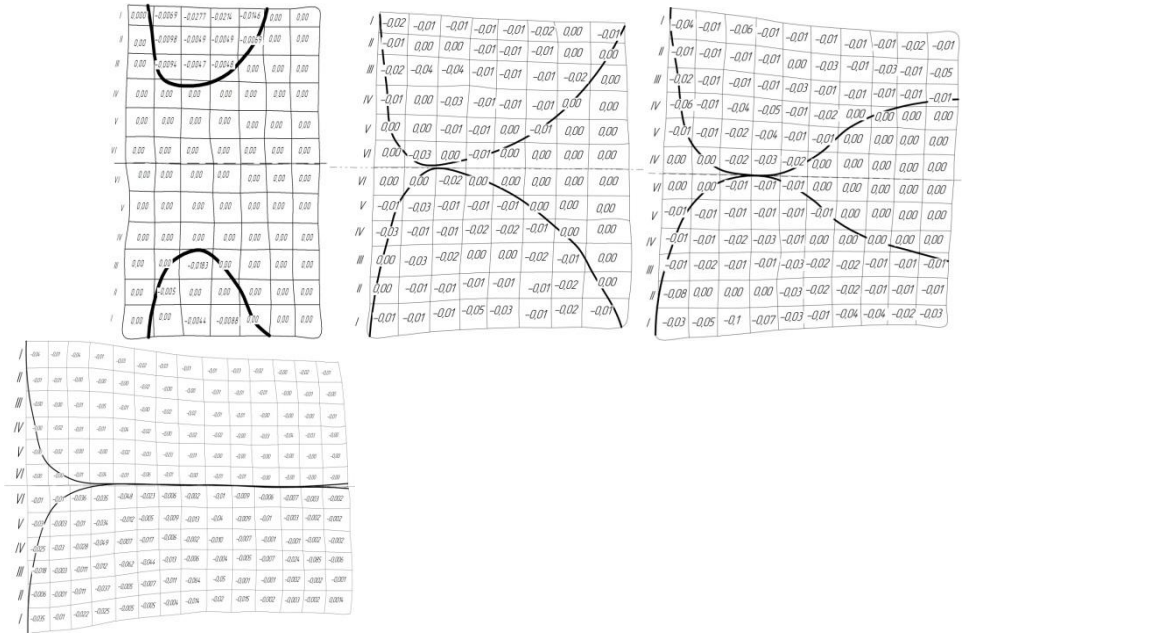
Характер распространения пластической деформации у обоих процессов различен и до сих пор не до конца изучен. Особый интерес при этом представляет влияние имеющихся особенностей на усилие прокатки.

Большинство из существующих в настоящее время зависимостей для определения усилия прокатки выведены из предположения о том, что пластическая деформация проникает на всю глубину деформируемой полосы в геометрическом очаге деформации. В то же время при прокатке с малыми обжатиями (обжатие кромок полосы при производстве толстых листов) это условие не соблюдается.

Наиболее подходящим методом определения усилия, в данном случае, является метод линий скольжения [1]. Данный метод применяется для решения плоских и осесимметричных задач течения идеально-пластичной среды. Однако он имеет свои недостатки, один из которых заключается в неоднозначности построения сетки линий скольжения. Поэтому для построения достоверной математической модели процесса прокатки полосы с малыми обжатиями проведено экспериментальное исследование по определению фактической формы очага деформации.

Для изучения характера пластической деформации в эксперименте использовались свинцовые заготовки с нанесенной на боковую поверхность координатной сеткой. Ограничились сеткой с квадратной ячейкой размером стороны два миллиметра. Прокатку образцов осуществляли с обжатиями 2 %, 5 %, 10 %, 16 %, с двойной кратностью повторения опытов. При этом также фиксировали усилие прокатки.

С целью повышения точности результатов координатная сетка, полученная на недокатах, сканировалась и затем обрабатывалась на компьютере с использованием приложения КОМПАС-3D. В итоге были определены, для разных обжатий, фактические границы очага деформации, представленные на рисунке 1. По результатам эксперимента также получена зависимость глубины проникновения пластической деформации от степени обжатия (рис. 2).



а б в г

Рис. 1. Форма очага деформации при прокатке полосы:
а – при обжатии 2 %; б – при обжатии 5 %; в – при обжатии 10 %;
г – при обжатии 16 %.

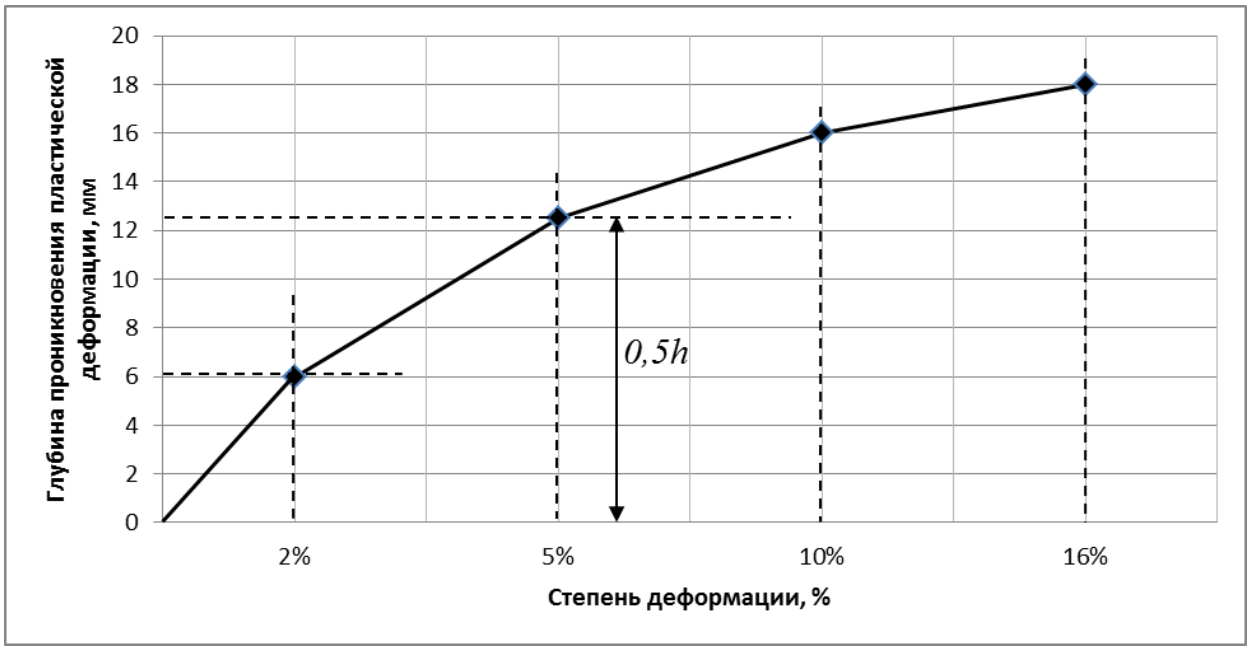


Рис. 2. Зависимость глубины проникновения пластической деформации от обжатия

Из рисунков 1,2 следует, что пластическая деформация не проникает на всю глубину при обжатии до 5 %, а при обжатии от 5 % до 16 % пластическая деформация проникает на всю глубину частично.

В общем случае при не полном проникновении пластической деформации на всю глубину геометрического очага деформации, сетку линий скольжения можно представить так, как показано на рисунке 3. Выполненные экспериментальные исследования позволили конкретизировать форму сетки линий скольжения для случая процесса прокатки с обжатиями до 5 %.

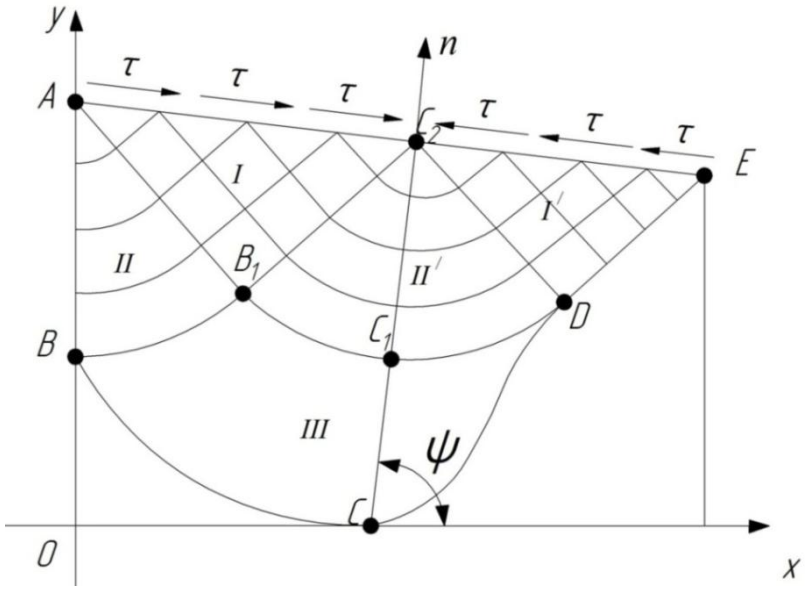


Рис. 3. Сетка линий скольжения

При построении сетки линий скольжения учитываются граничные условия на линии АЕ [2]:

$$\varphi = \psi \pm \frac{1}{2} \cdot \arccos \frac{f_\tau}{\tau_s} + m\pi;$$
$$\sigma = f_n + \tau_s \cdot \sin 2(\varphi - \psi); \quad (1)$$

где φ – угол между касательной к линии скольжения и осью Ох;

Ψ – угол между нормалью к рассматриваемой границе и осью Ох;

f_τ – касательное напряжение на рассматриваемой границе;

f_n – нормальное напряжение на рассматриваемой границе;

τ_s – сопротивление деформируемого металла пластической деформации сдвига.

В соответствии с конфигурацией сетки линий скольжения, представленной на рисунке 3, для области I-I решается смешанная задача, для области II-II вырожденная задача Римана, для области III задача Римана.

Совместное решение указанных выше стандартных задач с учетом граничных условий позволили получить формулу для определения усилия прокатки с малыми обжатиями, которая имеет вид:

$$P = \left[\left(-0{,}58\sigma_s \left[\sin(-\frac{1}{2} \cdot \arccos \mu - \alpha_k) + \left(1 + \frac{\pi}{2} - arctg\left(\frac{\Delta h}{2l_{o.\partial}} \right) - \arccos \mu \right) \right] \right)^2 + (0{,}58\sigma_s \mu)^2 \right]^{0,5} \quad (2)$$

Сравнивая результаты расчета по полученной формуле с экспериментальными данными (рисунок 4), можно сделать вывод, что погрешность расчета при степенях деформации от 2 % до 5 % не превышает 7 %. При более высоких степенях деформации погрешность увеличивается, так как в этом случае сетка линий скольжения должна иметь другую конфигурацию. Тем не менее полученная формула позволяет определить усилие при обжатии кромок полосы с высокой достоверностью.

При прокатке в горизонтальных валках, задача металла в валки как было отмечено выше, может осуществляться при отклонении симметрии относительно линии прокатки. В настоящее время известно достаточно много работ [5, 6, 7 и др.], посвященных теоретическому анализу процесса несимметричной прокатки.

Отличительная особенность процесса несимметричной прокатки обусловлена тем, что схемы действия сил на прокатываемую полосу, условия на контакте и скоростные условия в зонах обжатия, относящихся к каждому валку, будут различны. Следует отметить, что наряду с перечисленными выше причинами задачи полосы под углом, в настоящее время ещё функционируют прокатные станы где имеет место технологически целенаправленная задача полосы под определенным углом. Такой

способ применяется, в частности, на станах трио Лаута и на других станах, оборудованных подъемно-качающимися столами.

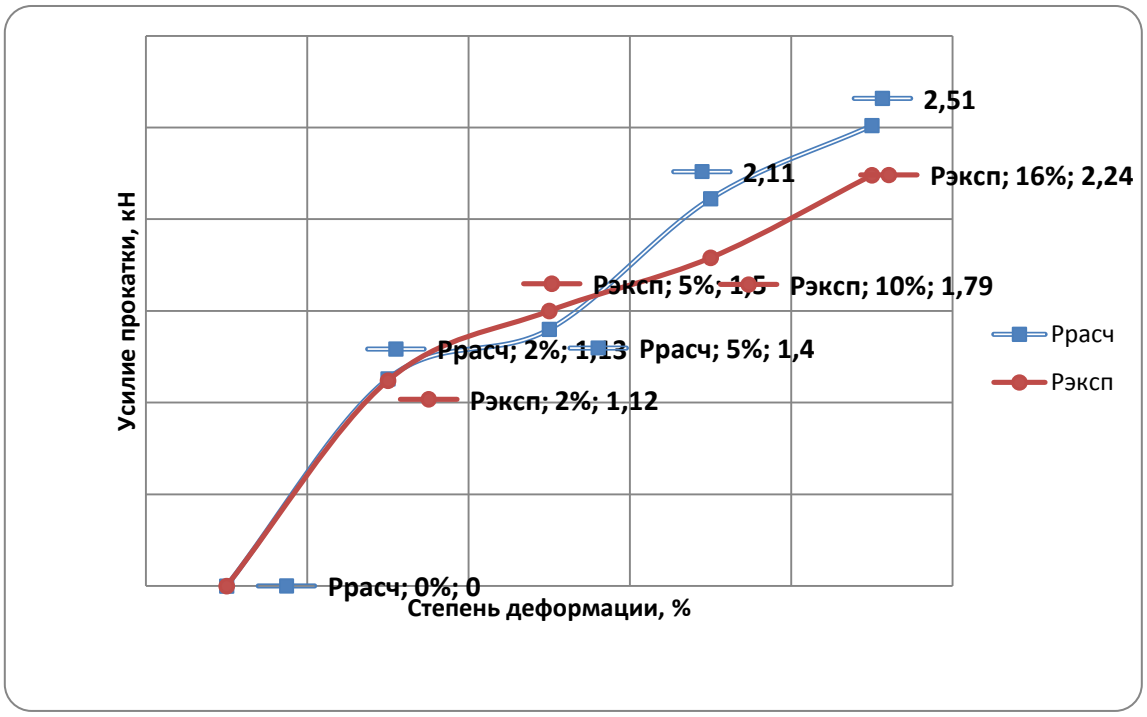


Рис. 4. Расчетное и экспериментальное значение усилия прокатки

В работах [8, 9, 10] авторы обращают внимание на прокатку в валках неравного диаметра с задачей полосы под углом, но делают лишь теоретические выводы, не приводя каких-либо закономерностей. Поскольку влияние угла задачи полосы на технологические параметры процесса прокатки изучены недостаточно, был проведен эксперимент, который позволил установить закономерности изменения деформированного состояния и энергосиловых параметров при прокатке с задачей полосы под углом.

Для изучения характера пластической деформации в эксперименте использовались свинцовые заготовки с нанесенной на боковую поверхность координатной сеткой. Размер ячеек наносимой сетки, кратность повторения опытов, а также фиксируемые параметры процесса были такими же, как и в эксперименте в вертикальных валках, описанном выше.

Для задачи заготовки в валки было изготовлено специальное устройство, позволяющее менять угол задачи. Образцы под прокатку были разделены на 3 группы, каждый образец из группы задавался в валки под определенным углом к горизонту (0°, 15°, 30°).

В ходе проведённых расчетов определен характер распределения деформации при прокатке под разными углами и получены закономерности, представленные на графиках (рисунки 5, 6).

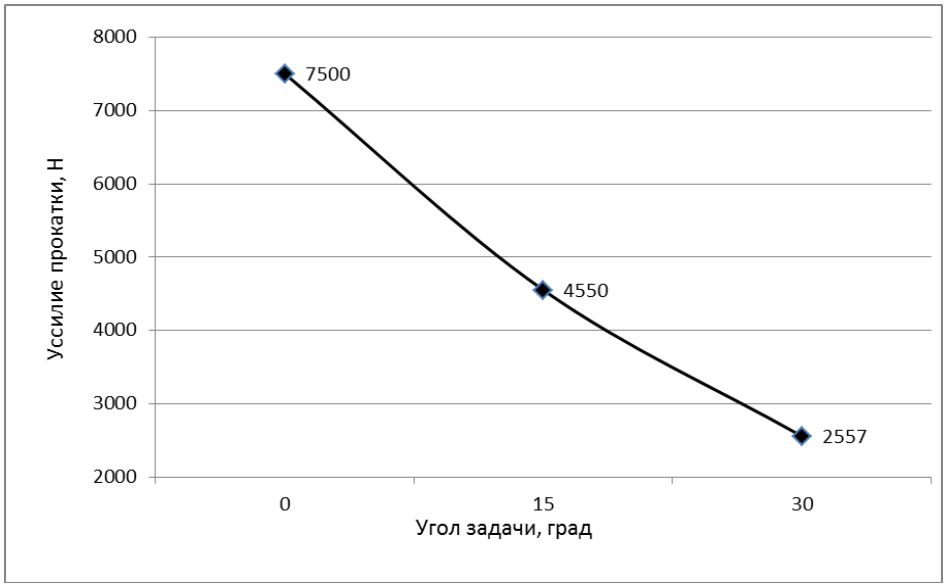


Рис. 5. Влияние угла задачи на усилие прокатки

Из рисунка 5 видно, что угол задачи полосы в валки существенно снижает величину усилия прокатки.

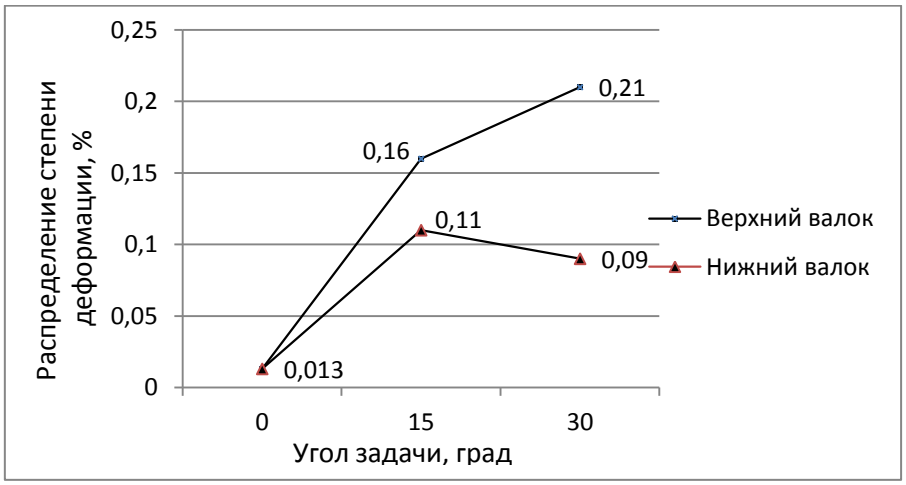


Рис. 6. Распределение степени деформации
в зависимости от угла задачи полосы в валки

С другой стороны, как видно из рисунка 6, с увеличением угла задачи увеличивается разница в обжатии со стороны верхнего и нижнего валков. Особенно интенсивно это разница начинает проявляться при углах задачи 15º и выше. В свою очередь, разница в обжатиях, как известно влечет за собой изгиб полосы. Поэтому использовать задачу полосы под углом с целью уменьшения усилия прокатки целесообразно только в первых проходах, когда сохраняется возможность выпрямления полосы к концу прокатки.

Выводы

1. Экспериментальные исследования процесса прокатки высокой полосы с малыми обжатиями показали, что при степенях обжатия менее 5 %, пластическая деформация не проникает на всю глубину полосы для очагов деформации с критериями подобия $h_0/R=0{,}14$; $B/h_0=0{,}5$; $\Delta h/R=0{,}003\ldots0{,}02$.

2. Погрешность расчетов по математической модели, построенной на основе метода линий скольжения, не превышает 7 %;

3. Выявлено, что с увеличением угла задачи в горизонтальные валки существенно снижается усилие прокатки;

4. Определено распределение обжатия со стороны верхнего и нижнего валков при задачи металла под разными углами к горизонту;

5. Полученные данные могут быть использованы при проектировании технологии и оборудования для деформации толстого листа в вертикальных и горизонтальных валках в линии станов горячей прокатки.

Библиографический список:

1. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

2. Выдрин, А.В. Алгоритмы решения задач механики сплошных сред методом линий скольжения. Учебное пособие для самостоятельной работы студентов / А.В. Выдрин – Челябинск: ЮУрГУ, 2002. – 24 с.

3. Грудев, А.П. Теория прокатки. Учебник для вузов / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

4. Выдрин, А.В. Исследование процесса прокатки высокой полосы с малыми обжатиями / А.В. Выдрин, Е.А. Шкуратов // Вестник ЮУрГУ. – 2013. – С. 46–53.

5. Выдрин, А.В. Усилие при существенно несимметричной прокатке листов / А.В. Выдрин, Е.Е. Чванова // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – С. 51–54.

6. Синицын, В.Г. Несимметричная прокатка листов и лент / В.Г. Синицын. – М.: Металлургия, 1984. – 166 с.

7. Грудев, А.П. Теория прокатки / А.П. Грудев. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.

8. Кузема, И.Д. Скольжение и опережение при прокатке на стане трио Лаута / И.Д. Кузема // Материалы по теории прокатки, ч.VI. – М.: Металлургиздат, 1960. – С. 30–36.

9. Кузема, И.Д. Условия захвата в станах трио Лаута / И.Д. Кузема // Материалы по теории прокатки, ч. V. – М.: Металлургиздат, 1960. – С. 23–35.

10. Чекмарев, А.П. Изгиб полосы при прокатке в валках неравного диаметра / А.П. Чекмарев, А.А. Нефедов // Материалы по теории прокатки, ч. V. – М.: Металлургиздат, 1960. – С. 356–363.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. ЗЛАТОУСТ

УДК 621.833.001.2

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

В.В. Бружас, Б.А. Лопатин

По результатам проведенных исследований в трех программах КОМПАС-3D, SolidWorks, Autodesk Inventor, рассчитаны напряжения изгиба зубьев цилиндрического зубчатого колеса, установлены отклонения между полученными результатами в программах и по теоретическим формулам. В системе Autodesk Inventor произведена оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрической зубчатой передачи.

Ключевые слова: зубчатое колесо; напряженно-деформированное состояние; напряжение изгиба; CAD система.

Напряженно-деформированное состояние - совокупность внутренних напряжений и деформаций, возникающих при действии на неё внешних нагрузок, температурных полей и других факторов. Напряженно-деформированное состояние определяется расчётными и экспериментальными методами в виде распределения напряжений, деформаций и перемещений в конструкции и является основанием для оценки статической прочности и ресурса конструкций на всех этапах жизненного цикла [1].

Проблема исследования напряженно-деформированного состояния зубчатых передач со сложной геометрической формой рабочих поверхностей зубьев заключается в отсутствии для них расчетных методов. К таким передачам, например, можно отнести цилиндро-конические передачи внутреннего зацепления, в которых рабочая поверхность зубьев конической шестерни неэвольвентная. Такие передачи нашли применение в планетарных редукторах приводов специального назначения [2]. Оценивать напряженно-деформированное состояние таких передач целесообразно с помощью метода конечных элементов. В настоящее время для моделирования напряженно-деформированного состояния распространение получили следующие CAD системы: КОМПАС-3D, SolidWorks, Autodesk Inventor. Критерии для выбора CAD системы: точность расчета, доступность, простота использования. Проведем на примере прямозубого цилиндрического зубчатого колеса, сравнение результатов полученных в CAD системах и расчетным методом. Для этой задачи выберем прямозубое цилиндрическое колесо со следующими параметрами: z_1=30; m=5; b=30; x=0. Рассчитаем напряжения изгиба расчетным методом и с использованием данных CAD систем и сведем полученные результаты в таблицу. Расчетная схема нагружения зуба приведена на рис. 1.

Посчитаем расчетным методом изгибные напряжения [3]:

$$\sigma_F = Y_F \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \cdot K_F \qquad (1)$$

где F_t – окружная сила, H (принимаем при расчете равной 1700H);

b и m – ширина и модуль зубчатого колеса или шестерни, мм;

Y_F – коэффициент формы зуба – величина безразмерная, зависящая от числа зубьев и коэффициента смещения x (Y_F=4 стр.45 [3]);

K_F – коэффициент нагрузки при расчете на изгиб. (при расчете одного зуба принимается равным 1). Тогда()()на изгиб:

$$\sigma_F = 4{,}0 \cdot \frac{1700}{5 \cdot 30} \cdot 1 = 45{,}33 \text{ МПа}$$

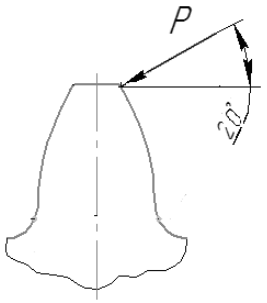


Рис. 1. Расчетная схема

Произведем оценку напряжений изгиба в CAD системах. Сформируем твердотельные модели зубчатых колес и с помощью функции прочностного анализа встроенного в данные системы и оценим напряжение изгиба зуба. Для формирования профиля зуба используется программа «Эмуляция нарезания зубчатых колес», разработанная на кафедре технической механики. Данная программа является сторонним приложением для AutoCAD. В программе задаются параметры нарезаемого колеса и параметры режущего инструмента представленные в табл. 1. Программа формирует профиль зубчатого колеса, схема которого показана на рис. 2. Импортировав профиль зубчатого колеса в каждую из CAD систем, сформируем твердотельную модель колеса.

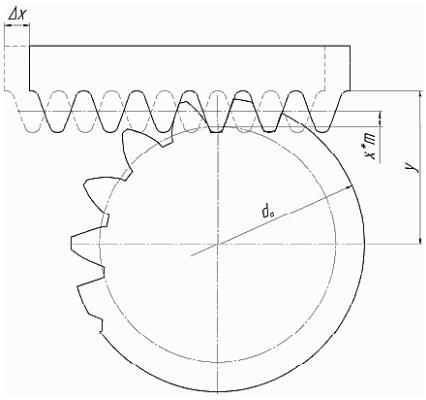


Рис. 2. Схема формирования профиля зубьев

Таблица 1

Параметры нарезаемого колеса и параметры режущего инструмента

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Параметры нарезаемого зубчатого колеса		
Число зубьев зубчатого колеса	z	30
Диаметр вершин зубьев зубчатого колеса	d_a	160
Коэффициент смещение инструмента	x	0
Параметры режущего инструмента		
Модуль зубчатого колеса	m	5
Коэффициент вершины высоты зуба в долях модуля	h_a^*	1
Коэффициент высоты зуба в долях модуля	h_1^*	2
Коэффициент радиального зазора в долях модуля	c^*	0,25
Угол зацепления	α^o	20
Радиус скругления в долях модуля	ρ^*	0,38
Толщина зуба по делительной прямой в долях модуля	s^*	1,5708

Получив твердотельную модель зубчатого колеса, был проведен анализ напряженно-деформированного состояния. Результаты, выполненные в CAD системах, показаны на рисунке (рис. 3–5).

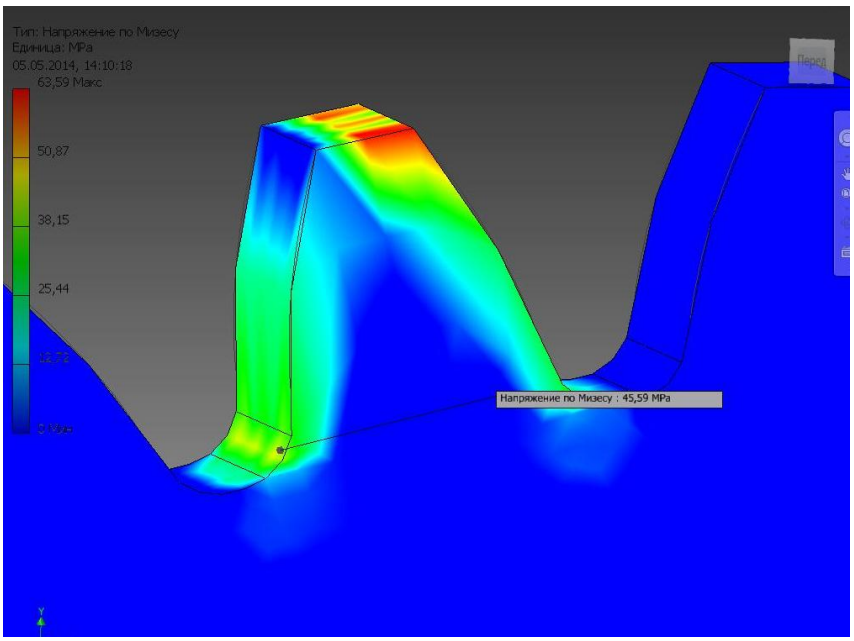


Рис. 3. Напряжения изгиба в Autodesk Inventor

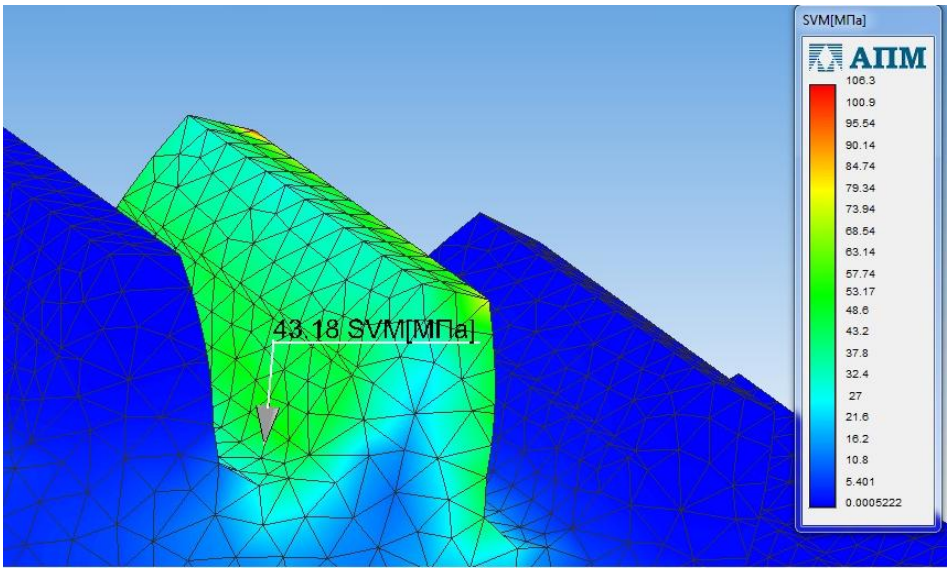


Рис. 4. Напряжения изгиба в КОМПАС-3D

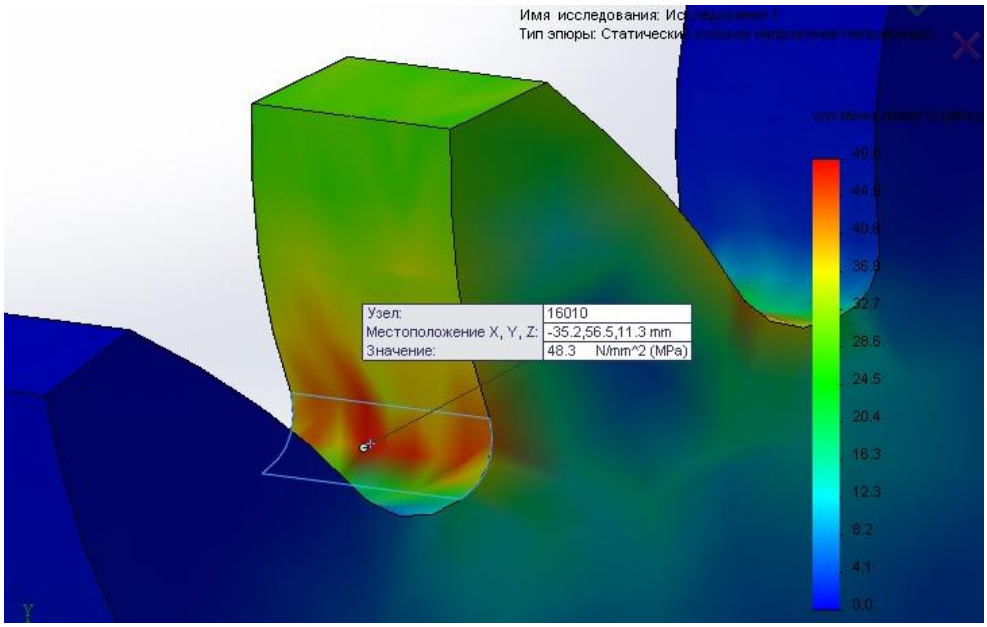


Рис. 5. Напряжения изгиба в SolidWorks

Сведем полученные результаты в таблицу (табл. 2.) и посчитаем отклонения вычислений между расчетным методом и CAD системами.

Таблица 2

Результаты расчета изгибных напряжений

Расчетным методом в МПа	Autodesk Inventor, МПа	Отклонения Inventor, %	Компас-3D, МПа	Отклонения Компас-3D, %	SolidWorks, МПа	Отклонения SolidWorks, %
45,33	45,59	1	43,18	4,8	48,3	6,5

Анализ результатов показывает, наименьшие отклонения обладает CAD система Autodesk Inventor.

Используя Autodesk Inventor, оценим напряженно-деформированное состояние цилиндрической зубчатой передачи в зоне однопарного зацепления. Передача составлена из двух одинаковых колес с параметрами указанными в таблице 1, использованными ранее. К одному из колес приложим момент равный $240\,H\cdot м$, второе колесо остается неподвижным, результаты напряженно-деформированного состояния показаны на рис. 7.

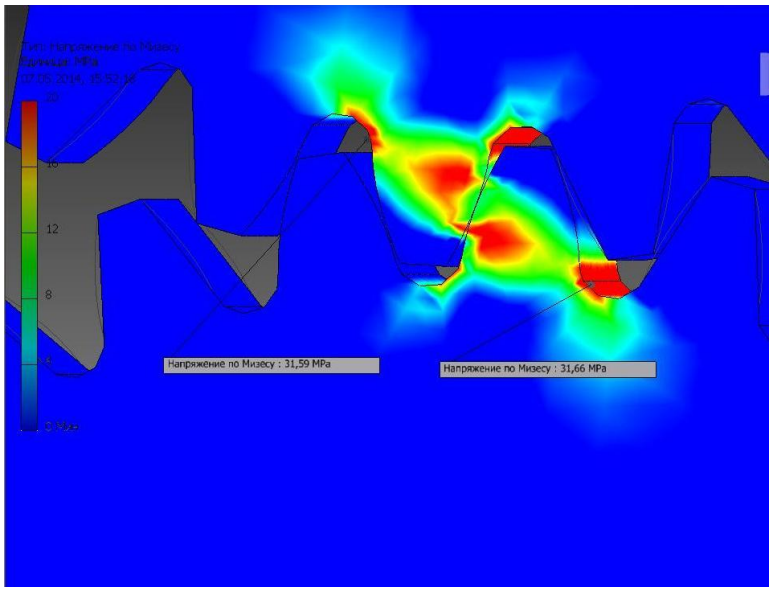


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние зубьев в зубчатой передачи

Рассмотрим эту же задачу на примере одного колеса, сила прикладывается к зоне однопарного зацепления, величина силы составляет $1700H$, что соответствует ранее прикладываемому моменту, результаты нагружения показаны на рис. 8.

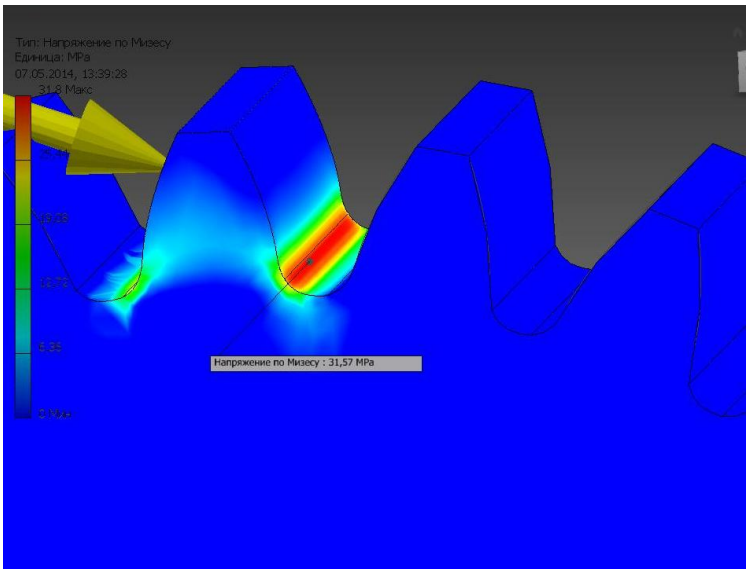


Рис. 8. Напряженно-деформированное состояние зуба колеса

Анализ нагруженности показывает, что результаты идентичны.

В дальнейшем данный подход будет использоваться для оценки напряженно-деформированного состояния передач сложной геометрии рабочих поверхностей [4].

Библиографический список

1. Свищев, Г.П. Авиация: Энциклопедия/ под ред. Г.П. Свищева. – М.: БРЭ, 1994. - 736 с.

2. Лопатин, Б.А. Цилиндро-конические зубчатые передачи: монография / Б.А. Лопатин, О.Н. Цуканов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 200 с.

3. Андреев, В.И. Детали машин и основы конструирования. Курсовое проектирование: Учебное пособие / В.И. Андреев, И.В. Павлова. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 352 с.

4. Плотникова, С.В. Разработка твёрдотельных моделей зубчатых колёс различной геометрии / С.В. Плотникова, И.В. Мурзина. – Статья в настоящем сборнике.

К содержанию

УДК 621.951.2/.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ РУЖЕЙНЫМИ СВЕРЛАМИ

И.П. Дерябин, И.Н. Миронова

Проведенные исследования точности обработки отверстий ружейными сверлами показали влияние на погрешность размера и формы отверстий различных сочетаний подачи и зазора между кондукторной втулкой и ружейным сверлом. Экспериментальные исследования проводились в производственных условиях на серийно выпускаемых деталях. Показан сравнительный анализ вычислительного и натурного экспериментов.

Ключевые слова: ружейные сверла, точность обработки отверстий, вычислительный эксперимент.

Детали с глубокими отверстиями обрабатываются на предприятиях всех отраслей промышленности, а именно: в машиностроении, энергетике, металлургии и т.д. Кроме того, обработка точных глубоких отверстий относится к трудоемким и сложным процессам. Наиболее эффективным и экономически выгодным для таких операций является применение инструмента одностороннего резания (ИОР), что дает возможность обеспечить точность поверхности отверстия по 7–10 квалитету, шероховатость Ra1,25.

Были проведены экспериментальные исследования точности обработки отверстий ружейными сверлами, целями которых являются:

– исследования влияния на точность обработки подачи и величины зазора между кондукторной втулкой и инструментом [1];

– сравнение результатов, полученных в ходе вычислительных и натурных экспериментов;

– качественное сравнение профилей поперечного и продольного сечений, полученных в ходе вычислительного и натурного экспериментов.

Обработка партии деталей проводилась на токарно-револьверном станке модели 1341, специально переоборудованном для ружейного сверления. Модернизация станка заключалась в установке станции подвода СОЖ под давлением, редуктора для уменьшения величин подач, специального устройства для направления инструмента одностороннего резания.

В качестве режущего инструмента применялись ружейные сверла $Ø8{,}81_{-0{,}01}$. Рабочая часть сверла выполнена в виде монолитной головки из твердого сплава ВК8.

Была обработана деталь «Втулка плунжерная» (рис. 1). Заготовка закреплялась в трехкулачковый патрон, на неё для направления инструмента устанавливалась кондукторная втулка. В ходе эксперимента изменялись следующие параметры:

– подача S, мм/об;

– диаметр кондукторной втулки D, мм, влияющий на зазор между кондукторной втулкой и инструментом $\Delta_{вт}$.

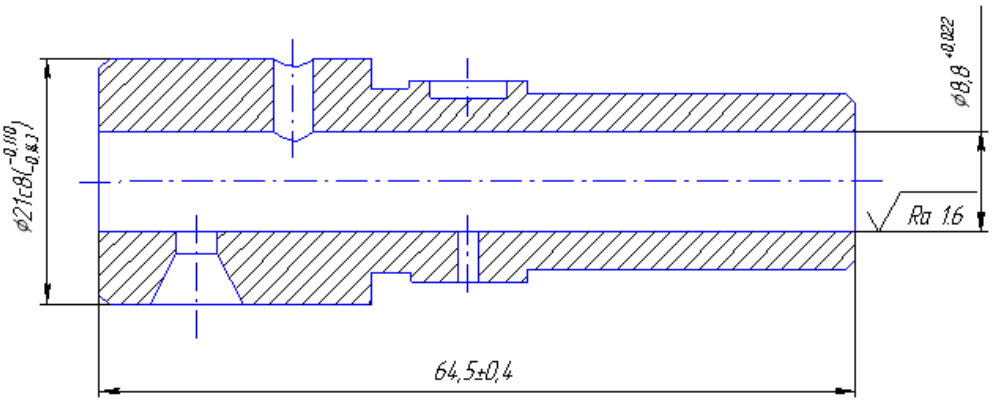


Рис. 1. Деталь «Втулка плунжерная»

Измерения точности полученных отверстий проводились на координатно-измерительной машине (КИМ) «Global aktiv» фирмы «Bown&sharpe» следующим образом: контролируемая деталь устанавливалась на измерительной плите в призму вертикально, торцом, со стороны которого проводилась обработка детали, вверх. На рис. 2 показана схема измерения.

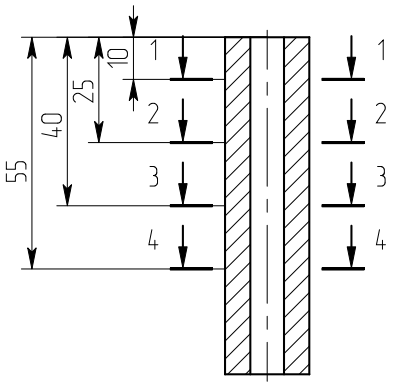


Рис. 2. Схема измерения на КИМ

Сканирование отверстия производилось по схеме, представленной на рис. 3, с шагом 0,1 мм. По полученным точкам КИМ строит окружность методом наименьших квадратов, которую принимает за номинальную окружность. Относительно этой окружности в виде векторов показываются отклонения, полученные при сканировании.

В зависимости от величины отклонения профиля отверстия вводится масштабный коэффициент, для того чтобы на круглограмме была видна величина отклонения. Соответственно длина вектора на круглограмме, деленная на масштабный коэффициент, дает действительное отклонение профиля в данной точке.

Результаты измерения получены в виде диаграмм (рис. 4) и в виде протокола отчета.

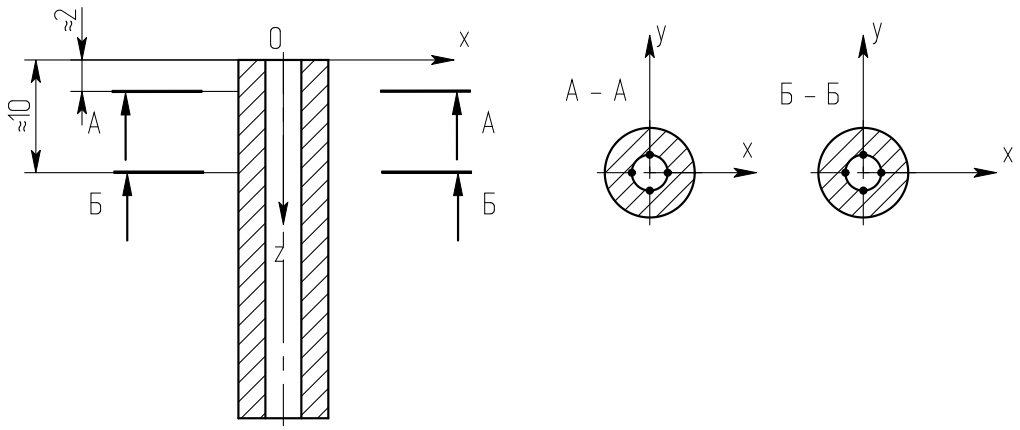


Рис. 3. Схема направления координатных осей

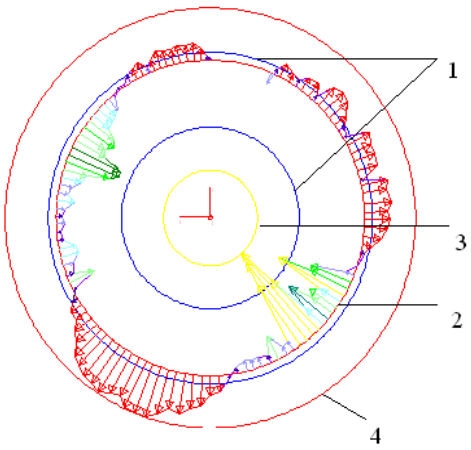


Рис. 4. Диаграмма, полученная в результате измерения

На полученной диаграмме окружности синего цвета (1) представляют собой наименьшее и наибольшее предельные отклонения, между которыми заключен допуск на изготовление. Окружность красного цвета (2), на которой лежат начала векторов, является средней окружностью. Желтая окружность (3) – окружность, соответствующая минимальному отверстию. Через наиболее удаленную точку проведена окружность, соответствующая максимальному отверстию (4).

Для количественного сравнения был проведен вычислительный эксперимент с такими же режимами резания и конструкторско-технологическими параметрами инструмента и кондукторной втулки.

Исследования влияния подачи на погрешности размера и формы

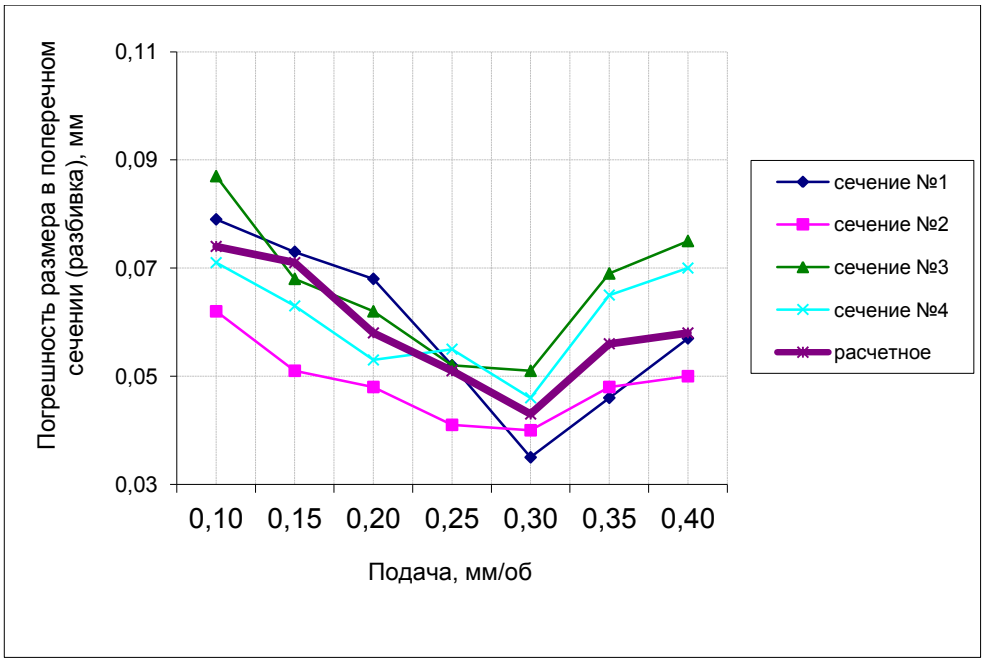
В ходе экспериментальных исследований изменялась подача в диапазоне от 0,1 мм/об до 0,4 мм/об при частоте вращения шпинделя 1180 об/мин.

По полученным результатам вычислительного эксперимента и измерений обработанных отверстий построены графики зависимости погрешности размера и формы отверстия в поперечном сечении от изменения подачи (рис. 5). Из представленных графиков видно, что при увеличении подачи погрешность размера уменьшается. На погрешность же формы изменение подачи не оказывает существенного влияния.

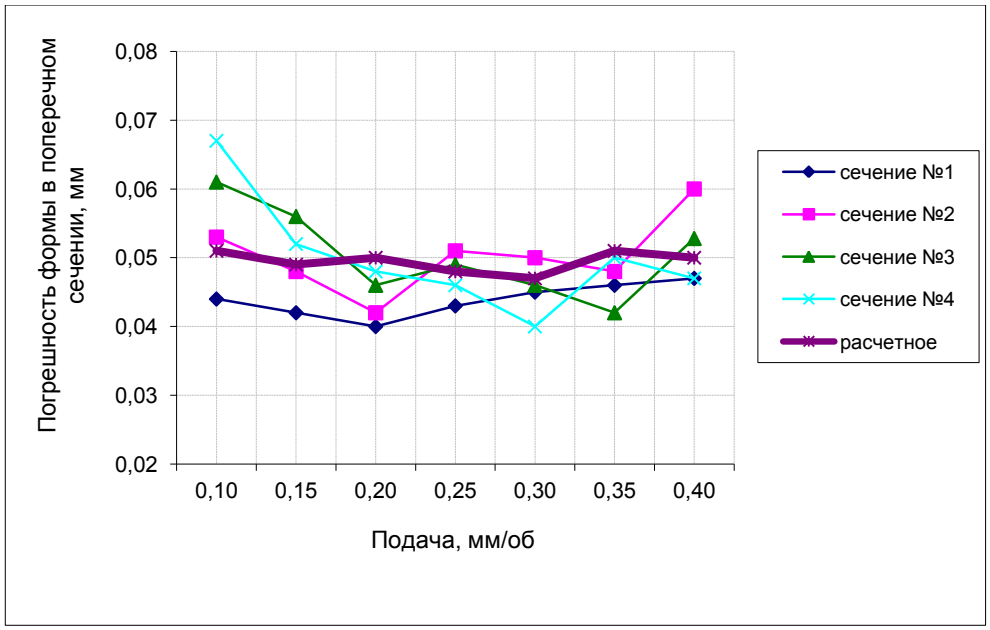
Исследования влияния зазора между кондукторной втулкой и инструментом

Экспериментальные исследования проводились с кондукторными втулками различных диаметров: Ø8,317 мм; Ø8,332 мм; Ø8,341 мм; Ø8,357 мм; Ø8,365 мм.

По полученным результатам вычислительного эксперимента и измерений отверстий в 4 сечениях построены графики зависимости погрешности размера и формы в поперечных сечениях обработанных отверстий от изменения зазора между кондукторной втулкой и инструментом (рис. 6). Из представленных графиков видно, что увеличение зазора между кондукторной втулкой и инструментом приводит к увеличению погрешности размера и формы.

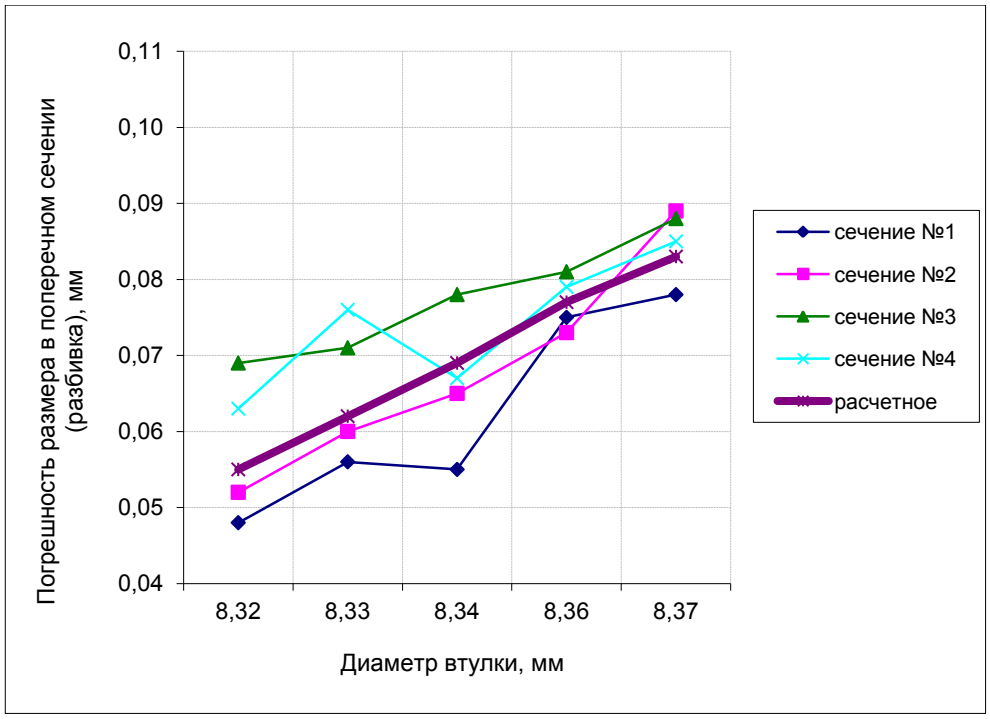


а)

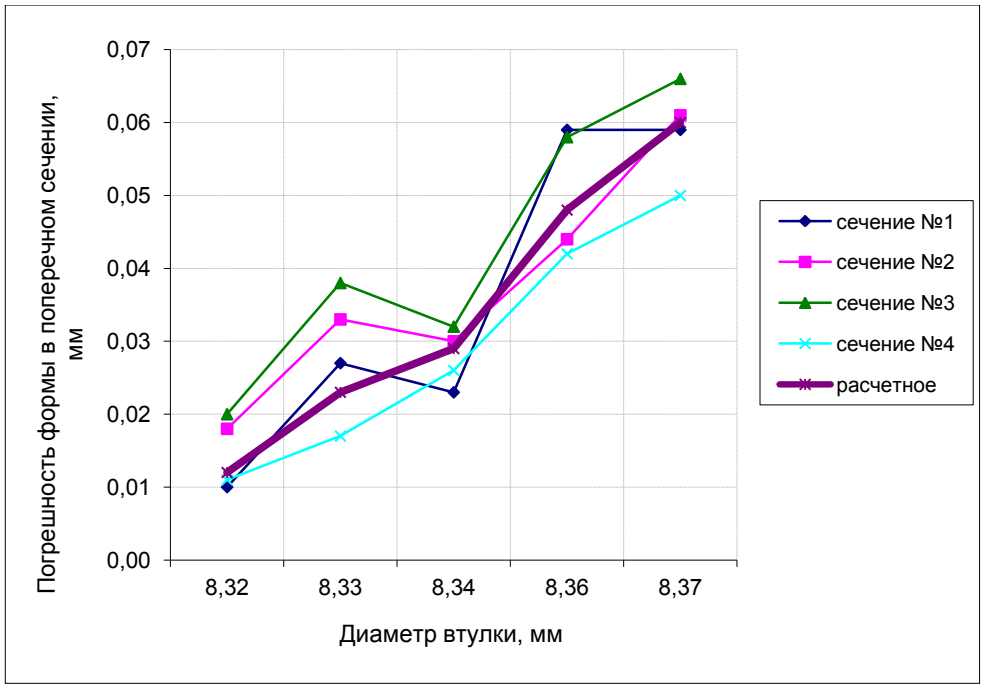


б)

Рис. 5. Влияние подачи на погрешность размера (а) и формы (б) в поперечном сечении обработанных отверстий



а)



б)

Рис. 6. Влияние зазора между кондукторной втулкой и инструментом на погрешность размера (а) и формы (б) в поперечном сечении обработанных отверстий

Сравнение результатов натурных и вычислительных экспериментов

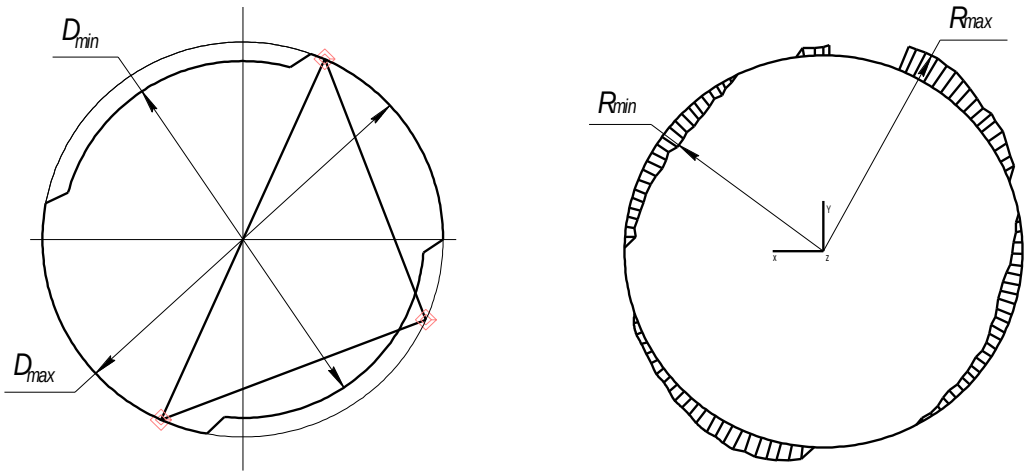
Качественный анализ результатов экспериментов

Качественный анализ результатов экспериментов проводился путём сравнения диаграмм, полученных на КИМ (рис. 7, б и 8, а), и профилей в поперечном (рис. 7, а) и продольном (см. рис. 8, а) сечениях, полученных в ходе вычислительного эксперимента [1], для детали «Втулка плунжерная» при следующих параметрах: диаметр инструмента – 8,81 мм; диаметр кондукторной втулки – 8,357 мм; S=0,8 мм/об. Увеличение диаметра на рисунках – 12–14 раз, увеличение отклонений – 219–263 раз.

Качественные сравнения результатов натурных и компьютерных экспериментов показали совпадение профилей поперечных и продольных сечений.

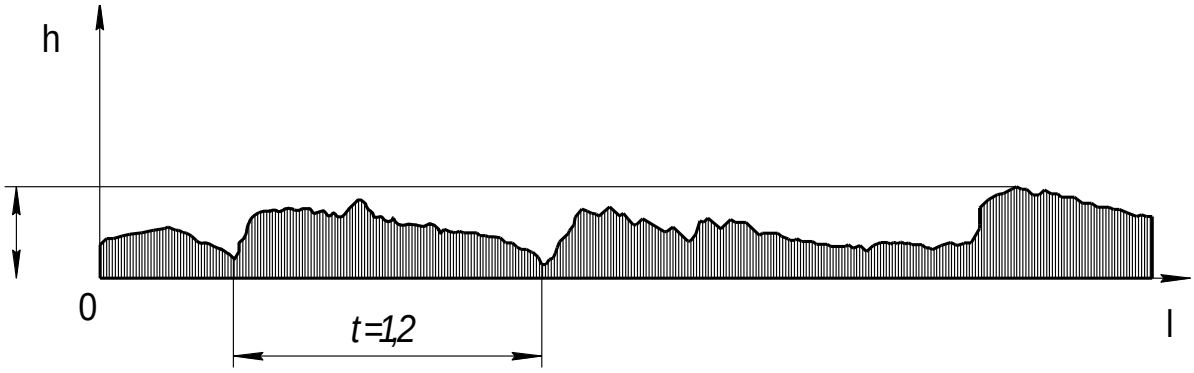
Количественный анализ результатов экспериментов

Сравнение кривых, полученных в результате натурного и вычислительного экспериментов, зависимости погрешности формы и размера отверстия в поперечном сечении от подачи (см. рис. 5) и от зазора между кондукторной втулкой и ружейным сверлом (см. рис. 6) показало, что расхождение составляет от 12 до 15 %.



а) б)

Рис. 7. Сравнительные круглограммы поперечного профиля:
а – вычислительный эксперимент; б – натурный эксперимент



а)

б)

Рис. 8. Профиль отверстия в продольном сечении:
а – натурный эксперимент; б – вычислительный эксперимент

Выводы

1. Сравнительный анализ показал совпадение на качественном уровне профилей отверстия в поперечном и продольном сечениях, полученных в результате вычислительного эксперимента и в результате измерения на КИМ.

2. Проведенные экспериментальные исследования показали влияние основных параметров на точность обработки, а именно влияние, подачи, зазора между кондукторной втулкой и инструментом на погрешность размера и формы в поперечном сечении обработанных отверстий.

Библиографический список

1. Гузеев, В.И. Моделирование точности обработки отверстий ружейными сверлами / В.И. Гузеев, И.П. Дерябин, И.Н. Миронова // Вестник ЮУрГУ. – 2005.

К содержанию

УДК 621.951.2/.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЫЧКИ СВЕРЛА НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ

И.П. Дерябин, С.И. Павлючук

В статье приведена схема формообразования отверстий сверлами с подточкой перемычки, применяющиеся в производстве. Описана методика установления зависимостей между площадью срезаемого слоя при обработке отверстий спиральным сверлом и радиальными силами резания, показано как изменяется форма и площадь сечения срезаемого припуска при сверлении в зависимости от формы подточки перемычки и каким образом это приводит к перераспределению радиальных составляющих сил резания.

Ключевые слова: сверление, математическое моделирование, точность обработки отверстий, геометрия режущей части сверла, поперечная кромка.

Изучение состояния эксплуатации спиральных сверл в промышленности показало, что сверление точных отверстий составляет до 50 % всех сверлильных работ. Одними из главных причин сравнительно невысокой точности просверленных отверстий являются особенности геометрии сверла, отклонение от симметричности заточенной режущей части и малая жесткость сверла [1].

Изучение различных видов заточек и подточек сверл, разработка схем формообразования отверстий сверлами с конкретными видами подточки, анализ и расчет площадей сечений срезаемых припусков способно выявить дополнительные запасы по точности и стойкости.

Основными недостатками конструкции спирального сверла являются неблагоприятная геометрия его режущей части и наличие поперечной кромки (перемычки), образующейся пересечением двух режущих кромок. Для повышения работоспособности спиральных сверл применяются всевозможные подточки. Однако при изменении принятых условий подточка может не дать эффекта в повышении точности, а в некоторых случаях и снизить её. Проведение анализа геометрии режущей части спирального сверла с подточкой перемычки позволит понять сущность происходящих при сверлении явлений.

Основной причиной изменения формы и увода оси отверстия при сверлении является разность радиальных составляющих сил резания действующих на режущие кромки. Если принять, что радиальные составляющие сил резания Py_i пропорциональны площадям поперечного сечения срезаемого припуска Δ_i с соответствующим коэффициентом пропорциональности K_i, т.е. $Py_i=K_i\cdot\Delta_i$, то очевидно, что подточка перемычки изменит площадь сечения срезаемого припуска Δ_i.

В работе [2] приведены схемы формообразования и виды сечений припуска для сверл без подточки перемычки. Для того, что бы понять, каково влияние поперечной кромки сверла на площадь срезаемого слоя построены схемы, учитывающие изменения вершины сверла до и после подточки поперечной режущей кромки.

На рис. 1 показана одна из таких схем.

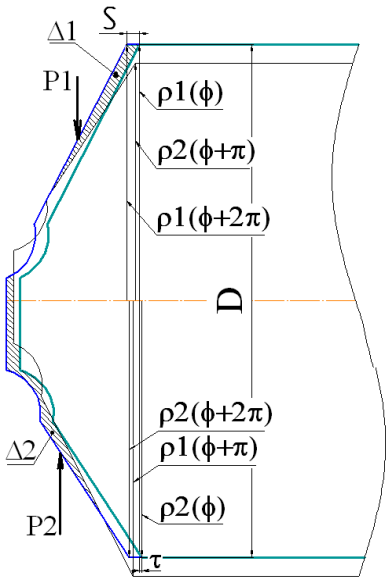


Рис. 1. Сверло с нормальной подточкой перемычки

На схеме показаны: Δ1 – припуск, снимаемый первым лезвием; Δ2 – припуск, снимаемый вторым лезвием; ϕ– текущий угол поворота инструмента; ρ1(ϕ) и ρ2(ϕ) – текущий радиус-вектор вершин первого и второго лезвия; ρ1(ϕ+π) и ρ2(ϕ+π) – значение радиус-вектора вершин первого и второго лезвий через пол оборота сверла; ρ1(ϕ+2π) и ρ2(ϕ+2π) – значение радиус-вектора вершин первого и второго лезвий через один полный оборот сверла; τ – осевое отставание вершин лезвий; S – подача.

Для расчета радиальных сил резания, которые, как уже было сказано, оказывают наибольшее влияние на точность обработки отверстий, необходимо знать площади срезаемых сечений. Рассмотрим каждое лезвие сверла в отдельности (рис. 2). Следует заметить, что для различных сочетаний подачи S и осевого отставания лезвий τ схемы будут различны.

Разбив полученные сечения на элементы определяем площадь каждого в зависимости от ряда преобразований и подстановок получим в итоге формулы для определения площадей сечений срезаемых первым лезвием (S_{ABCD}) и вторым лезвием (S_{FNG}):

$$S_{АВСД} = \frac{((\rho_2(\varphi \cdot ctg\varphi_2) - (\rho_1(\varphi \cdot ctg\varphi_1) - \frac{S}{2})tg\varphi_2}{(tg\varphi_1 - tg\varphi_2)\sin\varphi_1} - \frac{S \cdot \sin\varphi_2}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)}) \cdot S \cdot \sin\varphi_1 + \frac{((\rho_2(\phi) \cdot ctg\varphi_2) - (\rho_1(\phi) \cdot ctg\varphi_1) - \frac{S}{2})tg\varphi_2)}{(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \cdot Sin\varphi_1} \cdot S \cdot \sin\varphi_1, \quad (1)$$

$$S_{FHG} = \frac{S \cdot \sin\varphi_2 \cdot (\frac{S \cdot \sin(180^\circ - \varphi_1)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)})}{2}, \quad (2)$$

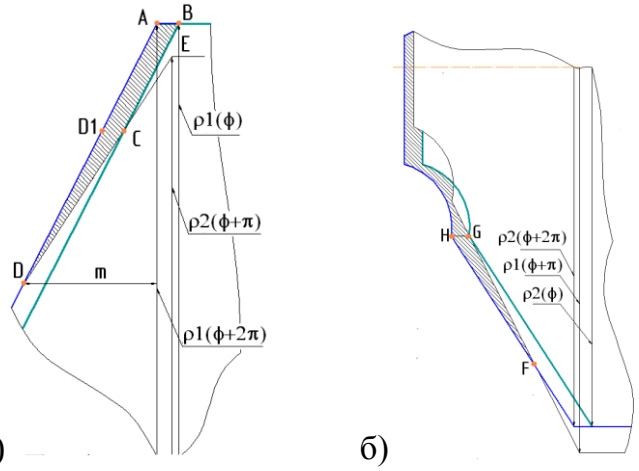


Рис. 2. Распределение припуска на режущих лезвиях
а – сечение, срезаемое первым лезвием; б – вторым лезвием

Радиальные составляющие сил резания P_i пропорциональны площади срезаемого слоя Δ_i с соответствующим коэффициентом пропорциональности K_i:

$$P_i = \Delta_i \cdot K_i. \quad (3)$$

Составим исходную систему уравнений с учетом того, что сумма радиус-векторов вершин первого и второго лезвий всегда равна диаметру инструмента D, а разность сил действующих на лезвия ровна произведению смещения оси сверла на его жесткость j:

$$\begin{cases} \rho_1(\varphi) + \rho_2(\varphi) = D \\ |(P_1) - (P_2)| = \left|\rho_1(\varphi) - \frac{D}{2}\right| \cdot j \end{cases}. \quad (4)$$

Подстановка выражений (1) и (2) в выражение (3) а затем полученного уравнения в систему уравнений (4) позволяет уточнить математическую модель формообразования отверстия для рассматриваемого типа заточки сверла.

Библиографический список

1. Дерябин, И.П. Прогнозирование параметров точности при обработке отверстий / И.П. Дерябин, В.И. Гузеев // Технология машиностроения. – 2006. – № 4 (46). – С. 9–14.

2. Дерябин, И.П. Исследование процессов формообразования отверстий мерными инструментами: монография / И.П. Дерябин, А.В. Козлов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 251 с.

К содержанию

УДК 669.18.054.82

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Н. Дильдин, Р.Р. Гарифулин

По результатам проведенных исследований восстановления сталеплавильных шлаков показана возможность получения методом жидкофазного восстановления металлического расплава с гарантированным химическим составом.

Ключевые слова: твердофазное и жидкофазное восстановление, сталеплавильные шлаки, восстановление.

Вопросам переработки и утилизация шлаков сталеплавильного производства, в том числе отвальных, в последние годы уделяется повышенное внимание, поскольку данная задача остается весьма актуальной для отечественной металлургии [1–3]. Существующая проблема весьма остра ввиду сложности состава образующихся соединений и отсутствия достаточно простых и эффективных технологий их переработки.

Наибольший интерес в связи с этим представляет создание эффективных технологий восстановления металлической части шлаков с последующим ее извлечением и повторным использованием, работы в этом направлении ведутся достаточно интенсивно [2, 3].

Выбор схемы переработки шлаков по типу «восстановление – плавление» (двухстадийные технологии) либо «плавление – восстановление» (одностадийные технологии) предопределен особенностями исходного сырья – шлаков, подвергающихся переработке.

Перспективным является процесс извлечения из оксидной составляющей отвальных шлаков железа и ряда легирующих элементов (Mn, Cr, V, Ni) с использованием метода твердофазного восстановления предварительно обогащенных металлической составляющей шлаков. Данный процесс является менее энергозатратным, характеризуется незначительным формированием газовых продуктов восстановления и предполагает использование более простого нагревательного оборудования. Особенности твердофазного восстановления отвальных шлаков ОАО «ЗМЗ» рассмотрены ранее [4].

При анализе отвальных шлаков ОАО «ЗМЗ» установлено, что они имеют сложный фазовый состав, включая инсталит $MgSiO_3$, ильменит $FeTiO_3$, авгит $Ca(Fe,Mg)\cdot Si_2O_6$, плагиоклазы $(Na,Ca)\cdot(Si,Al)_4O_8$, а также магнетит $FeFe_2O_4$, фаялит $(Fe, Mg)_2SiO_4$ и гематит Fe_2O_3. Химический состав также неоднороден, его усредненные значения по разным горизонтам отвалов в пересчете на простые оксиды изменяются в следующих пределах, % по массе: SiO_2 – 17,7…40,0; CaO – 21,9…47,4; MgO – 6,2…16,5; Al_2O_3 – 7,2…10,1; MnO – 1,2…5,3; Cr_2O_3 – 1,7…11,3; TiO_2 – 0,3…1,5; V_2O_5 – 0,1…0,3; FeO – 3,7…25,0; NiO – 0,1…0,4.

С учетом предварительно проведенного исследования, шлаки указанного состава были подвержены жидкофазному восстановлению в лабораторных условиях с целью извлечения металлической составляющей.

Сущность процесса заключается в расплавлении шлака электрической дугой переменного тока со следующими характеристиками: напряжение U=60 В, сила тока I=300 А, частота тока менялась в пределах ν=0…1500 Гц. Именно за счет изменения частоты тока возможно расплавление шлака с последующей выдержкой расплава после нагрева до температуры не менее 1500 – 1550 °С при образовании жидкой фазы. Подача тока может осуществляться как с использованием графитового, так и металлического нерасходуемых электродов.

Предварительно шлаки измельчали до фракции 0…10 мм и подвергли магнитной сепарации с целью разделения на магнитную и немагнитную составляющие. Восстановление осуществляли в металлической колбе (стакане), футерованной магнезитом. Исходная масса шлака составляла до 1,5 кг по весу, в качестве восстановителя использовали молотый кокс фракции 2…5 мм в соотношении 1:10 к массе шлака. Всего было проведено 5 опытных плавок, хим. состав полученного металла приведен ниже в таблице.

Выход годного (металлическая составляющая) составил порядка 300 г, на долю оставшегося шлака приходилось порядка 23…25 % по массе от исходного количества шлака, остальное – улет.

Таблица

Химический состав металла после восстановления, % по массе

№ образца	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Ti
1	98,4	0,14	0,01	0,04	0,01	0,01	0,11	0,05	0,85	0,210	0,01
2	93,8	0,05	0,01	0,05	0,01	0,07	0,29	0,23	4,66	0,53	–
3	98,7	0,01	0,01	0,04	–	0,04	0,11	0,05	0,68	0,22	–
4	93,5	0,01	0,01	0,04	0,01	0,04	0,21	0,24	5,23	0,61	–

Таким образом, из представленных данных следует, что опробованным методом возможно получение металлического расплава на основе железа с содержанием ряда легирующих, представляющих промышленный интерес – прежде всего хрома и никеля. Низкое содержание углерода в расплаве объяснимо его почти полным реагированием как восстановителя, следует также отметить невысокие концентрации серы и фосфора, повышенное содержание меди объяснимо ее хорошим восстановлением в силу невысокого сродства к кислороду.

Библиографический список

1. Дильдин, А.Н. Комплексное использование отходов сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, В.И. Чуманов, И.В. Чуманов // Металлург. – 2010. – № 10. – С. 42–44.

2. Ковалев, В.Н. Металлургический комплекс для получения товарной продукции из материалов техногенного и природного происхождения / В.Н. Ковалев // Сталь. – 2013. – № 4. – С. 78–83.

3. Панишев, Н.В. Переработка мелкозернистых отходов металлургического производства с получением гранулированного чугуна и извлечением цинка / Н.В. Панишев, В.А. Бигеев, А.А. Черняев / Вестник МГТУ. – 2013. – № 4. – С. 26–29.

4. Дильдин, А.Н. Твердофазное восстановление отходов сталеплавильного производства / А.Н. Дильдин, В.И. Чуманов, И.В. Чуманов, В.Е. Еремяшев // Металлург. – 2014. – № 2. – С. 36–40.

К содержанию

УДК 536.7

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЖИДКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Н. А. Игизьянова

Проводится исследование задачи о распределении тепловой энергии в жидких неметаллических токопроводящих высокотемпературных средах. Показана зависимость электропроводности рассматриваемой среды от некоторых факторов и связь с температурным режимом.

Ключевые слова – жидкие неметаллические среды, электропроводность, распределение тепловой энергии.

Современные энергоустановки различного типа и назначения решают важные задачи обеспечения теплом и энергией промышленных предприятий, в частности, металлургические заводы, имеющие участки спецэлектрометаллургии. Процессы осуществляются в промышленных печах электрошлакового переплава (ЭШП), которые представляют собой агрегаты с высокими температурными режимами – свыше 2500 ºС. Поскольку основные термоэлектрические процессы, влияющие на ход переплава и определяющие в конечном итоге качество выплавляемого при ЭШП металла, происходят в шлаке – жидкой неметаллической высокотемпературной среде, через которую пропускается электрический ток в тысячи ампер, то шлаковая ванна рассматривается в данной статье более глубоко, чем другие звенья ЭШП-установки. Учитывая, что до настоящего времени недостаточное внимание уделяется изучению проблем распределения электрического тока и генерации энергии в жидких неметаллических высокотемпературных средах, а экономия электроэнергии достигает 30 % при переводе технологии ЭШП с переменного на постоянный ток, то эта задачу становится еще более актуальной и перспективной.

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений Максвелла для жидких неметаллических высокотемпературных сред (ЖНВС) при допущении, что электромагнитное поле и профиль скорости потока жидкости взаимно не деформируют друг друга, а также можно пренебречь индуцированным магнитным полем по сравнению с внешним полем:

$$\begin{cases} rot\,\bar{H} = \bar{j}; \\ div\,\bar{H} = 0; \\ rot\,\bar{E} = -\mu_0 \dfrac{\partial \bar{H}}{\partial t}; \\ div\,\bar{E} = 0, \end{cases} \qquad (1)$$

где $\bar{j}$ - плотность электрического тока; μ_0 - магнитная постоянная; t – время.

В предположении об изотропности проводимости и отсутствии намагниченности жидкости для сред с ионной проводимостью задача описания электромагнитных явлений состоит в нахождении напряженности $\bar{E}$ электрического поля и напряженности $\bar{H}$ магнитного поля.

Закон сохранения заряда в дифференциальной форме в виде уравнения непрерывности $\frac{\partial \rho_0}{\partial t} + div\, \bar{j} = 0$, где ρ_0 - объемная плотность зарядов.

При постоянном токе:

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial t} = 0 \Rightarrow div\, \bar{j} = 0. \quad (2)$$

Частным случаем ЖНВС является расплав шлака в металлургической ванне. В рассматриваемой перемешиваемой токопроводящей жидкости действует закон Ома для движущихся сред:

$$\bar{j} = \sigma(\bar{E} + \mu_0 \bar{v} \times \bar{H}). \quad (3)$$

Здесь σ - удельная электропроводность; $\bar{v}$ – скорость движения жидкости. Для металлов плотность тока и напряженность вдоль проводника линейно взаимосвязаны между собой, т.е.:

$$\bar{j} = \sigma \bar{E}. \quad (4)$$

Для полуметаллов начинаются отклонения при заметном нагреве проводника проходящим током, в результате чего зависимость (4) приобретает нелинейный характер (3). Связано это не столько с их более высоким (на 1–2 порядка) удельным электрическим сопротивлением [1], но, прежде всего с тем, что в силу ионной проводимости электролитов их удельная электропроводность σ является не константой, а скалярной функцией - коэффициентом, связывающим напряжённость электрического поля и плотность тока в данной точке (4). Эта формула справедлива для неоднородного, но изотропного вещества.

Рассмотрим факторы, влияющие на проводимость рассматриваемой жидкой неметаллической среды.

- Так как в растворах электричество переносится ионами, величина удельной электропроводности зависит от заряда и концентрации ионов, а также скорости их движения. Чем большей будет концентрация свободных заряженных частиц, тем выше электропроводимость. Итак, электропроводность зависит от плотности, соответственно силы тока – $\sigma = \sigma(J)$.
- Электропроводность шлака определяется его составом. Известно, например, частичная замена FeO или MnO в шлаке на CaO в расплавленных силикатах понижает их электропроводность [2]. Для электрошлакового переплава представляет особый интерес знание влияние состава на электропроводность шлаков системы $CaO – Al_2O_3 – CaF_2$.

- С повышением температуры электропроводность шлаков возрастает, причем зависимость эта имеет экспоненциальный характер: $\sigma = -B \cdot e^{\frac{E_k}{RT}}$, где B – постоянная, характерная для данного электролита; E_k – энергия активации, T — абсолютная температура, R = 8,31 (Дж/(моль·К)) – универсальная газовая постоянная.

Ввиду вышеизложенного и на основании опытных данных можно утверждать, что наибольшей электропроводностью обладают фторидные флюсы (шлаковые добавки).

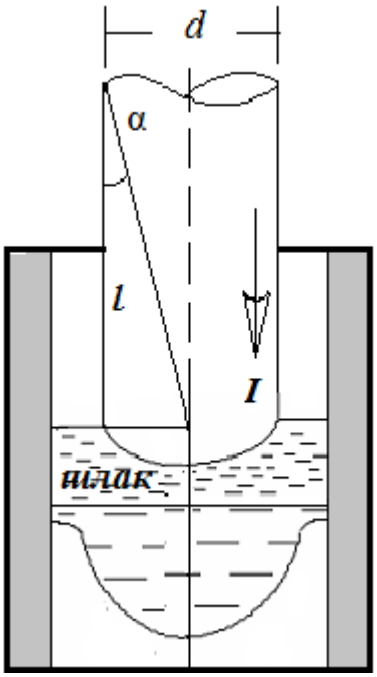


Рис. 1. Геометрические параметры электрода
для оценки токов проводимости и токов индукции

Покажем, что плотности токов проводимости $\sigma\bar{E}$ по порядку величины для изучаемых токонесущих расплавов шлаков намного больше, чем токи индукции $\mu_0\sigma[\bar{v} \times \bar{H}]$.

Магнитное поле в зоне расплава *шлак* (рис. 1) порождается током проводимости $\bar{I}$ самого электрода, в предположении, что при ЭШП нет других источников магнитных полей. Поле прямого тока электрода будет наибольшим на его образующих l. Принимая во внимание реальные порядки величин силы тока и диаметра электрода, а также экспериментальные данные по максимальной скорости шлакового расплава $\bar{v} \approx 0{,}5\frac{м}{с}$ [4], получим расчетным путем максимальное значение напряженности магнитного поля в шлаковом расплаве:

$\bar{H}_{max} \approx 2000\ \frac{\text{кА}}{\text{м}} \Rightarrow \mu_0|\bar{v} \times \bar{\text{H}}| = \mu_0|\bar{v}||\bar{\text{H}}|\sin \propto \approx 10^{-2}\frac{\text{В}}{\text{м}}$. Соответственно, при меньших скоростях $\bar{v}$ и при любом диаметре электрода вторая составляющая в (3) будет только уменьшаться. В свою очередь, напряженность электрического поля $\bar{\text{E}}$ при ЭШП составляет порядка $10^4\frac{\text{В}}{\text{м}}$ и зависит лишь от потенциала поля.

Очевидно, что $10^4\frac{\text{В}}{\text{м}} \gg 10^{-2}\frac{\text{В}}{\text{м}}$, значит, $\bar{E} \gg \mu_0|\bar{v} \times \bar{H}|$, следовательно, $\sigma\bar{E} \gg \mu_0\sigma[\bar{v} \times \bar{H}]$, что и требовалось доказать.

Значит, вторым слагаемым в формуле (3) можно пренебречь, и уравнение непрерывности будет иметь следующий вид:

$$div(\sigma\bar{E}) = 0. \quad (5)$$

Рассмотрим оценку анизотропии энергетического поля в пространстве ЖНВС. Формирование температурного поля происходит вследствие выделения энергии при прохождении электрического тока в жидком проводнике с большим сопротивлением. В результате происходит нагрев его до высокой температуры. В межэлектродном промежутке выделение энергии будет распределенное, так как распределенной является сила тока. Если пренебречь теплообменом стенок проводника с окружающими средами (стенкой кристаллизатора, поддоном, воздухом), то распределенное выделение энергии по жидкой неметаллической среде и определит температурное поле. Можно утверждать, что каждой точке пространства ЖНВС будет соответствовать точечный источник энергии. Неоднородность температурного поля приводит к неравномерности теплообмена.

Тепловое состояние токонесущего расплава описывается законом сохранения энергии, учитывающим передачу тепла теплопроводностью и конвекцией. Обозначим за dQ – изменение внутренней энергии вещества, содержащегося в элементарном объеме dV за время $d\tau$; dQ_1 – количество тепла, введенное в элементарный объем путем теплопроводности за время $d\tau$; dQ_2 – количество тепла, которое за время $d\tau$ выделилось в элементарном объеме dV за счет внутренних источников. Тогда $dQ = dQ_1 + dQ_2$.

Для однофазной химически однородной и изотропной жидкости с произвольной зависимостью физических свойств среды от температуры и давления, но при отсутствии в потоке переноса тепла излучением и с учетом нестационарности процесса уравнение энергии имеет вид:

$$\rho c_v \frac{dt}{d\tau} = div(\lambda \cdot grad\ t) + q_v - \frac{t}{\rho}\left(\frac{\partial\rho}{\partial t}\right)\frac{dP}{d\tau}. \quad (6)$$

Здесь ρ – плотность жидкой среды; c_v = 0,733 $\frac{Дж}{кг \cdot ℃}$ – удельная теплоемкость при постоянном объеме и давлении; λ – коэффициент теплопроводности среды; q_v – мощность внутренних источников тепла в единице объема в единицу времени.

Третьим членом в уравнении (6) пренебрегают вследствие того, что технологические процессы протекают в большинстве случаев при скоростях, значительно ниже звуковых, и малого изменения плотности от температуры и давления. В результате упрощающих предпосылок уравнение (6) принимает вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = a\nabla^2 \mathrm{t} + \frac{\mathrm{q_v}}{\rho \mathrm{c_v}} \tag{7}$$

при $\lambda = const$ и $\frac{\lambda}{\rho \mathrm{c_v}} = a.$

Это дифференциальное уравнение теплопроводности, или уравнение Фурье, ввиду цилиндрической формы частей конструкции рассматривается в цилиндрических координатах:

$$\rho c_v \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_{эф} \frac{dt}{dr}\right) + \frac{\lambda_{эф}}{r}\frac{dt}{dr} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda_{эф} \frac{dt}{d\varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{эф} \frac{dt}{dz}\right) + q_v(r, \varphi, z), \tag{8}$$

Здесь конвекция учитывается введением эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$. Мощность внутренних источников теплоты определяем по закону Джоуля-Ленца $q_v = \sigma \cdot j^2$.

Для решения поставленной задачи необходимо к дифференциальному уравнению (8) добавить краевые условия:

- временные (начальные) – характеризующие распределение температуры тела в начальный момент времени: при $\tau = 0 \quad t = t_0(r, \varphi, z)$;
- граничные:

1) первого рода: задается распределение температуры на поверхности жидкости в функции времени – при $r = 0$ $t = t_{ш1}(\tau)$, при $r = R$ $t = t_{ш2}(\tau)$.

2) второго рода: плотность теплового потока, передаваемого от поверхности шлака в окружающую среду в функции времени: $q = \alpha(t_\mathrm{c} - t_\mathrm{ш})$.

3) третьего рода: из закона Ньютона-Рихмана теплоотдачи между поверхностью жидкого шлака и окружающей средой получаем математическую формулировку: $\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_c - t_\mathrm{ш})$.

В результате решения дифференциального уравнения теплопроводности (8) совместно с условиями однозначности можно найти температурное поле среды.

Вычисления производились в форме так называемой энергетической матрицы $Q = [q_{ij}], i = 1, 2, ..., k, \quad j = 0, 1, 2, ..., m,$ где q_{ij} – это величина энергии $Дж$, в узлах сетки с номерами i, j. Исходя из принятого допущения, что внешний теплообмен шлаковой ванны отсутствует, распределение тепла внутри ванны происходит теплопроводностью. От слоя к слою вычислялась разность температур $T_{i+1} - T_i = \Delta T_i.$ Теплопроводность шлака $\lambda_{шл} = 4,64 Вт/(м \cdot К)$ $r_э = 0,15 м, r_k = 0,26 м$. Площадь поперечного сечения i-го слоя находилась по формуле: $S_i = П(r_{i+1} + r_i)\Delta r$. Шаг по r был принят равным $0,015 м$, а по высоте

ванны $h = 0,005 м.$ Была вычислена матрица температур $\Delta T = [\Delta t_{ij}]$ $i = 1,2,...k,\ j = 1,2,...,m.$ На рис. 2 приведено изменение ΔT_j при $i = 5,$ т.е. на середине высоты шлаковой ванны.

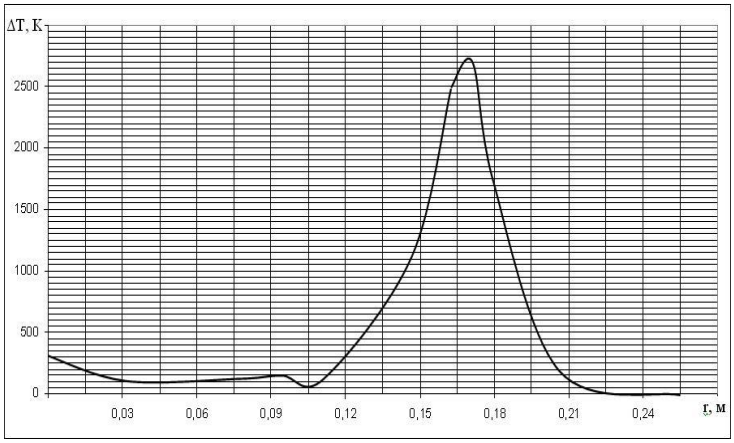


Рис. 2. Изменение разности температур между слоями шлаковой ванны на половине ее глубины, по радиусу

Максимальное значение температуры наблюдается в области при $r = r_э$, и в этой периферийной зоне электрода выделяется максимум энергии и происходит перегрев шлака. При внешнем теплообмене этот пик перегрева сглаживается, но анизотропия температурного поля остается очень значительная. Как отмечено в работах [1, 2] замеры температуры проводились путем просвечивания ванны рентгеновским лучом и по степени затемнения пятна луча на пленке определяли температуру. Следует заметить, что луч, проходя по диаметру ванны, дает интегральную характеристику затемнения пятна на пленке. При наличии внешнего теплообмена эта температура будет ниже, и что соответствует экспериментальным данным работ [5, 6].

В результате исследований, проведенных в данной работе можно сделать следующие выводы: подтверждено предположение о значительной анизотропии энергетического поля в шлаке. Выявлено наличие зоны, где энергия не генерируется, и зоны перегрева шлака – на периферии торца расходуемого электрода, что приводит к оплавлению электрода в виде конуса.

Библиографический список

1. Воскобойников, В.Г. Общая металлургия / В.Г. Воскобойников и др. – 6-изд., перераб. и доп. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005 – 768 с.

2. Поволоцкий, Д.Я. Физико-химические основы процессов производства стали: Ученое пособие для вузов / Д.Я. Поволоцкий. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 183 с.

3. Клюев, М.М. Электрошлаковый переплав / М.М. Клюев и др. – М.: Металлургия, 1984. - 208 с.

4. Маринский, Г.С. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве / Г.С. Маринский, В.Л. Шевцов, Б.И. Медовар и др. - Киев: Наук. думка, 1978. – 303 с.

5. Йоши, С. Электрошлаковый переплав / С. Йоши, А. Митчел. – Киев: Наукова думка, 1973. – С. 168–180.

6. Панин, В.В. / В.В. Панин, О.В. Беровский, И.С. Ивахненко // Изв. АН СССР. Металлургия и горное дело. – 1963. – № 6. – С. 90–95.

К содержанию

УДК 621.833.001.2

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭЛАСТО-ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА

Д.Н. Казарцев

В работе приводится методика расчёта геометрических характеристик контакта, необходимых для определения параметров смазочного слоя в зацеплении и управления этими характеристиками с целью повышения нагрузочной способности гиперболоидных зубчатых передач.

Ключевые слова: гиперболоидные зубчатые передачи, несущая способность контакта, толщина смазочного слоя.

В настоящее время в сложных трансмиссиях находят применение пространственные зубчатые передачи, в частности передачи со скрещивающимися осями колёс. По форме аксоидных поверхностей эти передачи получили название гиперболоидных. К ним относятся винтовые передачи, составленные из цилиндрических косозубых колёс, червячные, спироидные, гипоидные.

В мощных высокоскоростных приводах судовых установок, в электромеханических приводах космической техники [1] весьма перспективным является использование гиперболоидных зубчатых передач, содержащих эвольвентно-конические колёса, т.е. колёса, нарезанные с переменным по длине зуба смещением инструмента. В таких передачах наблюдается повышенное скольжение в контакте зубьев (к профильному скольжению добавляется продольное), ухудшающее условия образования масляного клина в зацеплении. Основным фактором, определяющим работоспособность таких передач, становится не контактная или изгибная прочность зубьев, а заедание их рабочих поверхностей при разрушении слоя смазки. Поэтому одним из основных этапов проектирования передач со скрещивающимися осями является прогнозирование состояния смазочного слоя в контакте, оценка его нагрузочной способности.

Для изучения состояния смазочного слоя в пространственном ЭДГ-контакте трения необходимо иметь законченный алгоритм расчёта основных геометрических характеристик зацепления, определяющих поведение слоя смазки в контакте. Рассмотрим основные сведения о геометрии эвольвентно-конических колёс и передач, сформированных из них [2].

В отличие от нарезания цилиндрического колеса, нарезание эвольвентно-конического колеса производится с переменным по ширине венца смещением производящего контура режущего инструмента. Таким образом, на большем торце колесо нарезается с положительным, а на меньшем торце с отрицательным смещением. При этом в некотором торцевом сечении смещение профиля инструмента равно нулю. Такое сечение называется нулевым торцевым сечением (сечение А – А, рис. 1). В произвольном торцевом сечении смещение характеризуется коэффициентом смещения инструмента $X_т$. Делительная плоскость производящей рейки при нарезании эвольвентно-конического колеса составляет с осью колеса угол δ – угол конусности колеса. Движение обкатки остается таким же, как и при нарезании цилиндрического колеса.

Если угол наклона линии зуба инструмента в длительной плоскости β равен нулю, то эвольвентно-коническое колесо условно считается прямозубым, хотя углы наклона линии зуба на делительном цилиндре на левых ($\beta_л$) и на правых сторонах ($\beta_п$) отличны от нуля. У эвольвентно-конического косозубого колеса (β≠0) боковые поверхности зубьев являются эвольвентными геликоидами, имеющими различные основные цилиндры. Поэтому различают левую (Л) и правую (П) стороны зубьев; их геометрические характеристики различны.

Основные геометрические характеристики эвольвентно-конического зубчатого колеса [2] определяется по следующим формулам:

Угол давления эвольвенты на делительной окружности:

$$\alpha_{Т Л,П} = \arctan\left(\tan\alpha\cos\delta/\cos\beta \pm \tan\beta\sin\delta\right).$$

Коэффициент высоты головки зуба инструмента:

$$h^*_{aT} = h^*_a \cos\beta/\cos\delta .$$

Коэффициент радиального зазора:

$$C^*_T = C^* \cos\beta/\cos\delta .$$

Торцевой модуль:

$$m_T = m/\cos\beta .$$

Радиус делительной окружности:

$$r = 0.5 m_T z .$$

Радиус основной окружности:

$$r_{В Л,П} = r\cos\alpha_{Т Л,П} .$$

Радиус окружности впадин:

$$r_f = m_T\left(0.5z - h_{aT}^* + X_T - C_T^*\right).$$

Радиус окружности вершин (на большом торце):

$$r_a = m_T\left(0.5z + h_{aT}^* + X_T - \Delta y_T\right).$$

Угол наклона линии зуба на делительном цилиндре:

$$\beta_{Л,П} = \arctan\left(\tan\beta\cos\delta \pm \tan\alpha\sin\delta/\cos\beta\right).$$

Угол наклона линии зуба на основном цилиндре:

$$\beta_{ВЛ,П} = \arctan\left(\tan\beta_{Л,П}\cos\alpha_{ТЛ,П}\right),$$

где α, ha*, C*, m – параметры режущего инструмента в нормальном сечении.

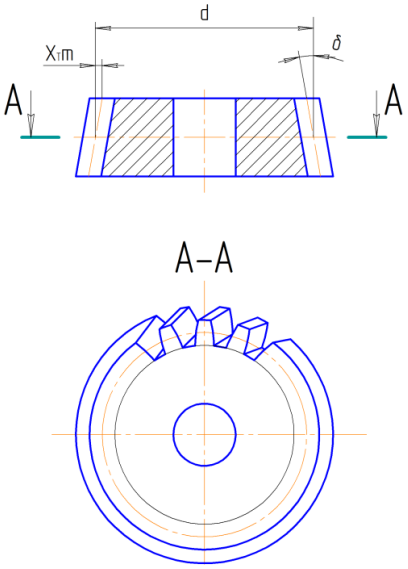


Рис. 1. Эвольвентно-коническое колесо

В общем случае гиперболоидная передача состоит из двух эвольвентно-конических колёс. Начальными поверхностями являются конусы с углами конусности δw_1 и δw_2. Углы δw_1 и δw_2 считаются одного знака, если вершины начальных конусов направлены в одну сторону от нормальной плоскости передачи (рис. 2).

Образующие начальных конусов, лежащие в начальной плоскости, составляют с общей касательной (t-t) линии зубьев в полюсе зацепления P углы βw_1 и βw_2 .

Угол βw считается положительным, если на рабочей поверхности зуба делительные теоретические линии зуба имеют правое направление.

Гиперболоидные передачи могут выполняться со смещением, величина которого характеризуется угловым коэффициентом воспринимаемого смещения:

$$X_\alpha = \cos\alpha_W/\cos\alpha,$$

где αw – угол зацепления.

Если Xα<1 – передача имеет положительное смещение.

Если Xα>1 – отрицательное смещение.

При Xα=1 – смещение отсутствует.

Ниже приведены исходные данные, необходимые для расчёта гиперболоидной передачи общего случая (оба колеса эвольвентно-конические, косозубые):

α – угол профиля исходного контура;

Σ – межосевой угол;

Z_1 – число зубьев шестерни;

i – передаточное отношение;

δ_1, δ_2 – углы наклона делительной плоскости инструмента к оси шестерни и колеса;

β_1 (β_2) – угол наклона линии зуба инструмента в делительной плоскости;

Xα – угловой коэффициент воспринимаемого смещения;

K – коэффициент распределения смещения между шестерней и колесом:

$$K=X_1/X_\Sigma;$$

m – модуль зацепления;

ha* – коэффициент высоты головки зуба инструмента;

C* – коэффициент радиального зазора.

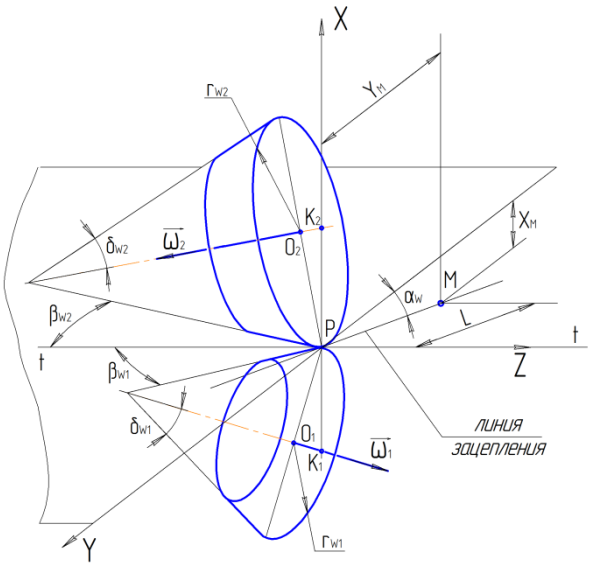


Рис. 2. Начальные поверхности гиперболоидной зубчатой передачи

В таблице представлены формулы геометрического расчёта гиперболоидных зубчатых передач. На основе этих формул разработана программа расчёта основных геометрических характеристик зацепления, необходимых для оценки несущей способности контакта. Расчёт ведется для пяти точек фазы зацепления (рис. 3).

Программа составлена для случая локализованного касания обеих сторон зубьев колес. Для расчета передачи с линейным касанием левых сторон зубьев углы δw_1, δw_2, βw_1, βw_2, αw должны удовлетворять условию линейного контакта:

$$\tan\alpha_w\left(\tan\beta_{w1}+\tan\beta_{w2}\right)=\tan\delta_{w1}/\cos\beta_{w1}+\tan\delta_{w2}/\cos\beta_{w2}\ .$$

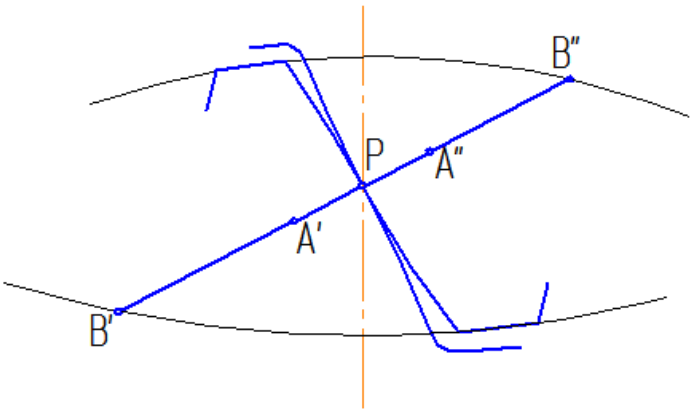


Рис. 3. Характерные точки линии зацепления

Для небольших углов скрещивания $\left(\Sigma\le 25^0\right)$ целесообразно выполнять гиперболоидную передачу с цилиндрической косозубой шестерней и эвольвентно-коническим прямозубым колесом [2]. Допустимо также выполнять шестерню цилиндрической прямозубой, а колесо эвольвентно-коническим косозубым. При этом сохраняются основные преимущества гиперболоидной передачи общего случая, а технология изготовления зубчатых колёс упрощается.

Таблица

Формулы геометрического расчёта гиперболоидных зубчатых передач

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула
1.	Угол зацепления	$\alpha_W=\arccos\left(X_\alpha\cos\alpha\right)$
2.	Угол начального конуса шестерни	$\delta_{W1}=\arcsin\left(\sin\delta_1\sin\alpha/\sin\alpha_W\right)$
3.	Угол начального конуса колеса	$\delta_{W2}=\arcsin\left(\sin\delta_2\sin\alpha/\sin\alpha_W\right)$
4.	Угол наклона линии зуба колеса	$\beta_{W2}=\arctan\left(\frac{\cos\Sigma+\sin\delta_{W1}\sin\delta_{W2}}{\cos\delta_{W1}\cos\delta_{W2}}\right)-\beta_{W1}$
5.	Угол наклона линии зуба в станочном зацеплении А) для шестерни Б) для колеса	$\beta_1=\arctan\left(\sin\beta_{W1}\cos\delta_{W1}X_\alpha/\cos\delta_1\right)$ $\beta_2=\arctan\left(\sin\beta_{W2}\cos\delta_{W2}X_\alpha/\cos\delta_2\right)$

Продолжение табл.

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула
6.	Угол профиля эвольвенты на делительной окружности А) для шестерни Б) для колеса	$\alpha_{T1П,Л} = \arctan\left(\frac{\tan\alpha\cos\delta_1}{\cos\beta_1} \pm \tan\beta_1 \sin\delta_1\right)$ $\alpha_{T2П,Л} = \arctan\left(\frac{\tan\alpha\cos\delta_2}{\cos\beta_2} \pm \tan\beta_2 \sin\delta_2\right)$
7.	Угловой коэффициент воспринимаемого смещения А) для шестерни Б) для колеса	$X_{\alpha T1} = X_\alpha \cos\beta_{W1}/\cos\beta_1$ $X_{\alpha T2} = X_\alpha \cos\beta_{W2}/\cos\beta_2$
8.	Угол профиля эвольвенты на начальной окружности А) для шестерни Б) для колеса	$\alpha_{WTП,Л1} = \arccos\left(X_{\alpha T1}\cos\alpha_{ТП,Л1}\right)$ $\alpha_{WTП,Л2} = \arccos\left(X_{\alpha T2}\cos\alpha_{ТП,Л2}\right)$
9.	Коэффициент суммы смещений инструмента в нормальной плоскости передачи	
$X_\Sigma = \frac{z_1\left(inv\alpha_{WTП1} + inv\alpha_{WTЛ1} - inv\alpha_{ТП1} - inv\alpha_{ТЛ1}\right) + z_2\left(inv\alpha_{WTП2} + inv\alpha_{WTЛ2} - inv\alpha_{ТП2} - inv\alpha_{ТЛ2}\right)}{4\tan\alpha\cdot k\cdot\cos\delta_1/\cos\delta_{W1} + (1-k)\cos\delta_2/\cos\delta_{W2}}$		
10.	Коэффициент смещений инструмента в нормальной плоскости передачи А) для шестерни Б) для колеса	$X_1 = kX_\Sigma$ $X_2 = (1-k)X_\Sigma$
11.	Коэффициенты смещений инструмента в торцевой плоскости передачи А) для шестерни Б) для колеса	$X_{T1} = X_1\cos\beta_1/\cos\delta_{W1}$ $X_{T2} = X_2\cos\beta_2/\cos\delta_{W2}$
12.	Коэффициент суммы смещений инструмента в торцевой плоскости передачи	$X_{\Sigma T} = X_{T1} + X_{T2}$
13.	Угол наклона линии зуба на делительном цилиндре	$\gamma_{П,Л1} = \arctan\left(\frac{\sin\beta_1\cos\delta_1 \pm \tan\alpha\sin\delta_1}{\cos\beta_1}\right)$ $\gamma_{П,Л2} = \arctan\left(\frac{\sin\beta_2\cos\delta_2 \pm \tan\alpha\sin\delta_2}{\cos\beta_2}\right)$

Продолжение табл.

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула
14.	Угол наклона линии зуба на основном цилиндре А) для шестерни Б) для колеса	$\gamma_{B1П,Л} = \arctan\left(\tan\gamma_{1П,Л}\cos\alpha_{T1П,Л}\right)$ $\gamma_{B2П,Л} = \arctan\left(\tan\gamma_{2П,Л}\cos\alpha_{T2П,Л}\right)$
15.	Радиусы начальных окружностей А) для шестерни Б) для колеса	$r_{W1} = mz_1/\left(2\cos\beta_1 x_{\alpha T1}\right)$ $r_{W2} = mz_2/\left(2\cos\beta_2 x_{\alpha T2}\right)$
16.	Кратчайшие межосевое расстояние в передаче	$a_W = \frac{\cos\delta_{W1}\cos\delta_{W2}\sin\left(\beta_{W1}+\beta_{W2}\right)}{\sin\Sigma}\left(\frac{r_{W1}}{\cos\delta_{W1}}+\frac{r_{W2}}{\cos\delta_{W2}}\right)$
17.	Расстояние от линии кратчайшего межосевого расстояния до начального сечения А) для шестерни Б) для колеса	$e_1 = \left\lvert r_{W1}\tan\delta_{W1} - \left(\frac{r_{W1}}{\cos\delta_{W1}}+\frac{r_{W2}}{\cos\delta_{W2}}\right)\right\rvert \frac{\sin\delta_{W1}+\sin\delta_{W2}\cos\Sigma}{\sin^2\Sigma}$ $e_2 = \left\lvert -r_{W2}\tan\delta_{W2} + \left(\frac{r_{W1}}{\cos\delta_{W1}}+\frac{r_{W2}}{\cos\delta_{W2}}\right)\right\rvert \frac{\sin\delta_{W2}+\sin\delta_{W1}\cos\Sigma}{\sin^2\Sigma}$
18.	Коэффициент воспринимаемого смещения в нормальной плоскости передачи	$\Delta y = \frac{z_1\cos\delta_{W1}\left(1/x_{\alpha T1}-1\right)}{2\cos\beta_1} + \frac{z_2\cos\delta_{W2}\left(1/x_{\alpha T2}-1\right)}{2\cos\beta_2}$
19.	Коэффициент уравнительного смещения в нормальной плоскости передачи	$\Delta y = x_\Sigma - y$
20.	Коэффициент воспринимаемого смещения в торцевой плоскости А) для шестерни Б) для колеса	$\Delta y_{T1} = \Delta y\cos\beta_1/\cos\delta_{W1}$ $\Delta y_{T2} = \Delta y\cos\beta_2/\cos\delta_{W2}$
21.	Коэффициент высоты головки исходного контура в торцевой плоскости А) для шестерни Б) для колеса	$h^*_{aT1} = h^*_a\cos\beta_1/\cos\delta_1$ $h^*_{aT2} = h^*_a\cos\beta_2/\cos\delta_2$
22.	Коэффициент радиального зазора А) для шестерни Б) для колеса	$C^*_{T1} = C^*_1\cos\beta_1/\cos\delta_1$ $C^*_{T2} = C^*_2\cos\beta_2/\cos\delta_2$

Окончание табл.

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула
23.	Радиус вершин зубьев в начальном сечении А) для шестерни Б) для колеса	$r_{aW1} = \frac{m}{\cos\beta_1}\left(z_1/2 + h^*_{aT1} + X_{T1} - \Delta y_{T1}\right)$ $r_{aW1} = \frac{m}{\cos\beta_1}\left(z_1/2 + h^*_{aT1} + X_{T1} - \Delta y_{T1}\right)$
24.	Угол между средней линией производящей рейки и характеристикой А) для шестерни Б) для колеса	$\lambda_{W1П,Л} = \arctan\left(\pm\tan\beta_{W1}\sin\alpha_W - \frac{\tan\delta_{W1}\cos\alpha_W}{\cos\beta_{W1}}\right)$ $\lambda_{W2П,Л} = \arctan\left(\pm\tan\beta_{W2}\sin\alpha_W - \frac{\tan\delta_{W2}\cos\alpha_W}{\cos\beta_{W2}}\right)$
25.	Угол между характеристиками на поверхности производящей рейки	$\lambda_{П,Л} = \lambda_{W2П,Л}\lambda_{W1П,Л}$
26.	Главные радиусы кривизны эвольвентных геликоидов в полюсе зацепления	$\rho_{Г1П,Л} = r^2_{W1}\sin\alpha_{WT1П,Л}/\cos\gamma_{B1П,Л}$ $\rho_{Г2П,Л} = r^2_{W2}\sin\alpha_{WT2П,Л}/\cos\gamma_{B2П,Л}$
27.	Отрезок линии зацепления от полюса до вершин зубьев шестерни	$PB'_{П,Л} = \left\lvert\min\left\{\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right\}\right\rvert$, где $a = \frac{1}{\tan^2\gamma_{B1П,Л}} - \tan^2\delta_1$ $b = 2\left(\frac{r_{W1}\sin\alpha_{WT1П,Л}}{\tan\gamma_{B1П,Л}} + r_{aW1П,Л}\tan\delta_1\right)$ $c = r^2_{W1} - r^2_{aW1}$
28.	Отрезок линии зацепления от полюса до вершин зубьев колеса	$PB'_{П,Л} = \left\lvert\min\left\{\frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right\}\right\rvert$, где $a = \frac{1}{\tan^2\gamma_{B2П,Л}} - \tan^2\delta_2$ $b = 2\left(\frac{r_{W2}\sin\alpha_{WT2П,Л}}{\tan\gamma_{B2П,Л}} + r_{aW2П,Л}\tan\delta_2\right)$ $c = r^2_{W2} - r^2_{aW2}$
29.	Коэффициенты перекрытия А) для левых сторон зубьев Б) для правых сторон зубьев	$\varepsilon_Л = \frac{PB'_Л + PB''_Л}{\pi m\cos\alpha}$ $\varepsilon_П = \frac{PB'_П + PB''_П}{\pi m\cos\alpha}$

Разработанная программа позволяет определять основные геометрические характеристики зацепления, необходимые для прогнозирования несущей способности контакта гиперболоидных передач.

Библиографический список

1. Ерёмин, В.П. Создание нового поколения электромеханических приводов трансформируемых систем космических аппаратов / В.П. Ерёмин, Н.В. Ерёмин, А.Н. Кирилин, Б.А. Лопатин, С.А. Петрищев, Н.П. Родин, В.М. Рублев, Ю.Н. Секисов. – Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогрэсс», 2011. – 563 с.

2. Болотовский, И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / И.А. Болотовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

К содержанию

УДК 666.942-16

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ДОБАВКИ-УСКОРИТЕЛИ ДЛЯ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТОВ

А.А. Кирсанова, П.Н. Киль

Исследовано влияние добавок-ускорителей на структуру и свойства бетонов на шлакопортландцементах. В качестве ускорителей использовали микрокремнезем, метакаолин, формиаты натрия и кальция. Выявлено, что наиболее эффективное влияние на свойства бетона на ШПЦ 300 оказывают комплексы включающие Glenium Ace 430 с микрокремнеземом или формиатом кальция, на ШПЦ 400 наиболее предпочтительно использовать комплексы с формиатом натрия. В начальные сроки твердения наибольший эффект оказал комплекс «Glenium Ace 430 + метакаолин» вне зависимости от вида вяжущего.

Ключевые слова: добавки-ускорители, метакаолин, микрокремнезем, формиат кальция, формиат натрия, шлакопортландцемент.

Высокие темпы строительного производства, на ряду с стремлением к энергосбережению и решению экологических проблем, приводят к актуализации применения комплексных добавок при изготовлении бетона. Использование различных добавок как отдельно, так и в комплексе позволяет получать бетоны со строго определенными свойствами, при различных условиях твердения. Особый интерес для производства бетона представляет использование шлакопортландцементов, с одновременным снижением энергозатрат на производство.

Активация твердения и набора прочности бетонов на шлакопортландцементах как правило обеспечивается тепло-влажностной обработкой, или совместным применением ТВО и добавок ускорителей гидратации шлаковых составляющих и стекла. Ранее проведенные исследования [1] позволили получить бетоны на шлакопортландцементах с применением ТВО, с высокой прочностью, долговечностью и химической стойкостью к воздействию агрессивных сред. Особый интерес, в связи с внедрением в технологии бетона энергосбережения, представляет получение высокоэффективных бетонов на ШПЦ твердеющих в нормальных условиях с использованием добавок-ускорителей.

В качестве наиболее эффективных добавок – ускорителей применяют хлориды кальция, железа, алюминия, сульфаты натрия, калия и алюминия, нитраты натрия, кальция, и другие соли-электролиты [2]. Однако, хлориды и сульфаты способны вызывать коррозию арматуры и снижать долговечность бетона, вследствие чего, их применение в производстве бетонов ограничено. В связи с этим в настоящее время в качестве ускорителей предпочтительно используют формиаты кальция и натрия, нитраты натрия и кальция, тиосульфаты щелочных, щелочно-земельных металлов и роданидов [3].

Кроме солей для ускорения гидратации и твердения цементного камня и бетона также применяют активные минеральные добавки (АМД). В качестве АМД используют побочные продукты промышленности или специально полученные добавки, такие как микрокремнезем (МК), метакаолин (МН) и др.[4].

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка эффективных комплексных добавок, включающих пластификатор и ускоритель твердения, способствующих повышению ранней и марочной прочности бетонов на ШПЦ при твердении в нормальных условиях.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать комплексные добавки «пластификатор-ускоритель», исследовать их влияние на структуру и свойства цементного камня и бетона.

В работе применяли магнитогорский ШПЦ 400, ШПЦ 300 по ГОСТ 10178-85; добавки – ускорители: метакаолин (МН) производства ЗАО «Пласт-Рифей», ТУ 5729–095–51460677–2009; гранулированный микрокремнезем (г. Новокузнецк Кемеровской обл.) (МК), ТУ 5743–048–02495332–96; формиат натрия (ФН) и формиат кальция (ФК).

Для водоредуцирования использовали поликарбоксилатную добавку «Glenium Ace 430» производства ООО «BASF Строительные системы». Дозировка Glenium Ace 430 (СЭП) принята 0,8 % от массы вяжущего.

Все исследования производились на бетонных образцах–кубах с ребром 10см, твердевших при температуре 20±2 ^{0}С и с влажностью 95–100 %. Фазовый состав оценивали с помощью ДТА на дериватографе системы LuxxSTA 409, РФА на дифрактометре ДРОН–3М, модернизированном приставкой PDWin.

Для сравнения и выбора наиболее эффективных ускорителей твердения бетона были приняты активные минеральные добавки (микрокремнезем и метакаолин), формиаты натрия и кальция, а также нитрат кальция. При оценке влияния нитрата кальция на набор прочности цементного камня установлено, что он менее эффективен по сравнению с остальными добавками – ускорителями, поэтому его исключили из дальнейших исследований. В соответствии с ранее сказанным, были приняты следующие модификаторы: метакаолин (МН) + Glenium Ace 430, микрокремнезем (МК) + Glenium Ace 430, формиат натрия (ФН) + Glenium Ace 430 и формиат кальция (ФК) + Glenium Ace 430. Изучение влияния комплексных добавок-ускорителей на набор прочности бетона при нормальном твердении подтвердило эффективность рассматриваемых добавок. Кинетика набора прочности бетона с комплексными добавками до 28 суток твердения в нормальных условиях на ШПЦ 300 представлена на рис. 1.

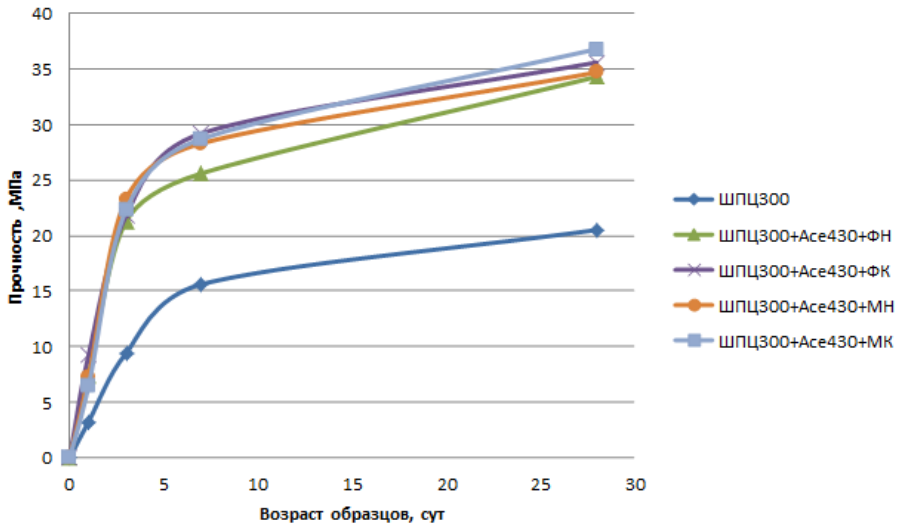


Рис. 1. Набор прочности бетона с модификаторами
до 28 суток твердения в нормальных условиях на ШПЦ 300

Из полученных зависимостей (рис.1.) следует, что применение всех модификаторов на ШПЦ 300 уже к 3 суткам твердения обеспечивает 75 % от марочной прочности, в то время как контрольный состав в 28 суток не набрал и 70 % от марки.

Результаты набора прочности бетона на ШПЦ 400 (рис. 2.) выявили, что применяемые комплексные добавки на 3 сутки твердения обеспечивают набор прочности образцов до 60–70 % от марочной прочности. Контрольный состав в марочном возрасте набрал только 60 %.

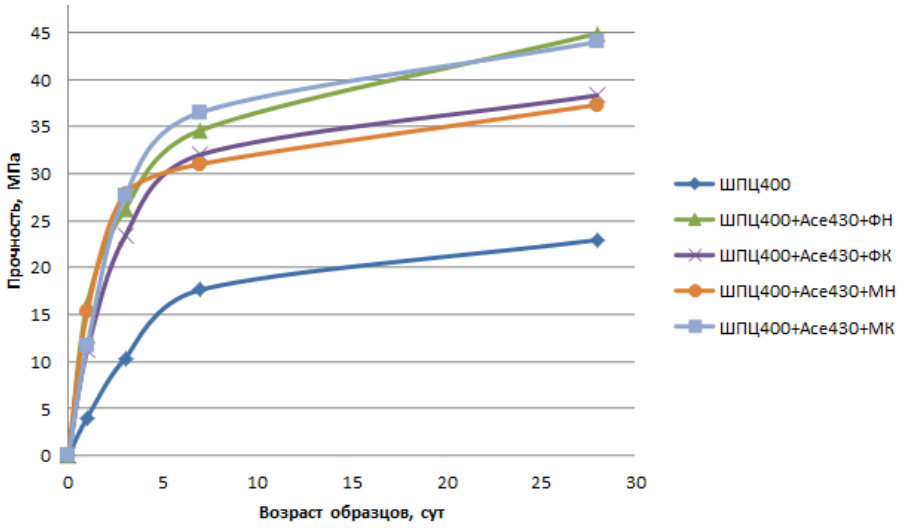


Рис. 2. Набор прочности бетона с модификаторами
до 28 суток твердения в нормальных условиях на ШПЦ 400

Кроме этого, следует отметить, что для всех видов ШПЦ к 28 суткам твердения без тепловой обработки, использование модификаторов с микрокремнеземом наиболее предпочтительно, они позволяют получить прочность выше, чем у контрольного состава на 80 %. Влияние остальных модификаторов на набор прочности ШПЦ 300 примерно на одном уровне, а в случае применения рассмотренных модификаторов на ШПЦ 400 наиболее предпочтителен ФН.

По данным ДТА и РФА можно установить, что все составы с комплексными добавками слабозакристаллизованны и представлены в основном гидросиликатными фазами CSH I, CSH II, гидроаллюминатами типа C_3AH_6, C_4AH_{13}, CAH_{10} не склонных к последующей перекристаллизации, гидрогранатами и гидроксидом кальция в количестве 2–2,5 %.

Введение ФН способствует образованию гидросиликатов кальция низкой основности, предпочтительно тоберморитоподобных в сочетании с CSH I, CSH II фазами, что, вероятно, приводит к повышению прочности камня.

При использовании комплекса «Glenium Ace 430 + МН» в структуре образуются гелевидный тоберморит, слабозакристаллизованные фазы CSH I, CSH II, до 2 % гидроксида кальция и стабильные гидроалюминаты. Применение комплексной добавки «Glenium Ace 430 + МК» способствует формированию структуры с большим количеством стабильных гидроаллюминатов, гидрогранатов, гелевидного тоберморита и фаз CSH I, CSH II и с содержанием гидроксида кальция до 2 %. Применение комплекса с ФН приводит к увеличенному количеству содержания гелевидной фазы, включающей тоберморит и другие гидросиликаты кальция, а также стабильные гидроалюминаты, количество гидроксида кальция повышается до 2,5 %. Система «Glenuim Ace 430 + ФК» значительно аморфизированна, состоит

предпочтительно из гелевидных образований, отмечено также присутствие гидроаллюминатов и гидроксида кальция до 2 %. Следовательно присутствие в бетонах с добавками-ускорителями всегда присутствует не менее 2 % гидроксида кальция, что должно обеспечивать сохранность арматуры.

Таким образом, введение разработанных модификаторов позволяет:

– получить высокоэффективные бетоны нормального твердения на ШПЦ 400 и ШПЦ 300;

– повысить скорость набора прочности шлакопортландцементов при нормальном твердении в возрасте 3-х суток на 90 % для ШПЦ 400 и на 80 % для ШПЦ 300 по сравнению с бездобавочными составами;

– модифицировать структуру цементного камня с преобладанием низкоосновных ГСК и стабильных гидроалюминатов кальция;

– получить на ШПЦ 300 и ШПЦ 400 бетоны классов В30…В35 и выше соответственно с применением комплексных добавок без дополнительной тепловой обработки и одновременно обеспечивать сохранность арматуры.

Библиографический список

1. Трофимов, Б.Я. Морозостойкость пропаренного бетона на шлакопортландцементах / Б.Я. Трофимов, Г.Г. Михаилов, Е.А. Гамалий // Вестник ЮУрГУ. – 2011. – Вып. 14. – № 17. – С. 33–37.

2. Рамачандран, В. Добавки в бетон: Справочное пособие / В. Рамачандран. – М.: Стройиздат, 1988. – С. 575, 9.

3. Ратинов, В.Б. Добавки в бетон / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. – М.: Стройиздат, 1989. – 187 с.

4. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. – М: Технопроект, 1998. – 768 с.

5. Heikal M. Effect of Calcium formate as an accelerator on the physiochemical and mechanical properties of pozzolanic cement pastes // Cement and Concrete Research. 2004. № 34. Pp. 1051–1056.

К содержанию

УДК 621.774.6

ХОЛОДНАЯ ГИБКА С РАСКАТЫВАНИЕМ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

А.В. Козлов, А.В. Бобылев, Е.В. Халиулин

В статье рассмотрены проблемы холодной гибки труб из нержавеющих и титановых сплавов. Проанализированы характерные особенности холодной гибки, которые в значительной степени зависят от основных механических свойств материала изгибаемой трубы. Проведенные исследования подтвердили возможность холодной гибки труб из коррозионностойких сталей и титановых сплавов. Гофрообразование отсутствовало, овальность не превышала 5 %.

Ключевые слова: холодная гибка труб, предел текучести, механические свойства материала, раскатной инструмент.

Криволинейные участки трубопроводов широко применяются в народном хозяйстве в качестве пологих отводов для магистральных и локальных трубопроводов: отводы гнутые ТУ 102-488-95, отводы гнутые ТУ 51-515-91, отводы гнутые ГОСТ 24950-81 и др. Еще более часто применяются крутозагнутые отводы: отводы крутозагнутые ГОСТ 17375-2001, калачи, утки и др. Особенно в большом объеме они используются в газовой и нефтяной промышленности, в коммунальном хозяйстве, химической и атомной промышленности, авиа- и ракетостроении, автомобиле- и тракторостроении. Технологические трубопроводы на промышленных объектах соединяют между собой технологические аппараты и машины. Основные характеристики пологих и крутозагнутых отводов приведены в табл. 1 и на рис. 1 [1].

Таблица 1

Основные характеристики пологих и крутозагнутых отводов

Параметры	Значение
Рабочее давление PN (P_p)	До 32,0 МПа
Наружный диаметр D	32-530 мм
Температура t, ºС	От –72º до +650º
Угол гиба, град	15, 30, 45, 60, 90
Угол поворота	От 15º до 90º
Радиус гиба R	От 2 до 5 $Д_у$
Толщина стенки S	От 6,0 до 40,0 мм
Материал	12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 15Х5М, 10Х17Н13М2Т

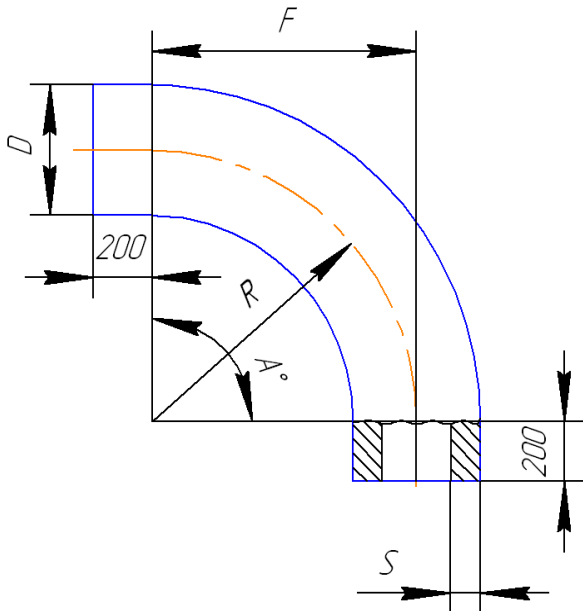


Рис. 1. Отвод гнутый ТУ 51-515-91 и крутозагнутый ГОСТ 17375-2001 и их основные характеристики

Как показывает анализ наиболее распространенных методов гибки труб для изготовления криволинейных трубопроводов необходимо обеспечить существенное снижение изгибаемого усилия [1].

Возможность холодной гибки описанным выше методом в значительной степени зависит от основных механических свойств материала изгибаемой трубы (табл. 2) [3, 4].

Таблица 2

Пластичность металлов

Материал	Предел текучести, МПА	Относительное удлинение δ, %	Временное сопротивление, МПА
Сталь 10	205	31	330
Сталь 20	245	25	410
Сталь 45	355	16	600
12Х18Н10Т	196	40	510
12Х18Н9Т	196	40	540
ВТ1-0	340	20	345
ВТ1-00	240	25	295
ВТ3-1	955	13	1055

Наиболее важным параметром для холодной гибки является относительное удлинение δ.

Метод холодной гибки труб с раскатыванием [2] нашел достаточно большое распространение в отечественной промышленности. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования [1] позволили раз-

работать конструкции станков, которые охватывают диапазон изгибаемых труб от 20 до 200 мм в диаметре, которые в основном были предназначены для гибки труб из низкоуглеродистых и качественных углеродистых сталей (сталь 10, 20, 45).

В последнее время нами был получен новый заказ для нефтехимической промышленности – изготовление теплообменного оборудования.

Наилучшим образом для этих целей подходят трубы толщиной 5–6 мм из стали 12Х18Н10Т, поскольку эта сталь обладает высокими антикоррозийными свойствами, имеет весьма длительный срок работы при температуре до 600 ºС, позволяет получать прочные и герметичные сварные соединения и выдерживать высокие давления [5]. Вместе с тем, при ее гибке с раскатыванием происходит значительное укатывание внутренней поверхности трубы, а следовательно, окружные растягивающие деформации и раздача трубы по внутреннему диаметру. Это приводит к уменьшению фактического натяга и может вызвать потерю устойчивости стенок изгибаемой трубы и образование гофр. Для устранения данной проблемы пришлось увеличить натяг на 20…25 %. Вызванное этим увеличение контактных напряжений сказалось на стойкости деформирующих элементов и раскатного инструмента в целом.

В ходе контрольных экспериментов было изогнуто 65 труб диаметром 57 мм и толщиной стенки 5 мм из стали 12Х18Н10Т. Гибка осуществлялась на угол 180º (рис. 2) [1].

Рис. 2. Изогнутые трубы Ø57×5 из стали 12Х18Н10Т

Вызывает интерес возможность гибки этим методом тонкостенных труб из титановых сплавов. Для проверки такой возможности была изготовлена специальная лабораторная установка (рис. 3, 4), которая имеет следующую конструкцию.

На сварной корпус 1 станка установлен шпиндельный узел 2 со шпинделем 6 и борштангой 3. На конце борштанги 3 закреплена раскатка 4. В качестве привода главного движения использовалась электродрель мощностью 0,95 кВт с частотой вращения n = 450 об/мин. Вращение от электродрели 5 передается борштанге 3 и раскатке 4. На борштангу 3 устанавливается изгибаемая труба, для фиксации которой имеются упоры 10. Изгибаемое усилие передается рукояткой 7, поворотом которой, при помощи червячной передачи 8, вращение сообщается гибочному ролику 9, а по его шаблону происходит изгиб трубы.

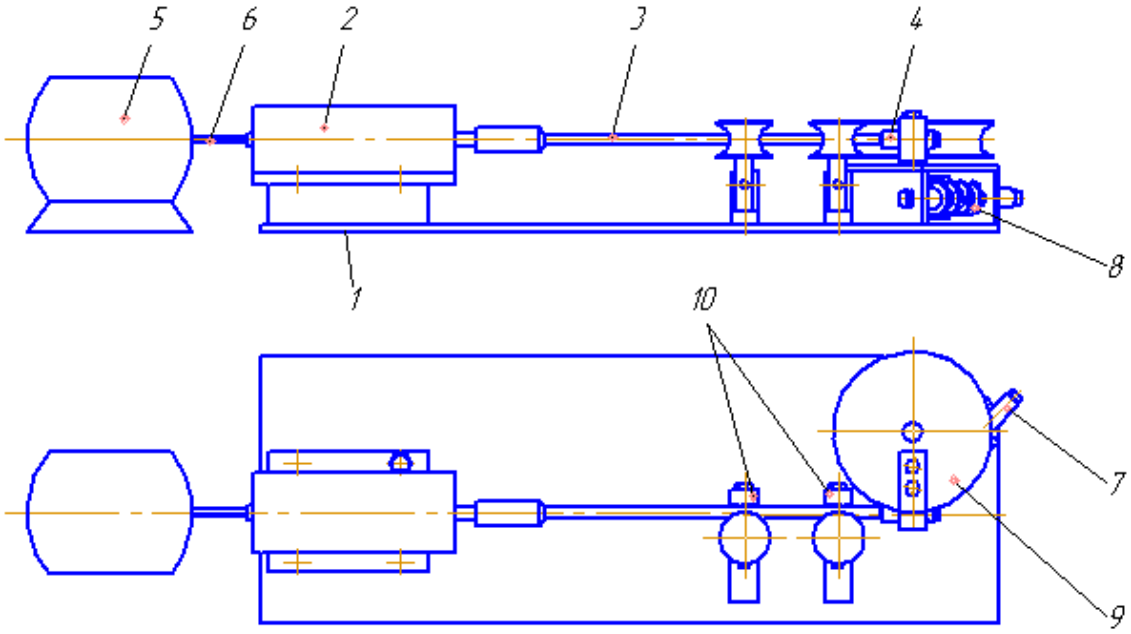


Рис. 3. Схема установки для гибки мелкоразмерных труб

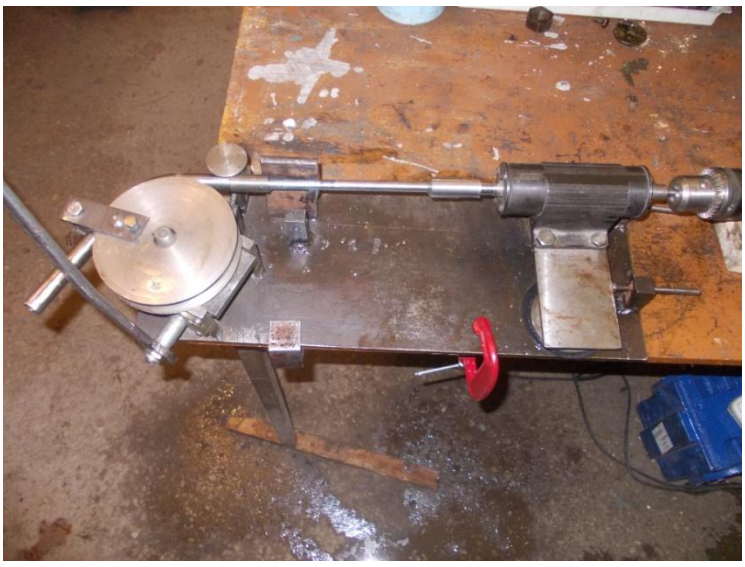


Рис. 4. Установка для гибки мелкоразмерных труб

Для проверки возможности холодной гибки труб из титановых сплавов была проведена серия натурных экспериментов. Материал изгибаемой трубы – титановый сплав ВТ1-0, внутренний диаметр трубы – 14 мм, наружный диаметр трубы – 17 мм, частота вращения электродвигателя – 450 об/мин, частота вращения рукоятки трубогиба – 0,5 об/мин, натяг составил 1 мм. В качестве охлаждения применялась вода. Была осуществлена гибка на угол 30–45º, с радиусом гиба 60 мм. Образование гофр не наблюдалось, овальность – в пределах 5 %.

Таким образом, проведенные натурные эксперименты подтвердили возможность холодной гибки тонкостенных титановых труб и трубчатых изделий.

Для промышленного применения нового метода при гибке труб из нержавеющих и титановых сплавов требуется разработка специального оборудования и уточнение режимов гибки.

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.

2. Пат. 818707 Российская Федерация. Способ гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич. Бюл. № 13. 1981.

3. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1. / под ред. И.Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.

4. Краткий справочник металлиста / С.В. Аврутин, В.Н. Гриднев, В.П. Законников и др.; под ред. А.Н. Малова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 1972.

5. Бейлард, П.П. Напряжение от локальных нагрузок в цилиндрических сосудах давления / П.П. Бейлард // Вопросы прочности цилиндрических оболочек. – М.: Оборонгиз, 1960.

К содержанию

УДК 621.774.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ГИБКЕ ТРУБ С ОБКАТЫВАНИЕМ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МОДУЛЯ

А.В. Козлов, А.Л. Суворов

В данной работе была исследована технология холодной гибки труб методом обкатывания, разработано приспособление для измерения усилия гибки труб, приведены теоретические и экспериментальные исследования. Был спроектирован автоматизированный модуль гибки труб с обкатыванием на базе существующей лабораторной установки, разработана его функциональная схема.

Ключевые слова: гибка труб; исследование; автоматизированный модуль; лабораторная установка.

Гибка труб – основная операция технологического процесса изготовления криволинейных деталей трубопроводов. В современных промышленных условиях очень сложно произвести качественную холодную гибку труб диаметром более 60 мм. В Южно-Уральском государственном университете на кафедре технологии машиностроения, станков и инструментов разработана технология холодной гибки труб с обкатыванием. Применение такой технологии позволяет в 2–3 раза снизить усилия гиба и энергоемкость, а также полностью исключить сплющивание и гофрообразование. Новая технология позволяет сохранять различные виды покрытий, нанесенные на внутреннюю поверхность трубы (рис. 1).

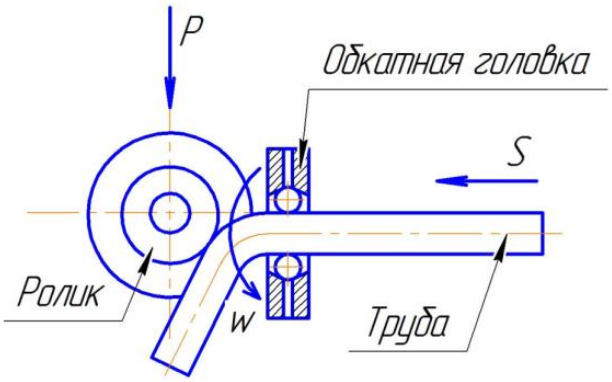


Рис. 1. Схема гибки труб с обкатыванием

В основе данной технологии лежит создание в изгибаемой трубе перемещающейся пластической зоны, в каждой точке которой под воздействием сосредоточенных радиальных сил возникают знакопеременные изгибные напряжения стенок трубы. Схема деформации трубы при ее обкатывании по наружной поверхности представлена на рис. 2 [1–3].

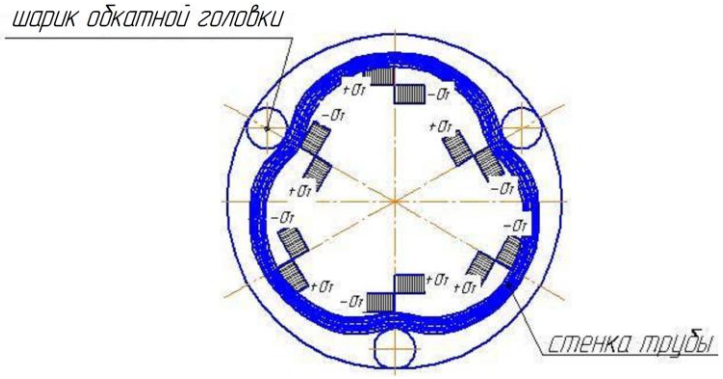


Рис. 2. Схема деформации трубы при обкатывании

На начальном этапе исследования теоретически было рассчитано усилие, необходимое для гибки труб без использования обкатного инструмента. Расчеты были произведены на основе известных зависимостей из условия прочности материала трубы [4]. Установлено, что изгиб трубы Ø 60 мм с толщиной стенки 3 мм из стали 20 (ГОСТ 1050-88) начинается при воздействии на неё поперечной силы равной P = 23 000 Н.

Для получения экспериментальных данных об усилиях гибки при различных параметрах была спроектирована лабораторная установка. Кинематическая схема лабораторной установки показана на рис. 3. Вращение от двигателя 6 через ремённую передачу сообщается червяку 7, червяк, в свою очередь, передает вращение на червячное колесо, соединенное с цепной передачей 8, которая вращает ходовой винт подачи трубы 9. Главное движение от электродвигателя 5 передаётся на обкатную головку 1. При помощи прижимного ролика 3 происходит фиксация трубы в направляющей 2 и создается изгибающее усилие. Труба 4 устанавливается в обкатную головку 1, другой конец трубы упирается в подающий винт 9.

Для получения экспериментальных данных об усилиях гибки при различных параметрах в прижимной механизм был установлен динамометр. За основу был принят серийный динамометр сжатия модели ДС-3. Разработано приспособление для крепления динамометра на установке (рис. 4).

После проведения ряда экспериментов выявилось неудобство в использовании механического динамометра. Одним из его главных недостатков является отсутствие автоматической записи показаний. Применение автоматизированного устройства регистрации усилия позволило бы решить данную проблему, а также повысить точность измерения.

При разработке автоматизированного модуля были рассмотрены основные аналоги и виды датчиков, которые в них используются. В нашем устройстве за основу были взяты тензометрические резисторы КФ5П1-10-200, подключенные по схеме «4 активных тензорезистора» (рис. 5). Данная схема подключения применима для измерения деформации изгиба. Она термокомпенсирована и исключает температурную погрешность кабеля.

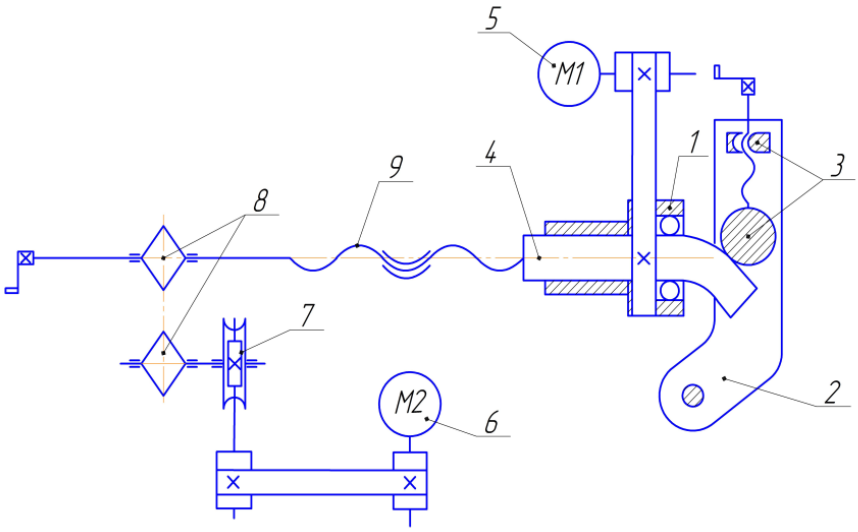


Рис. 3. Кинематическая схема лабораторной установки

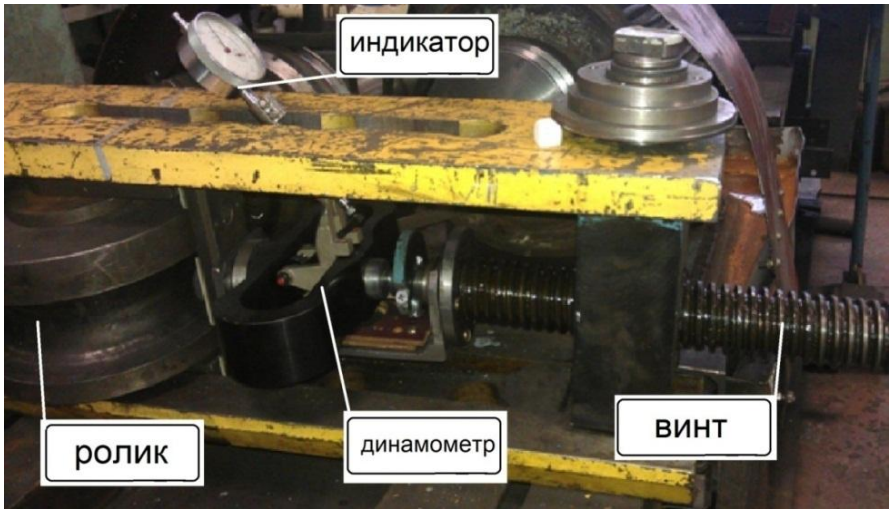


Рис. 4. Динамометр на прижимном ролике

Датчики 2 установлены на скобу динамометра 1 (рис. 6) с использованием клея марки БФ-6. Функциональная схема автоматизированного модуля представлена на рис. 7.

В одну диагональ мостовой схемы подается переменное напряжение номиналом 7,5 В. С другой диагонали моста снимается выходное напряжение (сигнал), зависящее от степени деформации скобы, с наклеенными на нее тензорезисторами. Так как выходной сигнал очень маленький (десятые доли микровольта) в схему встроен операционный усилитель с коэффициентом усиления K=100. Усилитель запитан от блока питания переменного тока с выходным напряжение 8,5 В. Далее выходной сигнал подается на линейный вход звуковой платы персонального компьютера. Для стабилизации напряжения в сети используется стабилизатор напряжения модели UPOWER ACH-500 с цифровым дисплеем.

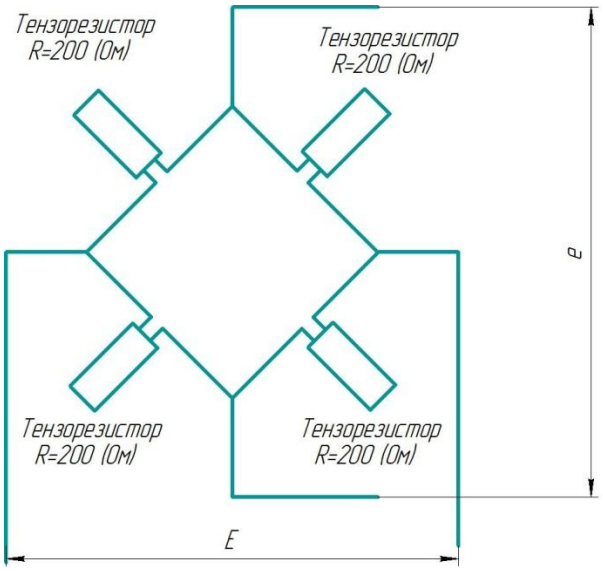


Рис. 5. Схема подключения тензорезисторов

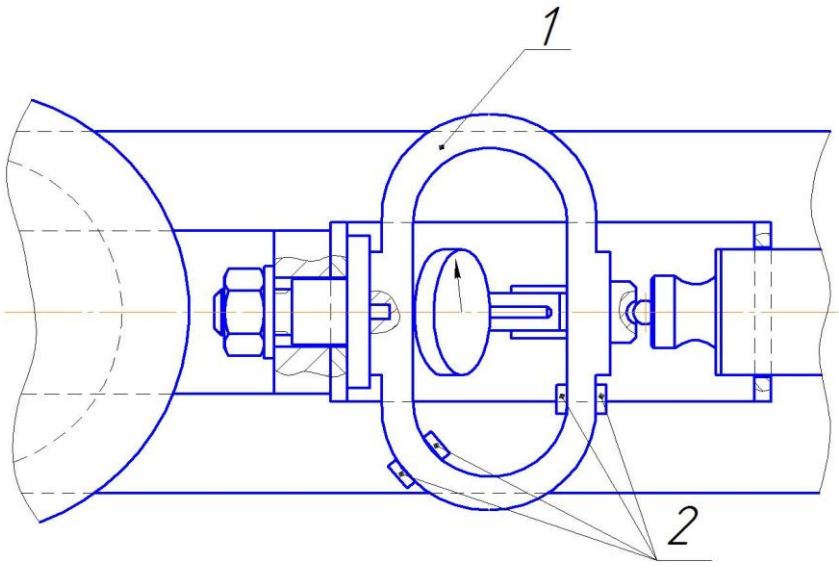


Рис. 6. Схема крепления датчиков

Регистрация изменения выходного сигнала производится с помощью программного обеспечения Power Graph 2.2. Данная программа имеет функцию осциллографа-самописца и позволяет записывать изменения входного сигнала с интервалом до 0,2 с.

Была выполнена поверка на динамометре с использованием индикатора часового типа и автоматизированного модуля (рис. 8), построен тарировочный график (рис. 9).

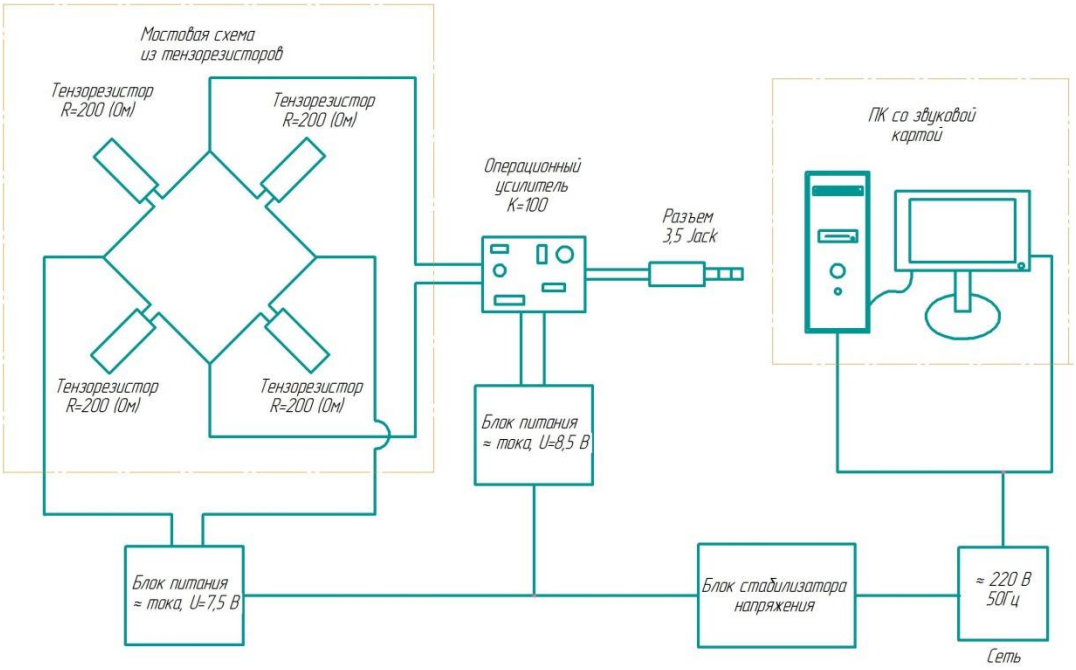


Рис. 7. Функциональная схема автоматизированного модуля

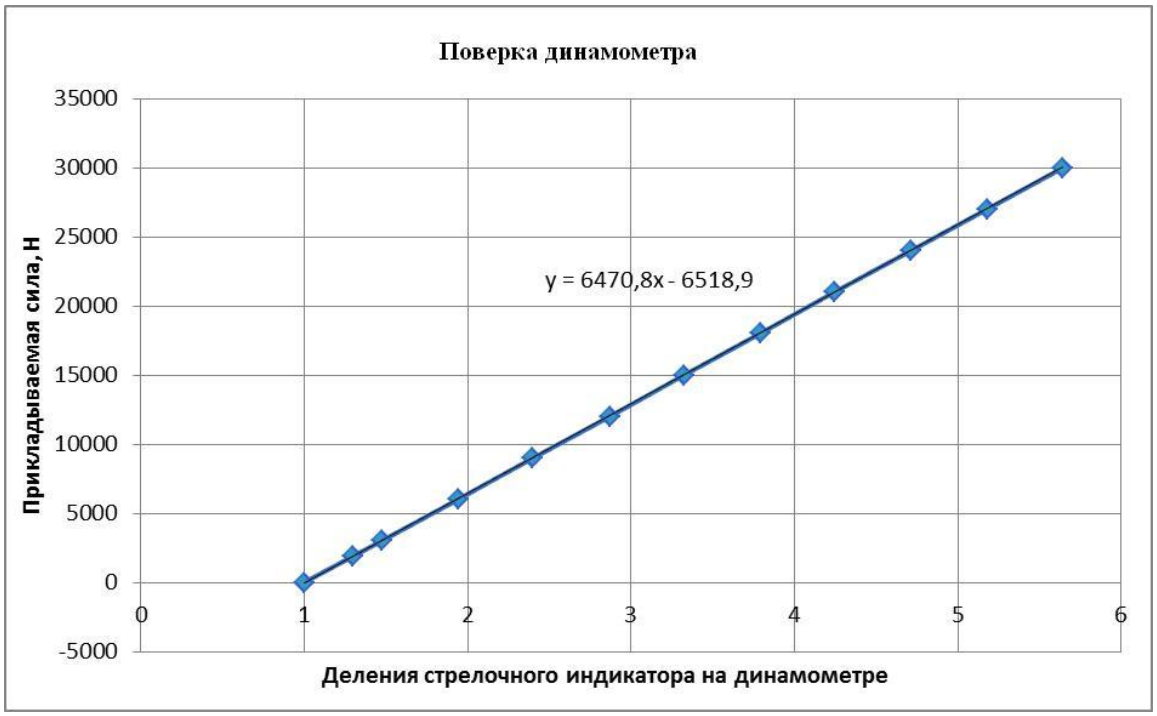


Рис. 8. График зависимости приложенной нагрузки
на динамометр от показаний стрелочного индикатора

С использованием автоматизированного модуля была проведена серия экспериментов с обкатыванием изгибаемой трубы на различных режимах гибки, главными из которых являются натяг обкатной головки и скорость продольной подачи трубы.

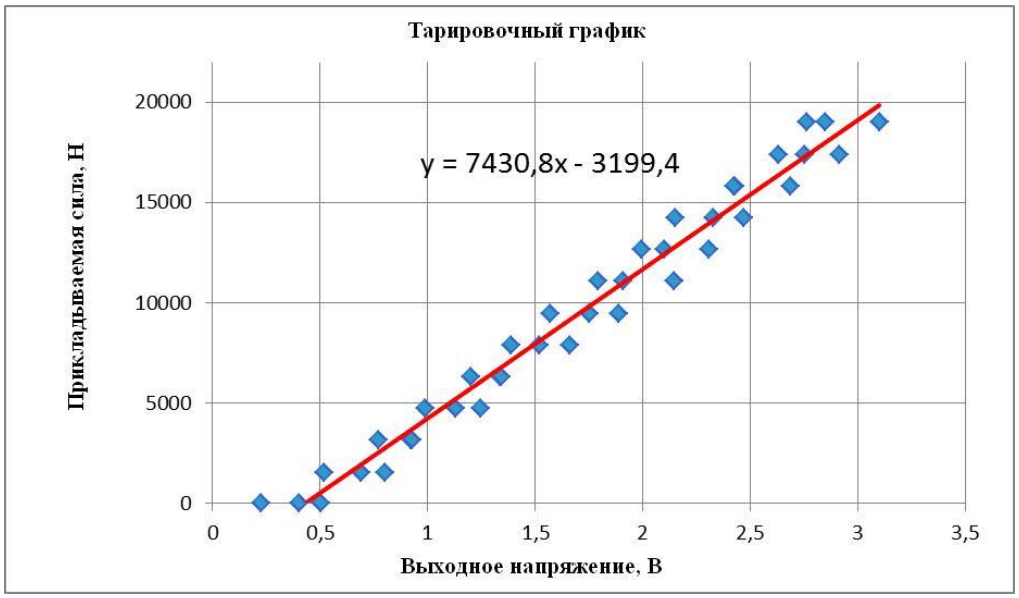


Рис. 9. График зависимости силы, прикладываемой при гибки труб, от выходного напряжения устройства

В качестве образцов для проведения эксперимента были использованы трубы из стали 20. Геометрические параметры образцов: длина – 1200 мм; диаметр – 60 мм; толщина стеки – 3 мм.

Результаты измерений представлены в таблице и в графическом виде на рис. 10, 11. Проанализировав полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1) наименьшее усилие гибки достигалось при минимальном значении продольной подачи. При увеличении подачи в 4 раза усилие гибки трубы возрастает на 11,5–20,5 %;

2) при гибке трубы с обкатыванием сохраняется внутреннее защитное покрытие трубы.

3) полученные данные позволяют уточнить режимы гибки труб и технические характеристики станков.

Таблица

Результаты проведения эксперимента

Натяг, мм	Подача, мм/мин	Усилие гибки в установившемся режиме, Н
0,5	50	9500
	60	9800
	70	10700
1	50	8100
	60	7100
	70	8900
1,5	50	3000
	60	3200
	70	3500

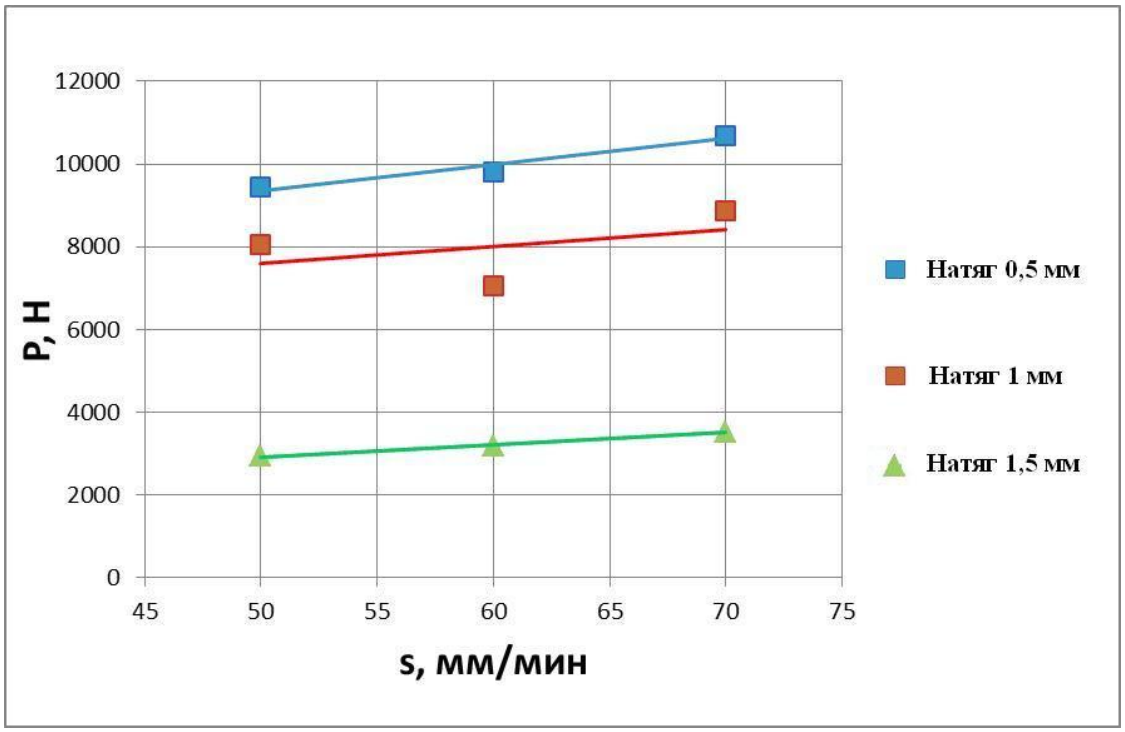


Рис. 10. График зависимости усилия от подачи в установившемся режиме гибки

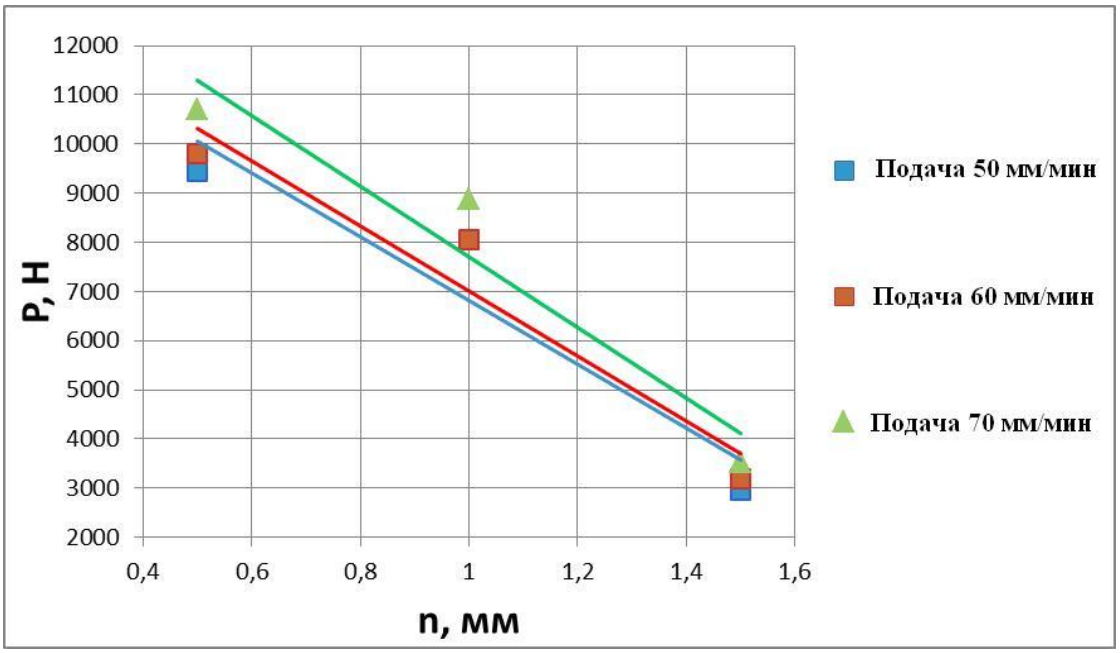


Рис. 11. График зависимости усилия от натяга в установившемся режиме гибки

При проведении серии экспериментов запись показаний производилась с двух приборов: динамометра сжатия, расположенного на установке, и разработанного автоматизированного модуля. После обработки результатов было установлено, что средняя ошибка регистраций показаний с устройства не превышает 2 %.

Библиографический список

1. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.

2. Козлов, А.В. Новая технология гибки труб / А.В. Козлов, С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич // Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки. – Челябинск: ЧГТУ, 1993.

3. Козлов, А.В. Холодная гибка с воздействием на изгибаемую трубу вращающимся раскатником-обкатником / А.В. Козлов, И.П. Дерябин // Надежность и качество в промышленности, энергетике и на транспорте: труды междунар. конф. – Самара: СамГТУ, 1999. – Ч. 1.

4. Беляев, Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Наука, 1976.

К содержанию

УДК 621.774.6:669.14

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГИБКИ С РАСКАТЫВАНИЕМ ТРУБ ИЗ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ДИАМЕТРАМИ 25–40 ММ

А.В. Козлов, А.Е. Чумичёв

По результатам экспериментов по гибке с раскатыванием трубы Ø25 из стали 20Х13 были сделаны выводы о необходимости проектирования более мощной и многофункциональной лабораторной установки.Процесс ее разработки рассмотрен в данной статье.

Ключевые слова: гибка труб; раскатывание; оборудование.

Для рациональной компоновки трубопроводов и других изделий, изготавливаемых из труб, требуется большое количество их криволинейных участков. Гибка труб является одной из основных операций технологического процесса изготовления криволинейных деталей трубопроводов. Однако в современных производственных условиях осуществить качественную гибку труб в холодном состоянии достаточно сложно. Связано это с тем, что она сопровождается такими нежелательными для последующей эксплуатации явлениями, как утонение стенки на внешней части гиба, сплющивание поперечного сечения, образование гофр и изломов на внутренней части гиба. Основным приемом снижения усилий гибки и повышения пластических свойств материала трубы является нагрев. Однако его применение требует значительных энергозатрат и использования сложного дорогостоящего оборудования.

Разработанная в ЮУрГУ технология гибки тонкостенных труб с раскатыванием устраняет многие из перечисленных выше недостатков. Сущность новой технологии гибки труб с раскатыванием заключается в следующем. При вращении раскатника (рис. 1), заведенного в трубу с достаточно большим натягом, в каждой точке кольцевой зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб, при котором изгибные напряжения кратковременно достигают предела текучести σ_T (рис. 2). В результате при приложении относительно небольшого изгибающего усилия происходит гибка в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания [1].

На данный момент разработан широкий спектр оборудования для гибки труб из низкоуглеродистой стали (рис. 3). Такие трубы применяются в большинстве областей промышленности. Но во многих случаях требуется коррозионная стойкость трубопроводов.

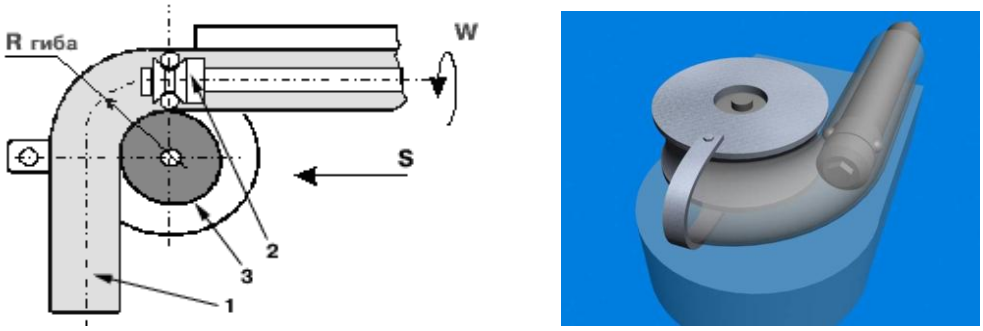


Рис. 1. Схема гибки труб с раскатыванием:
1 – труба, 2 – раскатной инструмент, 3 – гибочный ролик

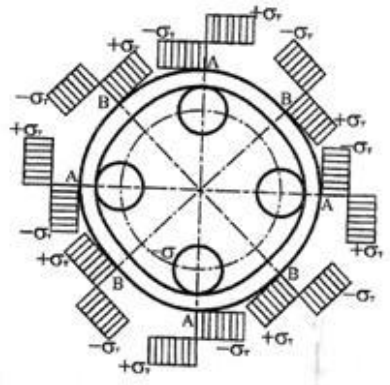


Рис. 2. Схема распределения изгибающих напряжений

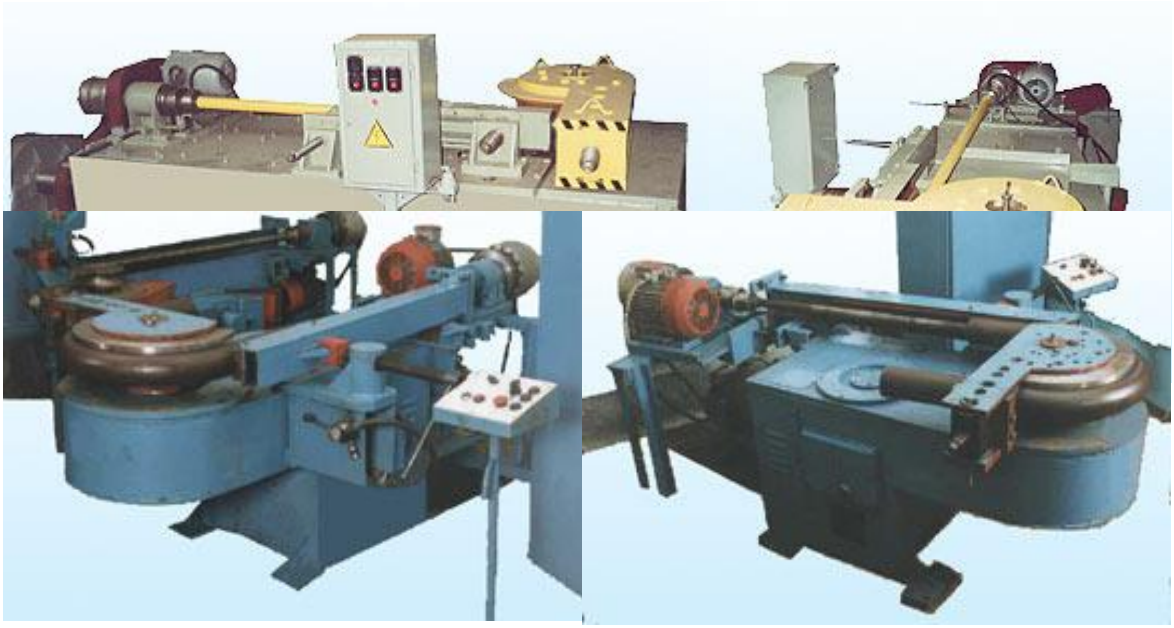


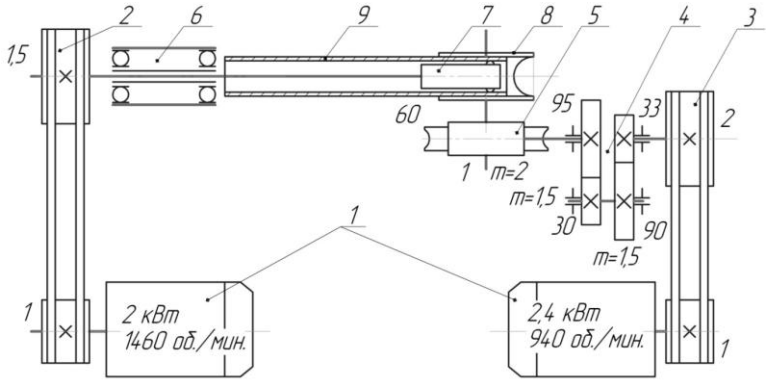
Рис. 3. Трубогибы, изготовленные по технологии
холодной гибки труб с раскатыванием

Нержавеющие трубы нашли широкое применение в химической, пищевой, нефтеперерабатывающей промышленности, в текстильном производстве, в области энергетики и медицины. Наиболее часто применяемыми, но в тот же момент и наиболее сложными в обработке, из них являются трубы диаметрами 25–40 мм. Гибка труб из нержавеющей стали имеет свою специфику и требует отдельного оборудования. В связи с этим, для возможности изготовления и проведения исследований элементов трубопроводов из коррозионно-стойких сталей малых диаметров спроектирована лабораторная установка.

На рис. 3 представлена кинематическая схема проектируемой установки. Данная конструкция достаточно компактна и просто, но практически не уступает аналогичным промышленным трубогибам в мощности [2]. Это позволяет использовать её для исследований, результаты которых будут достаточно точны и могут быть применены в промышленных масштабах.

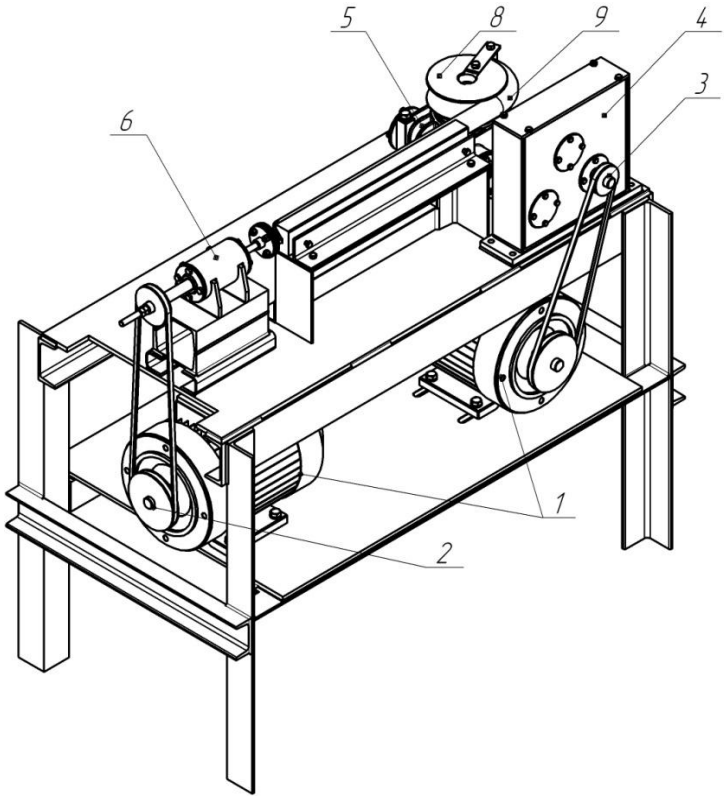
Установка устроена следующим образом. На нижней плите сварной рамы установлены электродвигатели 1 (рис. 4 и 5). На верхней плите – цилиндрический редуктор 4, шпиндельный узел 6 и червячный редуктор 5, на выходном валу которого находится раскатной ролик 8. В качестве привода главного движения станка используется электродвигатель мощностью 2 кВт и частотой вращения 1460 об/мин, движение от которого передаётся через ремённую передачу 2 на шпиндельный узел 6, на котором установлена борштанга с раскатной головкой 7 на конце. Привод движения подачи осуществляется электродвигателем с мощностью 2,4 кВт и частотой вра-

щения 940 об/мин. Движение от него передаётся через ремённую передачу 3 на цилиндрический редуктор 4, а с него на червячный редуктор 5. Подача осуществляется поворотом ролика, в котором зажата изгибаемая труба.



1 – Электродвигатели;
2 – Ремённая передача (n=1,5);
3 – Ремённая передача (n=2);
4 – Цилиндрический редуктор (n=8,6);
5 – Червячный редуктор (n=60);
6 – Шпиндельный узел;
7 – Раскатная гоголовка;
8 – Раскатной ролик;
9 – Заготовка (труба).

Рис. 4. Кинематическая схема лабораторной установки



1 – Электродвигатели;
2 – Ремённая передача (n=1,5);
3 – Ремённая передача (n=2);
4 – Цилиндрический редуктор (n=8,6);
5 – Червячный редуктор (n=60);
6 – Шпиндельный узел;
7 – Раскатная головка;
8 – Раскатной ролик;
9– Заготовка (труба).

Рис. 5. Общий вид лабораторной установки

Разработанная установка в дальнейшем может быть использована при проведении различных экспериментов. В частности, наибольший интерес представляет направление исследований по измерению температурных зависимостей при холодной гибке труб из коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов с раскатыванием.

Библиографический список

1. Бейлард, П.П. Напряжение от локальных нагрузок в цилиндрических сосудах давления / П.П. Бейлард // Вопросы прочности цилиндрических оболочек. – М.: Оборонгиз, 1960.

2. Козлов, А.В. Технология и оборудование холодной гибки тонкостенных труб: монография / А.В. Козлов, А.В. Бобылев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007.

3. Пат. 818707 Российская Федерация. Способ гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич. Бюл. № 13. 1981.

4. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1 / под ред. И.Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001.

К содержанию

УДК 621.833.1+621.833.2

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ С ЭВОЛЬВЕНТНО-КОНИЧЕСКИМИ КОЛЕСАМИ

Б.А. Лопатин

В статье показана возможность формирования зубчатых передач, составленных из эвольвентно-конических колес, при любом расположении осей колес в пространстве. Показаны преимущества передач с эвольвентно-коническими колесами по отношению к передачам, образованным из цилиндрических и обычных конических колес.

Ключевые слова: эвольвентно-конические колеса; зубчатые передачи.

Эвольвентно-коническое зубчатое колесо (ЭКК) – это колесо, нарезаемое инструментом реечного типа (зуборезная гребенка, червячная фреза, шлифовальный круг) с переменным вдоль оси колеса смещением инструмента [1].

Переменность смещения обусловлена тем, что в станочном зацеплении ЭКК с инструментом делительная плоскость рейки наклонена к оси колеса под углом δ (рис. 1), называемым углом конусности колеса. Движение обкатки при нарезании ЭКК сохраняется таким же, что и для цилиндрическо-

го колеса, т.е. аксоидами в относительном движении являются делительный цилиндр колеса и касательная к нему станочно-начальная плоскость инструмента. Шаг зубьев по какому-либо цилиндру (например, по делительному) остается в любом торцовом сечении неизменным, а толщина зуба вдоль его длины изменяется, за счет чего зубья приобретают клиновидную форму.

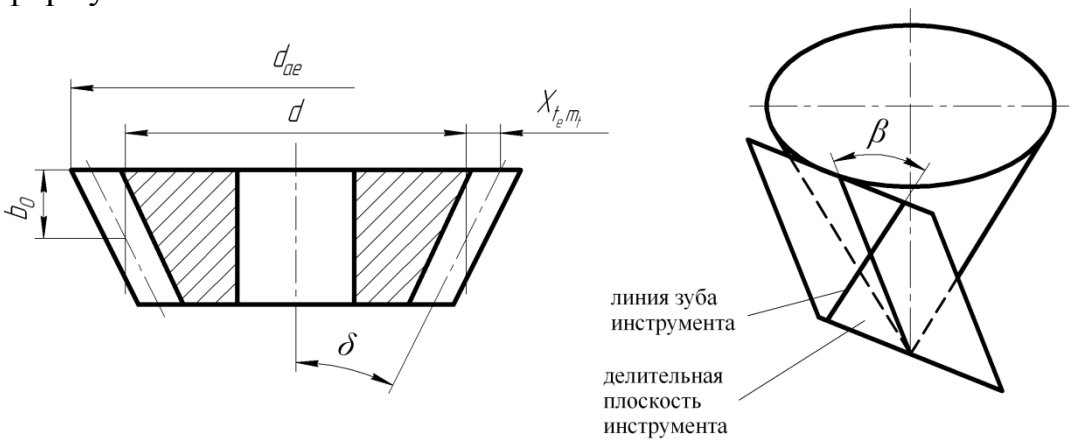


Рис 1. Эвольвентно-коническое колесо

Поверхность вершины зубьев колеса – обычный конус с углом при вершине 2δ. При наличии каких-либо специальных требований угол конуса поверхности вершины может отличаться от 2δ, часть поверхности (обычно у большого торца) может быть выполнена цилиндрической.

Поверхностью впадин является конус углом при вершине 2δ, т.е. чаще всего зуб ЭКК выполняется равновысоким по длине.

Геометрия торцового сечения ЭКК определяется числом зубьев колеса z, параметрами исходного производящего реечного контура – углом профиля α, коэффициентами h_i^*, h_a^*, c^*, а также расположением инструмента относительно колеса – углами установки инструмента δ и β.

В сечении производящей рейки торцовой плоскостью колеса (рис. 2) углы профиля за счет наклона рейки становятся отличными от угла α.

В таблице приведены основные формулы геометрического расчета ЭКК.

Верхние знаки в формулах относятся к правой стороне зуба. Правая и левая стороны зуба определяются при взгляде на зуб со стороны большого торца колеса.

Так как ЭКК нарезается инструментом реечного типа, то оно может образовывать правильное зацепление со всеми зубчатыми колесами, правильно сцепляющимися с прямобочной рейкой. Поэтому ЭКК правильно сцепляется друг с другом, с целиндрическими колесами, эвольвентными червяками. Этим и определяется одно из главных достоинств передач с ЭКК – их широкая универсальность. Из ЭКК и их сочетаний с цилиндрическими колесами могут быть составлены передачи для любого взаимного расположения осей колес в пространстве [2].

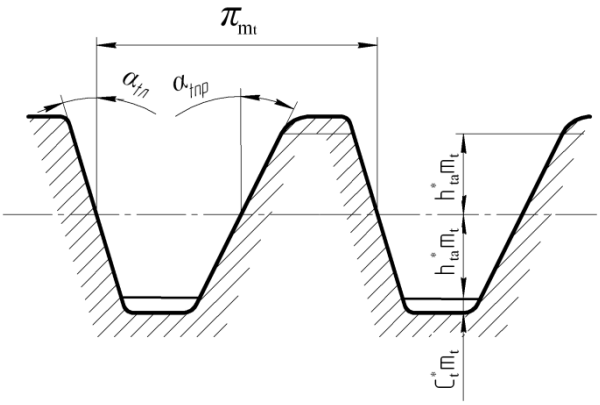


Рис. 2. Сечение производящей рейки торцовой плоскостью колеса

Таблица

Формулы геометрического расчета эвольвентно-конических колес

№ п/п	Определяемая величина	Расчётная формула
1	Торцовый модуль	$m_t = \dfrac{m}{\cos\beta}$
2	Угол давления эвольвенты на делительной окружности	$\operatorname{tg}\alpha_{t_{П.,Л}} = \dfrac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \cos\delta}{\cos\beta} \pm \operatorname{tg}\beta \cdot \sin\delta$
3	Коэффициент высоты головки зуба инструмента	$h_{at}^{*} = h_a^{*} \cdot \dfrac{\cos\beta}{\cos\delta}$
4	Коэффициент радиального зазора	$c_t^{*} = c^{*} \cdot \dfrac{\cos\beta}{\cos\delta}$
5	Радиус делительной окружности	$r = \dfrac{m_1 z}{2}$
6	Радиус основной окружности	$r_{b_{П.,Л}} = r \cdot \cos\alpha_{t\,П.,Л}$
7	Радиус окружности впадин	$r_f = m_t \cdot \left(\dfrac{z}{2} - h_{a_t}^{*} + x_t - c_t^{*}\right)$
8	Радиус окружности вершин зубьев ($\delta_a = \delta$)	$r_a = m_t \cdot \left(\dfrac{z}{2} + h_{a_t}^{*} + x_t - \Delta y_t^{*}\right)$
9	Угол наклона винтовой линии на делительном цилиндре	$\operatorname{tg}\beta_{П,Л} = \operatorname{tg}\beta \cdot \cos\delta \mp \dfrac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \sin\delta}{\cos\beta}$
10	Угол наклона винтовой линии на основном цилиндре	$\operatorname{tg}\beta_{b_{П.,Л}} = \operatorname{tg}\beta_{П,Л} \cdot \cos\alpha_{t\,П.,Л}$
11	Делительная толщина зуба	$S_t = m_t \cdot \left(\dfrac{\pi}{2} + 2 \cdot x_t \cdot \dfrac{\operatorname{tg}\alpha \cdot \cos\delta}{\cos\beta}\right)$
12	Дуговая толщина зуба на окружности d_y	$S_{t_y} = \dfrac{d_y}{2}\left(\dfrac{2S_t}{d} + \operatorname{inv}\alpha_{t_П} + \operatorname{inv}\alpha_{t_Л} - \operatorname{inv}\alpha_{t_{yП}} - \operatorname{inv}\alpha_{t_{yЛ}}\right)$

В передачах между скрещивающимися осями – гиперболоидных (рис. 3а) применение ЭКК вместо цилиндрических позволяет уменьшить чувствительности передач к погрешностям межосевого расстояния, путем изменения геометрических параметров колес в передаче с ЭКК можно регулировать степень локализации контактов зубьев, уменьшая ее вплоть до линейного контакта зубьев. Это позволяет получить в передаче с ЭКК существенно большую нагрузочную способность по сравнению с винтовой передачей, составленной из цилиндрических колес. Одним из преимуществ передач является возможность передачи вращения при очень малом межосевом расстоянии (минимальное значение ограничено лишь диаметрами валов колес) за счет изменения расположения колес (размеры e_{w1}, e_{w2}, рис. 3а) относительно линии кратчайшего межосевого расстояния.

Конические передачи (рис. 3б), составленные из ЭКК или из ЭКК и цилиндрического колеса имеют локализованный контакт зубьев, причем степень локализации тем больше, чем больше межосевой угол. Поэтому их наиболее целесообразно применять при малых межосевых углах, когда изготовление обычных конических колес из-за большого конусного расстояния затруднено. Передачи малочувствительны к погрешностям межосевого угла и осевого расположения колес. При больших числах зубьев и малой ширине колес (в кинематических передачах) не исключается использование ЭКК при больших межосевых углах.

Передачи между параллельными осями (цилиндрические) (рис. 3в) могут быть составлены из двух ЭКК, имеющих одинаковые углы конусности δ, а, при косозубых колесах, и равные, но противоположные по знаку углы наклона линии зуба рейки β. Колеса в передачи устанавливаются вершинами конусов навстречу друг другу. Применение ЭКК в цилиндрических передачах позволяет повысить плавность работы (за счет увеличения коэффициента перекрытия), что положительно сказывается на нагрузочной способности передач. При использовании так называемых прямозубокосозубых ЭКК повышение плавности достигается без появления осевых нагрузок, присущих передачам с косозубыми цилиндрическими колесами. Одним из важных положительных качеств цилиндрических передач и ЭКК является возможность за счет взаимного осевого сдвига колес регулировать межосевое расстояние (при постоянном боковом зазоре или беззазорном зацеплении), а также регулировать величину бокового зазора при постоянном межосевом расстоянии.

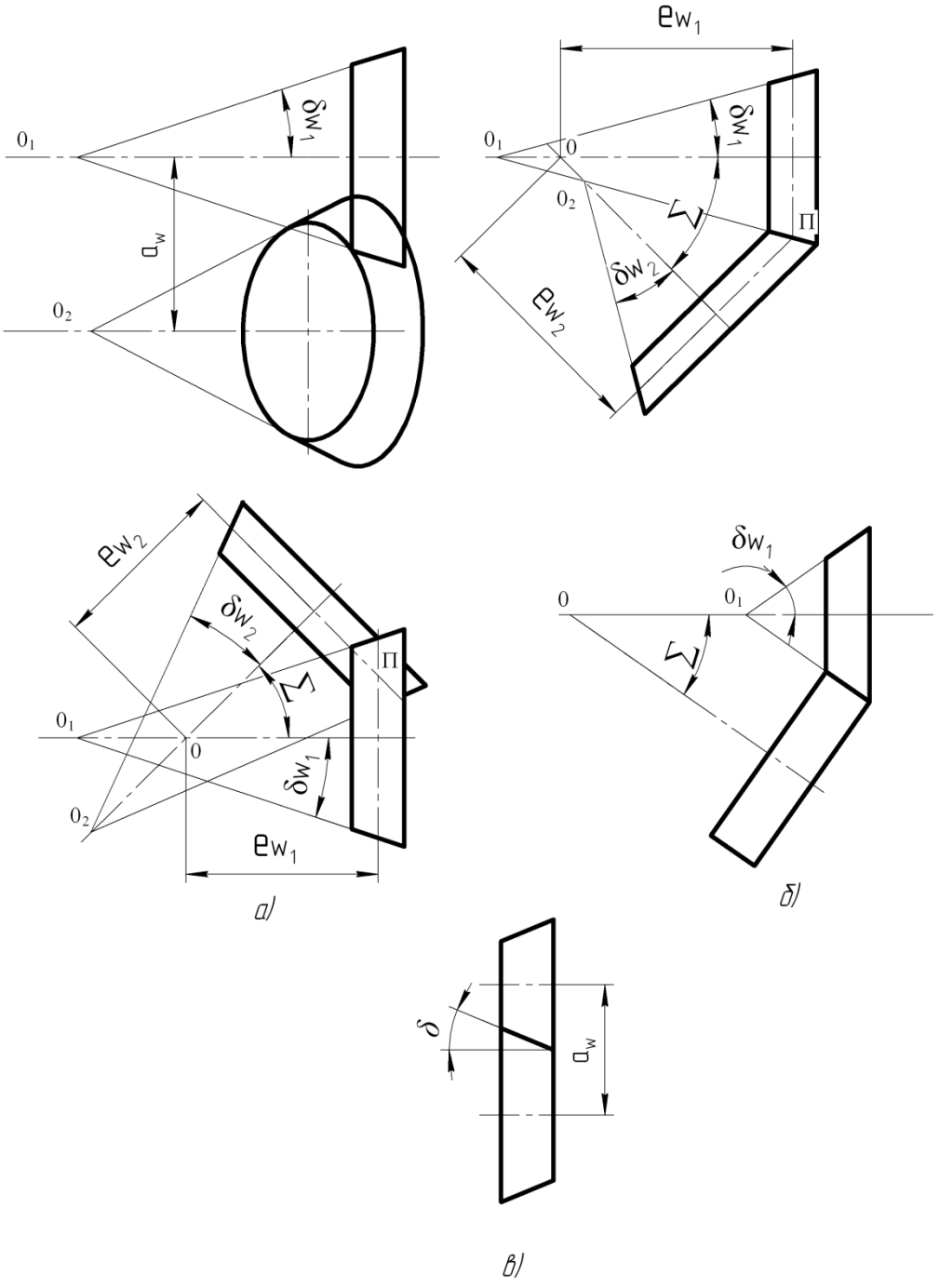


Рис. 3. Схемы формирования различных передач из ЭКК

Таким образом, из ЭКК и их сочетаний с цилиндрическими колесами можно сформировать передачи с улучшенными свойствами для любого взаимного расположения колес в пространстве, выполнить механизмы, неосуществимые при использовании цилиндрических и обычных конических колес [3]. При этом точность передач обеспечивается той же, что и для обычных цилиндрических передач.

Библиографический список

1. Болотовский, И.А. Справочник по геометрическому расчету эвольвентных зубчатых и червячных передач / И.А. Болотовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

2.Лопатин, Б.А. Цилиндро-коничекие зубчатые передачи: Монография / Б.А. Лопатин,О.Н. Цуканов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 200 с.

3.Еремин, В.П. Создание нового поколения электромеханических приводов трансформируемых систем космических аппаратов / Н.В. Еремин, А.Н. Кирилин, Б.А. Лопатин, С.А. Петрищев, Н.П. Родин, В.М. Рублев, Ю.Н. Секисов. – Самара: ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», 2011. – 563 с.

К содержанию

УДК 621.9.015 + 621.92.06-529

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

С.П. Пестов

Предложен подход к моделированию точности обработки отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы как к совокупности особенностей достижения точности на этапе настройки оборудования (при координатных перемещениях инструментов на оси отверстий) и этапе процесса формообразования (непосредственной обработки).

Ключевые слова: моделирование; точность; отверстия; станки с ЧПУ; этап настройки; этап формообразования; концевые мерные инструменты.

Числовое программное управление (ЧПУ) станками предопределяет новые подходы к технологии обработки деталей и в обеспечении интегральной характеристики их качества – точности. Знание особенностей моделирования точности при обработке деталей на станках с ЧПУ необходимо технологу-программисту и проектировщику CAM систем.

При обработке на станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы заготовки предварительно устанавливают относительно координатной системы станка. Далее производят координатные перемещения, заданные в управляющей программе, рабочего органа станка для его выхода в точки позиционирования и обработки. Поэтому для комплексного моделирования точности на таких автоматизированных станках необходимо выделить два этапа – этап настройки станка и этап формообразования (непосредственной обработки). На этапе настройки рабочий орган с заготов-

кой не контактирует, а на этапе формообразования осуществляется взаимодействие инструмента с обрабатываемой заготовкой. Такой подход с выделением этапов настройки и формообразования, в общем случае справедлив для обработки любых поверхностей деталей – плоскостей, пазов, отверстий и т.д.

На станках с ЧПУ сверлильно-фрезерно-расточной группы обрабатывают разнообразные по конструкции детали типа плит, оснований, кронштейнов, рычагов, вилок, корпусов и т.п. Многие из этих деталей имеют отверстия, которые являются сопрягаемыми при сборке изделий. К таким отверстиям предъявляются высокие требования по точности расположения оси, размера и другим параметрам точности. Формообразование отверстий с высокими требованиями к заданными чертежом параметрами точности производится последовательно за несколько переходов, в том числе - высокопроизводительными концевыми мерными инструментами (КМИ) типа двухлезвийных свёрл, многолезвийных зенкеров и разверток. Поэтому рассмотрим особенности моделирования точности обработки отверстий на станках с ЧПУ с выделением этапов настройки станка и формообразования отверстий концевыми мерными инструментами.

На рис. 1 приведена схема особенностей моделирования точности отверстий на этапах настройки и формообразования.

Рис. 1. Схема особенностей моделирования точности отверстий на станках с ЧПУ на этапах настройки и формообразования: КМИ – концевые мерные инструменты; ТС – технологическая система; ПТ – параметры точности

На этапе настройки к основным факторам, приводящим к погрешностям обработки можно отнести настройку в «нуль» детали, позиционирования подвижных узлов станка по линейным и угловым координатам и автоматическую смену инструмента. Указанные факторы влияют только на погрешность расположения осей отверстий. Поэтому можно утверждать, что на этапе настройки из всего комплекса заданных параметров точности, достаточно рассмотреть моделирование точности расположения осей отверстий.

Для моделирования точности расположения осей отверстий на этапе настройки следует использовать метод формирования размерных цепей и их дальнейший расчёт. Размерные цепи, сформированные для моделирования точности на этапе настройки, могут быть нелинейными (плоскими или неплоскими), а в отдельных случаях и пространственными, например, в корпусных деталях. Однако расчёты подобных размерных цепей традиционными методами не достаточно эффективны. Поэтому предлагается новый интервальный метод расчёта размерных цепей, учитывающий взаимовлияние линейных и угловых звеньев, и на основе этого метода осуществить моделирование и оценку точности расположения осей отверстий на этапе настройки, а также его минимальный запас для выполнения следующего этапа формообразования. При формировании и расчёте размерных цепей необходимо учитывать характер перемещений подвижных узлов станка в заданные координаты в зависимости от вида устройства ЧПУ, погрешности позиционирования, определяемые точностью металлорежущего станка с ЧПУ и др. Разработанная методика моделирования и оценки точности расположения осей отверстий на этапе настройки станков с ЧПУ подробно рассмотрена в работах [1, 2].

Так как на этапе формообразования отверстий режущий инструмент взаимодействует с обрабатываемой деталью, то к основным факторам, приводящим к погрешностям формообразования, следует отнести: переменность припуска; геометрию режущей части инструмента (неточность его заточки); жесткость элементов технологической системы; осевые биения лезвий режущего инструмента и шпинделя металлорежущего станка. Поэтому на этапе формообразования необходимо рассмотреть моделирование всего комплекса параметров точности: точности диаметрального размера, формы, расположения осей отверстий (с учетом погрешности этапа настройки) и шероховатости поверхности. Однако, из-за специфики обеспечения параметров шероховатости, последние при моделировании не учитываются. Поскольку формообразование отверстий на станках с ЧПУ производится различными типами концевых мерных инструментов с использованием комплектов вспомогательных инструментов для их закрепления, то разработана система частных моделей формообразования для отдельных переходов, основанная на общем научно-методическом подходе к

моделированию. Известно, что для мерных инструментов основным условием обеспечения точности является копирование своего размера на обрабатываемое отверстие, поэтому моделирование при формообразовании рассмотрено на статическом уровне с использованием уравнений с запаздывающим аргументом, в наибольшей степени учитывающим это условие.

Таким образом, для моделирования точности на этапе формообразования, с учетом выбранного подхода, разработана система частных моделей отдельных переходов черновой, получистовой и чистовой обработки отверстий концевыми мерными инструментами типа двухлезвийных сверл, многолезвийных зенкеров и разверток, в том числе, в виде уравнений с запаздывающим аргументом [3]. Влияние элементов технологической системы, а именно, вспомогательных инструментов и элементов для направления на достижение точности определяется с учетом их радиальной (изгибной) жесткости и конструктивных особенностей. Контактной и крутильной жесткостью элементов технологической системы при моделировании пренебрегаем. Оценка жесткости элементов технологической системы, которые могут быть использованы в моделях точности этапа формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ, выполнена в работе [4].

Оценка нормируемых параметров точности отверстий при компьютерном моделировании на этапе формообразования приведена в работе [5]. Моделирование точности на этапе формообразования заданным концевым мерным инструментом, с учётом точности расположения оси отверстия на этапе настройки, позволяет оценить конечные параметры точности $ПТ_i^K$ после обработки на i-м переходе. Для расчёта параметров точности при многопереходной обработке отверстий необходимо соблюдать условие, при котором полученные конечные параметры точности на i-м переходе $ПТ_i^K$ задают или определяют начальные параметры точности $ПТ_{i+1}^H$ следующего $(i+1)$ перехода, т.е. $ПТ_i^K = ПТ_{i+1}^H$. Это условие объясняется принципом наследования точности при многопереходной обработке поверхностей деталей на станках.

Таким образом, предлагаемый подход к моделированию, с выделением этапов настройки и формообразования, позволит более обоснованно и достоверно оценивать точность обработки отверстий на станках с ЧПУ.

Библиографический список

1. Пестов, С.П. Моделирование точности расположения осей отверстий на станках с ЧПУ при настройке / С.П. Пестов, П.Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. - 2003. - № 2 (19). - С. 37–41.

2. Пестов, С.П. Точность настройки станков с ЧПУ на обработку отверстий / С.П. Пестов, П.Г. Мазеин // СТИН. - 2006. - № 11. - С. 5–9.

3. Пестов, С.П. Система математических моделей формообразования отверстий концевыми мерными инструментами на станках с ЧПУ / С.П. Пестов, О.О. Беляев, П.Г. Мазеин // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. - 2003. - № 4 (21). - С. 83–87.

4. Пестов, С.П. Оценка жесткости элементов технологической системы для обработки отверстий / С.П. Пестов // Наука ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2013. – Т. 2. – С. 325-328.

5. Пестов, С.П. Оценка нормируемых параметров точности отверстий при компьютерном моделировании на этапе формообразования / С.П. Пестов // Информатизация и автоматизация в машиностроении: тематический сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 66-70.

К содержанию

УДК 621.833

РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

С.В. Плотникова, И.В. Мурзина

В статье описываются способы получения твердотельных моделей зубчатых колес различной геометрии при помощи эмуляции нарезания профиля зуба производящим реечным контуром и дальнейшей обработкой в Autodesk Inventor.

Ключевые слова: твердотельная модель, зубчатое колесо, CAD системы.

При оценке напряженно-деформированного состояния зубчатых передач возникает необходимость в получении твердотельных моделей, точно отражающих геометрию рабочих профилей зубьев, зависящих от параметров инструмента и траектории его перемещения.

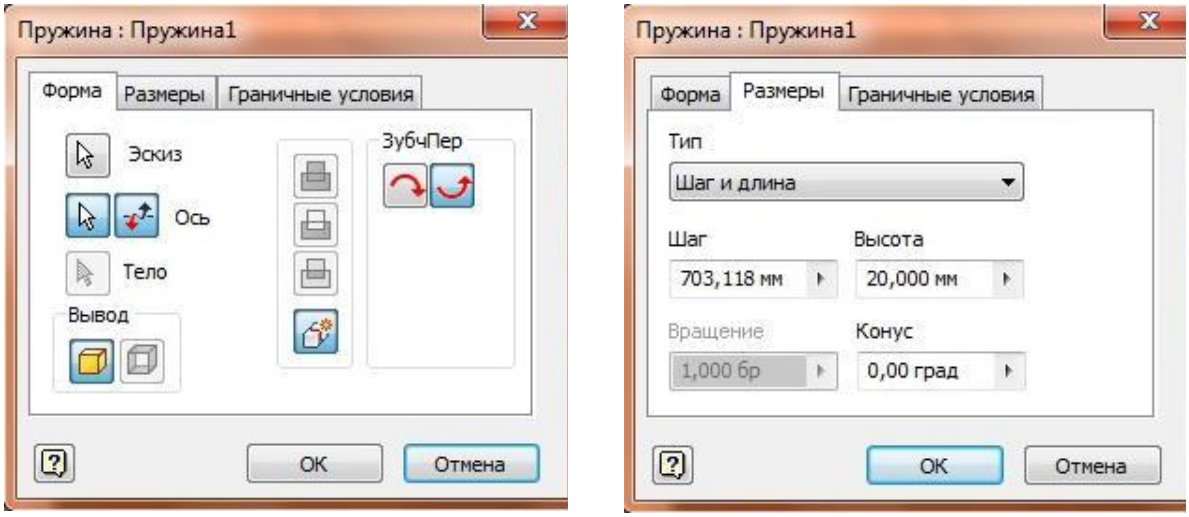
Проведенный анализ существующих программных продуктов (КОМПАС, SolidWorks, AutoCAD, Autodesk Inventor) показал, что на настоящий момент не существует универсальных разработок, позволяющих произвести генерацию зубчатых колес сложной формы рабочих поверхностей зубьев (с несимметричным, неравновысоким профилем, нарезанных нестандартным инструментом и т.п. [1]). Указанные програмные продукты представляют только графическое изображение зубчатого колеса, а библиотеки CAD систем представляют лишь упрощенное изображение, как правило стандартного профиля.

Целью исследования явилась разработка твердотельных моделей, точно отражающих форму рабочих поверхностей, полученных при их профилировании реечным инструментом различного исходного контура.

В основу получения рабочих поверхнотей зубьев положен программный комплекс эмуляции нарезания зубчатого колеса производящим реечным контуром. Разработанная программа позволяет реализовать процесс обработки цилиндрических зубчатых колес с различными параметрами исходного контура (α, h_a^*, h_f^*, c^*, ρ^*) и различными коэффициентами смещения x производящего реечного контура. Для дальнейшего построения трехмерной модели используется программа Autodesk Inventor, с помощью которой на основе полученного профиля можно создать модели зубчатых колес различной геометрии.

Для создания модели цилиндрического прямозубого зубчатого колеса достаточно воспользоваться инструментом *Выдавливание*. В отличие от цилиндрического прямозубого зубчатого колеса, созданного стандартными средствами Autodesk Inventor (через *Мастер проектирования зубчатых колес*) профиль рабочих поверхностей зубьев полностью соответствует профилю, реально получаемому при обработке.

В случае создания цилиндрического косозубого зубчатого колеса выдавливание происходит не по прямой линии, а по винтовой. Для этого можно воспользоваться приложением *Пружина*. В этом приложении задаем форму в виде эскиза профиля полученного зуба и его положение относительно оси колеса (рис. 1а). Угол наклона зуба колеса β задается через шаг винтовой линии и длину делительной окружности (рис. 1б).



а) б)

Рис. 1. Параметры приложения *Пружина*

На рис. 2 и 3 представлены модели полученных зубчатых колес с параметрами: m = 3, z = 20, β = 20°.

Для зубчатых колес с более сложной геометрией рабочих поверхностей их твердотельные модели можно создать сочетанием работы двух вышеописанных программных комплексов. Например, эвольвентно-конические колеса. Эвольвентно-коническое зубчатое колесо (ЭКК) – это колесо, нарезаемое инструментом реечного типа (зуборезная гребенка, червячная фреза, шлифовальный круг) с переменным вдоль оси колеса смещением инструмента [2]. Особенностью таких колес является то, что в каждом торцовом сечении получается профиль с определенным коэффициентом смещения, который изменяется в каждом сечении на величину:

$$\Delta x = s \cdot tg\delta / m,$$

где s – шаг;

x – приращение коэффициента смещения;

δ – угол конусности ЭКК;

m – модуль.

Рис. 2. Твердотельная модель цилиндрического прямозубого зубчатого колеса

Рис. 3. Твердотельная модель цилиндрического косозубого зубчатого колеса

Для получения твердотельной модели ЭКК с помощью программы эмуляции профиля зуба инструментом реечного типа [3] на первом этапе получаем ряд профилей с определенным шагом s. Далее в программе Autodesk Inventor создаем рабочие плоскости на расстоянии друг от друга, равном шагу s, создаем в них 2D-эскизы и копируем туда соответствующие профили зубьев. Твердотельную модель ЭКК (рис. 4) получаем из набора 2D-эскизов с помощью приложения *Лофт*, задав направляющие линии.

Рис. 4. Твердотельная модель
эвольвентно-конического зубчатого колеса

Таким образом, при помощи программного комплекса «Эмуляция нарезания эвольвентного цилиндрического зубчатого колеса производящим реечным контуром» и программы Autodesk Inventor можно получить твердотельные модели зубчатых колес с формой рабочих поверхностей, отражающих особенности геометрии инструмента и траекторию его перемещения при формообразовании зубьев колес.

Библиографический список

1. Лопатин, Б.А. Цилиндро-конические зубчатые передачи: Монография / Б.А. Лопатин, О.Н. Цуканов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 200 с.

2. Лопатин, Б.А. Зубчатые передачи с эвольвентно-коническими колесами / Б.А. Лопатин. – Статья в настоящем сборнике.

3. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 6853. Эмуляция нарезания эвольвентного цилиндрического зубчатого колеса производящим реечным контуром / Б.А. Лопатин, С.А. Хаустов // Б.И. – 2006.

К содержанию

УДК 681.5 + 004.4 + 004.8

РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ДОМ» НА БАЗЕ КОНТРОЛЛЕРА «MITSUBISHI ALPHA»

В.М. Сандалов, В. А. Плотников

Разработан лабораторный стенд на базе контроллера «Mitsubishi alpha», обеспечивающий изучение принципов построения, программирования и настройки основных систем «интеллектуальных объектов».

Ключевые слова: системы автоматизации и управления, программируемые контроллеры, программное обеспечение.

По мере развития уровня автоматизации растет и количество видов интеллектуальных объектов, которые имеют свои особенности построения систем безопасности и жизнеобеспечения, причем оперативно-технические характеристики этих объектов определяются, в основном, используемыми технологиями искусственного интеллекта, связи и обеспечения безопасности.

Глобальный процесс интеграции захватил сегодня и рынок услуг в сфере «интеллектуализации» объектов недвижимости. Несмотря на большой интерес к проблеме интеллектуализации объектов недвижимости, по оценке специалистов достигнутый сегодня уровень интеллектуализации на 40–60 % ниже реально возможного [1].

В общем случае современная концепция «Интеллектуального объекта» включает реализацию различных систем (рис. 1).

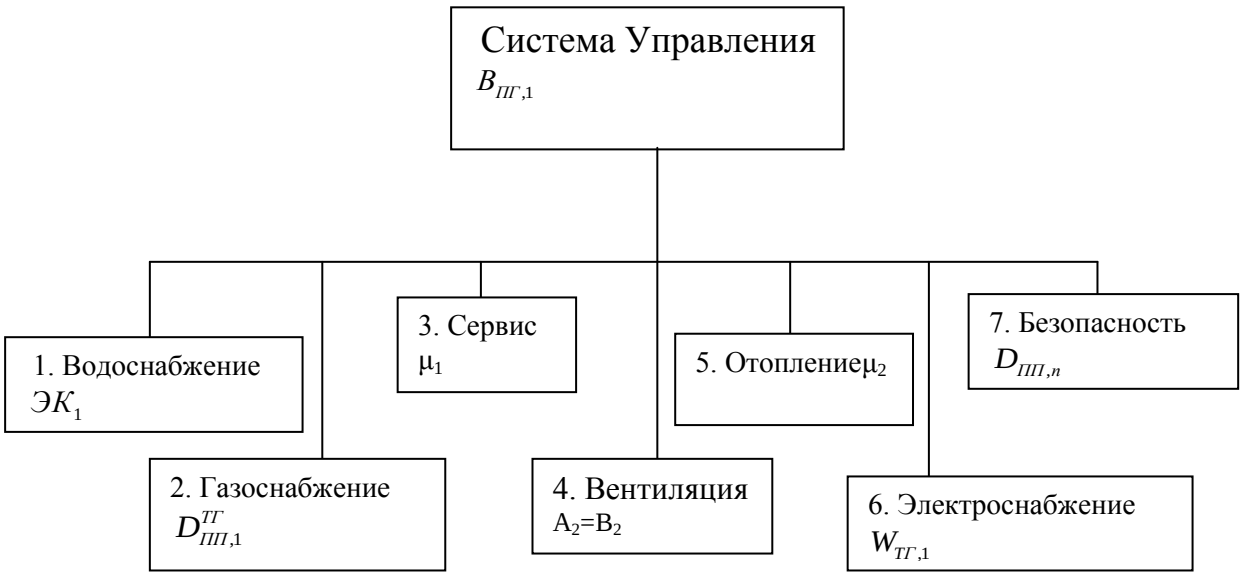


Рис. 1. Современная система «Интеллектуального объекта»

В общем случае возможны следующие варианты подсистем:

1) водоснабжение: учет, регулирование горячего и холодного водоснабжения и защита от протечек;

2) газоснабжение: учет, контроль газоснабжения и предотвращение утечки газа;

3) сервис: автоматическое выключение и включение устройств в доме (квартире) и удалённое управление ими;

4) вентиляция: управление системами очистки воздуха, кондиционирования, регулирование температуры и влажности во всех комнатах;

5) отопление: автоматическая регулировка температуры в помещениях в зависимости от времени года, суток, наличия и отсутствия хозяев, удалённое управление и контроль температурных режимов, отображение текущей температуры в помещении и на улице;

6) электроснабжение: управление источниками питания, переключение на автономную работу, учет электроэнергии, управление потребителями (сервисная аппаратура);

7) безопасность: контроль несанкционированного доступа, охранно-пожарная сигнализация, видеонаблюдение, сбор информации и фиксация чрезвычайных ситуаций при работе других систем.

С точки зрения управления и реализации основных систем управление строится по принципам аналогового или релейного регулирования.

Особое внимание в настоящее время уделяется внедрению микропроцессорных систем, обеспечивающих решение задач автоматизации управления механизмами, приборами и аппаратурой. Такие системы могут применяться абсолютно для любых зданий и сооружений. Это дает возможность сделать современным и энергоэффективным не только новое здание, но и повысить энергоэффективность старого.

С развитием систем автоматизации в течение последних 10 лет просматривается тенденция в стремлении сократить время, требуемое для реализации алгоритмов управления, пусконаладочных работ и операций, необходимых при сервисном обслуживании и эксплуатации систем. Выполнить все эти требования могут только высоквалифицированные специалисты. Задача обучения, повышения квалификации и переподготовки в настоящее время важна не только для образовательных учреждений, но и для специалистов, которые согласно ISO 9001-2011 обязаны проходить курсы повышения квалификации и переобучения.

В связи с этим весьма важной задачей выглядит вопрос о разработке учебно-лабораторного стенда позволяющего на своей базе проводить лабораторные работы для обучения специалистов по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Лабораторный стенд даст возможность обучающимся изучить работу контроллеров и их возможности в сфере автоматизации инженерных систем зданий, а так же позволит сделать изуче-

ние контроллеров более наглядным и простым. Предполагается использование стенда для проведения лабораторных работ по дисциплинам: «Микропроцессорные средства в электроприводах и технологических комплексах», «Элементы систем автоматики», «Автоматизация типовых технологических процессов», «Микроконтроллеры в электротехнических системах».

Лабораторный стенд имеет в своей основе контроллер «Mitsubishi alpha», который имеет не только дискретные, но и аналоговые входы, что позволяет ему следить за показателями температуры, освещенности, а также управлять различными электроприборами и механизмами в доме.

С использованием дополнительного GSM – модуля возможно дистанционное управление и рассылка SMS – уведомлений [2].

Практическая часть лабораторных работ заключается в сборке электрической схемы, разработке отладки и проверке программы управления контроллера. Для подготовки программы требуется составить алгоритм действия всех элементов, входящих в систему. Реализация программы предполагает использование языка функциональных логических схем.

Окно функциональной блок-схемы (FBD) используется для программирования контроллеров серии ALPHA. Окно FBD включает большой прямоугольник (по умолчанию зеленого цвета) – область подключений, которая известна также как база размещения функциональной блок-схемы. В верхней части окна находится диалоговое окно заголовка; с правой и левой стороны от базы размещения вертикально расположены прямоугольники входов и выходов, соответственно. Для создания программы для контроллеров серии ALPHA программируемые компоненты помещаются на базу размещения или в прямоугольники и соединяются одинарными проводами. На рисунке 2 представлено окно функциональной блок-схемы (FBD).

Программа оснащена режимом моделирования, который позволяет имитировать условия, в которых будет выполняться программа, без физического подключения аппаратных средств. Это очень эффективный инструмент для отладки программы перед записью содержания программы в реальный контроллер серии ALPHA.

Перед работой с контроллером составляется математическая модель в программе «Vissim», для отладки работы системы на виртуальной модели [3]. Преподаватель имеет возможность интерпретировать задачи в процессе обучения.

Аппаратная часть стенда включает датчики и исполнительные элементы основных систем «Интеллектуального объекта», радиоуправление и сигнализацию, что позволяет на практике изучить основные составные части систем автоматики, освоить принципы наладки современных систем.

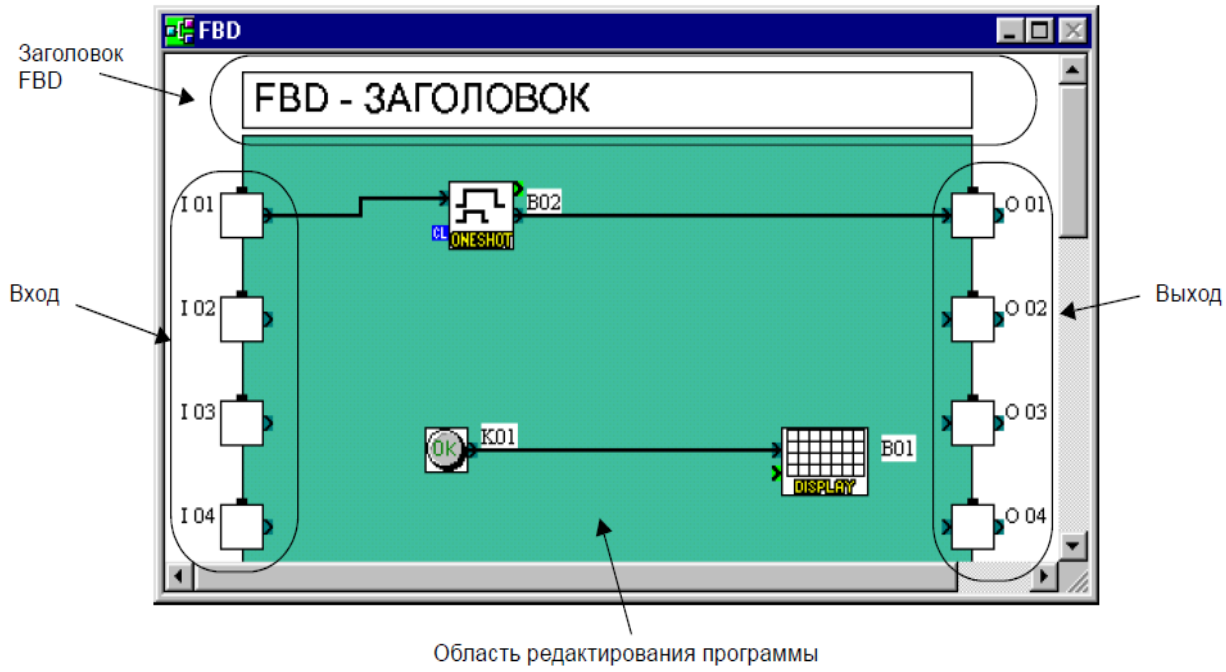


Рис. 2. Окно функциональной блок-схемы (FBD)

Разработанный лабораторный стенд обеспечивает изучение принципов работы, моделирование и программирование систем промышленной и бытовой автоматики. Совместное изучение моделирования пакета VisSim и языка программирования контроллера «Mitsubishi» позволяет проводить проверку программного обеспечения на стадии разработки, расчет настроечных параметров, что упрощает наладку реальных систем. Достаточно простое программное обеспечение VisSim и AL-PCS/WIN-E, схожие интерфейсы, построенные на базе блоков, упрощают восприятие и расширяют возможности преподавателей в проведении лабораторных работ.

Библиографический список

1. Корсунская, П.Г. Стандарт АВОК. Автоматизированные системы управления зданиями / П.Г. Корсунская. – М.: Изд-во АВОК-ПРЕСС, 2012.

2. Руководство по работе с Mitsubishi Alpha2. – URL: http://www.mitsubishi-automation.com.

3. Руководство по работе с программным обеспечением Mitsubishi Alpha2. – URL: http://www.mitsubishi-automation.com.

К содержанию

УДК 621.311.2.014.7 + 621.316.1

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

С.Н. Трофимова

Рассмотрены основные требования, предъявляемые к работе систем электроснабжения сельских населенных пунктов, проведен анализ распределения токов однофазного замыкания на землю, определена плотность вероятности экспоненциального распределения токов однофазного замыкания в сельских электрических сетях.

Ключевые слова: сельские электрические сети, надежность, однофазное замыкание на землю.

Распределительные сети 6–35 кВ обеспечивают электроснабжение потребителей промышленных объектов, потребителей собственных нужд электростанций, сельскохозяйственных потребителей, объектов коммунального хозяйства и т.д.

Надёжность работы электрических сетей 6–35 кВ в значительной мере определяет безаварийность электроснабжения потребителей, и эта задача является актуальной в современных условиях не идеального технического состояния воздушных электрических сетей, в том числе и сельских.

Сельскими электрическими сетями считаются сети, которые снабжают электроэнергией преимущественно (более 50 %) сельскохозяйственных потребителей, объекты мелиорации и водного хозяйства [1]. В отличие от городов, особенности электроснабжения в сельской местности заключаются в охвате электрическими сетями большой территории с малыми плотностями электрических нагрузок, составляющими 1–15 кВт/км^2 [2]. Подвод электроэнергии осуществляется к большому количеству сравнительно маломощных рассредоточенных объектов. Сельским сетям свойственно наличие сезонных потребителей, существенное изменение нагрузок в течение суток, в течение года, причем в зависимости от времени года нагрузка потребителей изменяется в широких пределах.

Специфика электроснабжения сельских населенных пунктов определяется большим количеством электроприемников относительно небольшой мощности, которые разбросаны на большой площади, преобладанием электроприемников второй категории по требованиям надежности электроснабжения в жилых районах, отсутствием постоянного дежурного персонала на трансформаторных подстанциях и распределительных пунктах.

Сельские электрические сети не всегда способны справляться с возрастающими электрическими нагрузками как на этапе передачи, так и на этапе распределения электрической энергии потребителям. На современном

этапе важное значение приобретают требования к надежности работы сельских электрических сетей. Уровень надежности их работы определяется такими показателями, как вероятность отказа, или средний коэффициент вынужденного простоя, параметр потока отказов, среднее время восстановления элементов сети, а также относительное значение недоотпуска электроэнергии потребителям [3].

Электрические сети в сельской местности снабжают потребителей преимущественно по воздушным линиям электропередачи, следовательно, повышение надёжности сельских электрических сетей может быть обеспечено, в первую очередь, повышением надёжности ВЛ.

Анализ отказов в работе 117 сельских электрических сетей 6–35 кВ ОАО «МРСК Урала» филиала Челябэнерго структурного отделения производственного подразделения «Златоустовские электрические сети» показал, что основное число отказов в этих сетях по различным причинам является следствием повреждения воздушных линий (76 %), значительная доля из которых приходится на провода ВЛ – 36 % всех нарушений работы сети (табл.), что определяется спецификой построения сельских электрических сетей и большой протяженностью ВЛ.

Таблица

Распределение отказов в работе сельских электрических сетей

Наименование оборудования	Повреждаемость, %
Провод ВЛ	35,89
Опора	16,86
Изолятор	12,35
Прочие элементы ВЛ	8,51
Разъединитель	5,84
Трансформатор силовой	4,84
Шины	4,01
Прочие	11,69
Всего	100,00

Как правило, отказы в работе электрических сетей сопровождаются однофазными замыканиями на землю, которые заканчиваются пробоем изоляции в ее ослабленных местах. Кроме того, в режиме ОЗЗ в сельских электрических сетях, работающих в режиме изолированной нейтрали источника питания, распределенные по всей сети активные и емкостные токи утечки сосредотачиваются в месте замыкания, под действием выделяемой активной мощности может произойти увеличение температуры нагрева и создаться пожароопасная ситуация. Помимо этого, преобразование части энергии в тепло приводит к увеличению потерь электрической энергии. Все это неблагоприятно сказывается на надежности работы электроснаб-

жения сельских потребителей, поэтому для анализа надежности работы сельских электрических сетей был проведен анализ распределения токов однофазного замыкания на землю.

Сельские электрические сети 6–35 кВ характеризуются токами однофазного замыкания на землю, как правило, до 5–10 А [4]. Эксплуатируемым сельским электрическим сетям свойственна относительно большая степень несимметрии напряжений из-за большой доли однофазных нагрузок (до 5 %) [5], что накладывает определенные условия как на применение систем компенсации емкостных токов ОЗЗ, так и на производство измерений емкостных токов в таких сетях. Определение числа групп значений токов однофазного замыкания на землю $I_{ОЗЗ}$ осуществлялось математическим путем с использованием формулы Стерджесса:

$$n = 1 + 3{,}322 \cdot \lg N, \quad (1)$$

где n – число групп; N– число единиц совокупности.

Величина интервала определялась по формуле:

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{n}, \quad (2)$$

где x_{max} и x_{min} – максимальное и минимальное значение признака в совокупности; n – число групп.

Для определения закона распределения токов ОЗЗ в электрических сетях 6–35 кВ данные по величинам токов ОЗЗ были отнесены к законам вероятностных распределений непрерывных величин и проверено соответствие статистических данных с ожидаемыми частотами в теоретическом распределении в принятой гипотезе с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 при заданном уровне значимости α.

Хорошо согласующаяся гипотеза распределения $I_{ОЗЗ}$ в сельских электрических сетях – экспоненциальное распределение вероятности величины $I_{ОЗЗ}$, которое описывается плотностью:

$$P(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}, x \geq 0 \\ 0, x < 0 \end{cases},$$

где λ – параметр распределения:

$$\lambda = \frac{1}{M}.$$

Согласно выдвинутой гипотезе об экспоненциальном распределении токов ОЗЗ в сельских электрических сетях 6–35 кВ, математическое ожидание появления $I_{ОЗЗ}$ при возникновении в сельских сетях ОЗЗ, определяемое по [6], составит M = 5,02, а дисперсия D = 25,25.

Анализ эмпирических и теоретических частот с помощью критерия Пирсона показал, что наблюдаемое значение χ^2 с числом степеней свободы S=4 для уровня значимости α=0,01 не превышает критического значения χ^2_{kp}:

$$\chi^2 = 11{,}55 < \chi^2_{kp}.$$

Следовательно, данные наблюдений согласуются с этой гипотезой. Тогда закон плотности распределения (рис. 1) вероятности появления $I_{ОЗЗ}$ при возникновении в сельских электрических сетях ОЗЗ будет описываться уравнением:

$$P = 0{,}199 \cdot e^{-0{,}199 \cdot I_{озз}},$$

а функция распределения этого закона:

$$F = 1 - e^{-0{,}199 \cdot I_{озз}}.$$

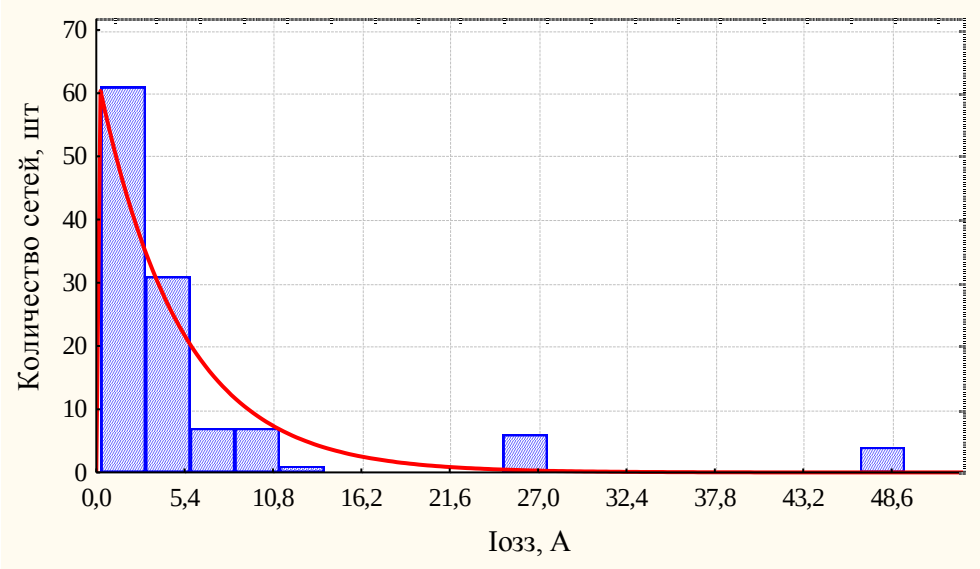


Рис. 1. Плотность вероятности экспоненциального распределения $I_{ОЗЗ}$ в сельских электрических сетях

Несмотря на то, что при токах до 5А открытые электрические дуги, которыми сопровождаются однофазные замыкания в электрических сетях с изолированной нейтралью источника питания, горят неустойчиво и в большинстве случаев самоустраняются, изоляция восстанавливает свою электрическую прочность и сеть восстанавливает нормальный режим работы, такие значения токов представляют опасность для живого организма. Опасности поражения электрическим током в результате шагового напряжения или напряжения прикосновения может подвергаться электротехнический персонал при осмотрах линии, население, а также животные, находящиеся вблизи места однофазного замыкания на землю.

Кроме того, длительная работа сети в режиме ОЗЗ может привести к выходу из строя некоторых типов трансформаторов напряжения (ТН), к перерастанию однофазного замыкания на землю в двухфазные или трехфазные КЗ, а также к значительным повреждениям электротехнического оборудования. Малые токи замыкания на землю (до 5А) в сельских сетях не позволяют обеспечить достаточный уровень токовой защиты нулевой последовательности от однофазных замыканий на землю. Применение ТН типа НАМИ в сетях с изолированной нейтралью 6–35 кВ позволяет решить вопрос обеспечения надежности ТН к феррорезонансу при однофазных дуговых замыканиях. Кроме того, повышение надежности может быть обеспечено применением резистивного заземления нейтрали в электрических сетях 6–35кВ, позволяющем существенно ограничить уровень дуговых перенапряжений при ОЗЗ и исключить феррорезонансные процессы.

Библиографический список

1. Федосенко, Р.Я. Эксплуатационная надежность электросетей сельскохозяйственного назначения / Р.Я. Федосенко, Л.Я. Мельников. – М.: Энергия, 1977. – 320 с.

2. Федин, В.Т. Принятие решений при проектировании развития электроэнергетических систем / В.Т. Федин. – Минск: Технопринт, 2000. – 165 с.

3. Трофимова, С.Н. Повышение надёжности электроснабжения при резистивном заземлении нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ / С.Н. Трофимова // Электробезопасность. – 2009. – № 2–3.– С. 3–8.

4. Нагорный, П.Д. Измерительные трансформаторы напряжения и контроль изоляции в сетях 6–35 кВ / П.Д. Нагорный, В.В. Назаров // Промышленная энергетика. – 2002. – № 3. – С. 22–23.

5. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3: Производство, передача и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф. Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – 8-е изд., испр. и доп. – Изд-во МЭИ, 2002. – 964 с.

6. Сидоров, А.И. Исследование причин нарушений в работе сельских электрических сетей 6–35 кВ / А.И. Сидоров, С.Н. Трофимова // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 4. – С. 29–31.

К содержанию

УДК 621.774:621.9.01

НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ МАШИНЫ ДЛЯ БЕЗОГНЕВОЙ РЕЗКИ ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Б.А. Лопатин, Т.Р. Хазиев

Выявлены недостатки существующей конструкции машины для безогневой резки труб большого диаметра, описана новая конструкция машины. Приведено описание работы машины.

Ключевые слова: планетарный редуктор; механизм врезания; механизм подачи; фасонная фреза.

В современных тенденциях развития нефтепроводов наблюдается увеличение их пропускной способности, что приводит к росту давления в трубопроводе и как следствие увеличению толщин труб и использование высокопрочных материалов с пределом прочности свыше 60кг/мм^2 (такие трубы используются на нефтепроводе «Восточная Сибирь – Тихий океан»). При строительстве и ремонте таких магистральных трубопроводов используются машины (рис. 1) для безогневой резки труб большого диаметра (далее МРТ) [1, 2]. К конструкциям этих машин предъявляются достаточно жесткие требования: они должны быть высоконадежными, иметь минимальную стоимость, быть простыми в обслуживании, допускать эксплуатацию в сложных климатических условиях, обеспечивать резку труб в широком диапазоне диаметров. От надёжности и производительности МРТ существенно зависит время и стоимость ремонта трубопровода.

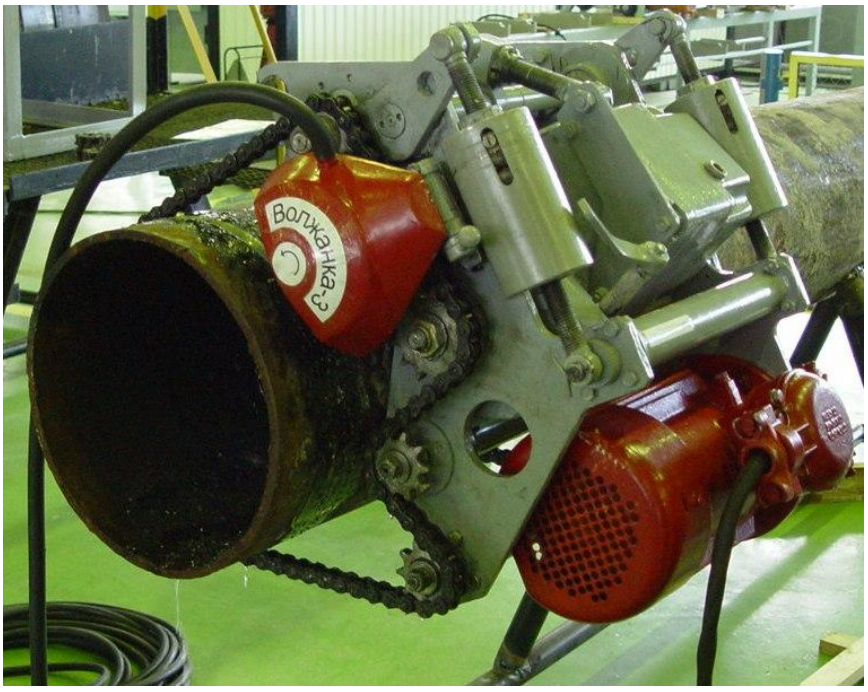


Рис. 1. Машина для безогневой резки труб «Волжанка-3»

Известная конструкция машины для безогневой резки [1], содержит тележку, закрепленную на трубе с помощью охватывающих трубу цепей, с установленным на тележке режущим инструментом с приводом его вращения, механизмом врезания и механизмом подачи инструмента, выполненным в виде планетарного редуктора с приводной звездочкой и устройством его включения. При этом оси приводного двигателя редуктора привода режущего инструмента и редуктора подач расположены параллельно оси трубы, а валы планетарного редуктора привода режущего инструмента и планетарного редуктора подач установлены на одной оси, являющиеся осью поворота устройства при врезании инструмента.

Описанная выше машина имеет следующие недостатки:

– относительно низкий КПД привода вращения инструмента и значительный шум при работе, обусловленный конструкцией планетарного редуктора выполненного по дифференциальной схеме типа 3К. Кроме того в данной машине включение привода подач осуществляется торможением центрального колеса планетарного редуктора с помощью ленточного тормоза. Такая конструкция не обеспечивает надежное включение и работу привода вследствие проскальзывания и механического износа пары трения между солнечным колесом редуктора подачи и лентой тормоза;

– значительный осевой размер машины затрудняет резку коротких отводов трубопроводов;

– ручная подача инструмента при его врезке вызывает необходимость присутствия оператора в непосредственной близости от зоны резания, что является опасным из-за возможного возгорания остатков нефтепродуктов в трубопроводе. Кроме того, ручная врезка инструмента не обеспечивает оптимальных режимов резания и соответственно времени врезания, т.к. зависит от субъективного фактора – квалификации оператора.

Совершенствование конструкции новой машины направлено на повышение КПД и снижение шума привода вращения инструмента, уменьшение осевого размера и массы устройства, повышение безопасности работы оператора.

Применение двухступенчатого планетарного редуктора по схеме 2К-Н в приводе вращения инструмента позволяет снизить шум при его работе, повысить КПД привода, и, как следствие, снизить энергопотребление. А установка выходной шестерни привода вращения фрезы непосредственно на водиле выходной ступени планетарного двухступенчатого редуктора позволяет сократить осевой размер машины, что даёт возможность резки коротких отводов трубопроводов.

Для повышения безопасности работы оператора при врезке инструмента в машине предусмотрена автоматическая врезка инструмента при помощи независимого мотор-редуктора с электродвигателем постоянного тока.

На рис. 2 изображен общий вид машины.

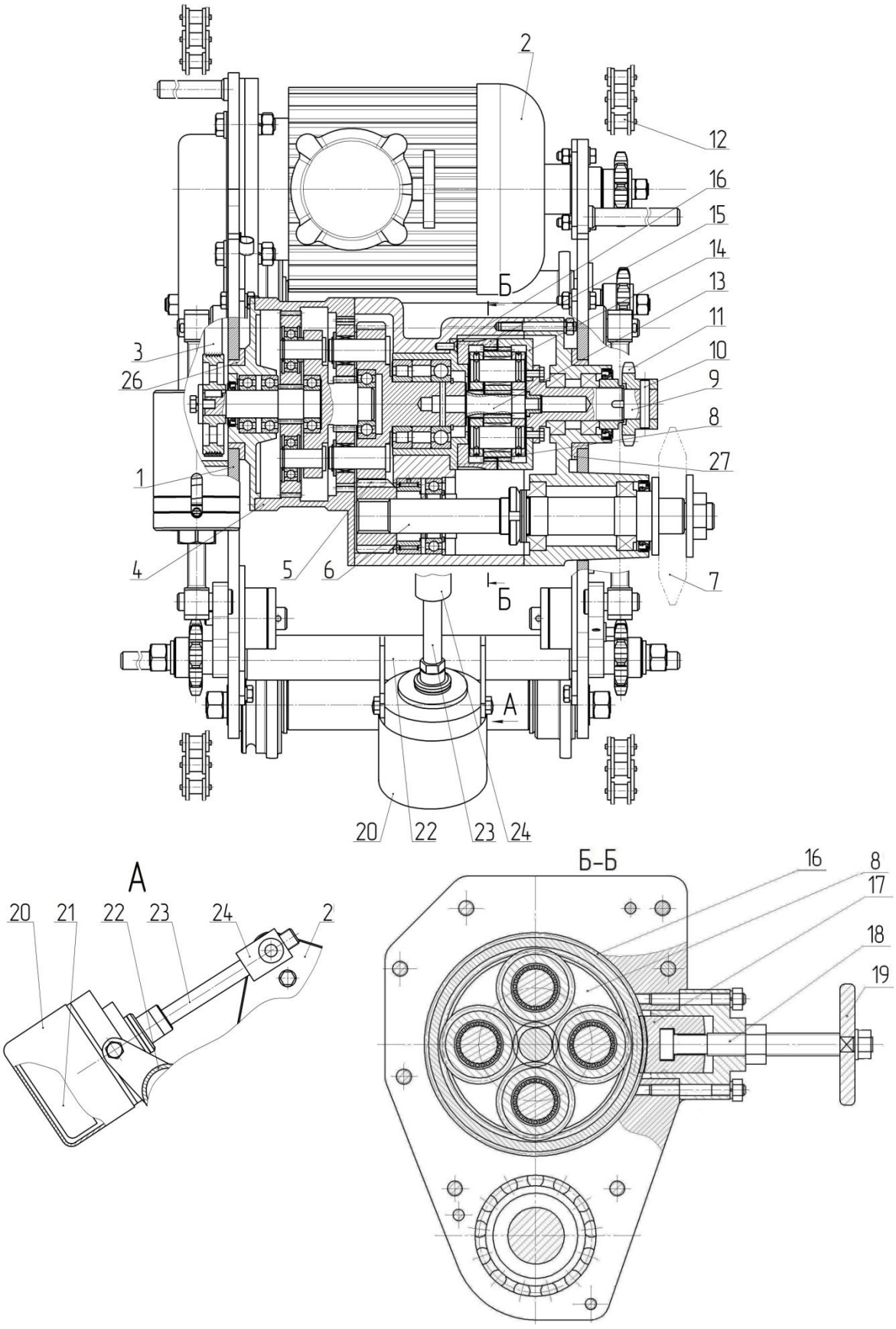


Рис. 2. Общий вид машины

Машина для резки труб содержит тележку 1, привод режущего инструмента, состоящий из электродвигателя 2, ременной передачи 3, планетарного редуктора 4, цилиндрической зубчатой передачи 5, шпинделя 6 с установленным на нем режущим инструментом 7. Привод подачи включает планетарный редуктор 8, на выходном валу 9 которого установлена с помощью срезного штифта 10 приводная звездочка 11, находящаяся в зацеплении с неподвижной цепью 12. Выходной вал планетарного редуктора 4 привода вращения фрезы жестко соединен с ведущей шестерней 13 редуктора 8 привода подач. Одно из центральных колес 14 планетарного редуктора соединено жестко с его выходным валом 9, а другое центральное колесо 15 установлено свободно. На наружной поверхности центрального колеса 15 нарезан зубчатый венец 16. Механизм включения привода подачи содержит фиксатор, выполненный в виде зубчатого сектора 17, винта 18 и ручки 19. Механизм врезания инструмента содержит мотор-редуктор 20 с электродвигателем постоянного тока 21, опорную поперечину 22 тележки 1, винт 23. Гайку 24, шарнирно соединённую с корпусом 25, который установлен в тележке 1 на втулках 26, 27 с возможностью поворота на них.

Машина для резки труб работает следующим образом.

Вращение от вала двигателя 2 через ременную передачу 3 передается на ведущий вал редуктора 4, от ведомого вала этого редуктора через цилиндрическую зубчатую передачу 5 на шпиндель 6 и установленный на нем режущий инструмент (фрезу) 7. Врезка режущего инструмента производится с помощью механизма врезания. При этом вращение от мотор-редуктора 20 передаётся на винт 23, который вызывает перемещение гайки 24 и поворот корпуса 25 на втулках 26, 27 корпуса тележки 1.

Подача инструмента (перемещение тележки 1 по трубе) производится приводом подачи, который приводится в движение от ведомого вала редуктора 4 привода вращения инструмента. Вращение от этого вала передаётся на ведущую шестерню 13 планетарного редуктора 8. При остановленном центральном колесе 15 вращение передается ведомому валу 9 и установленной на нем с помощью срезного штифта 10 приводной звездочке 11. Звездочка 11, которая находится в зацеплении с неподвижной цепью 12, охватывающей разрезаемую трубу, приводит в движение тележку 1, а вместе с ней режущий инструмент 7. Включение механизма подачи осуществляется фиксацией центрального колеса 15 с корпусом привода 25 путем ввода зубчатого сектора 17 с помощью винта 18 в соединение с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15. При отвинчивании винта 18 с помощью ручки 19 зубчатый сектор 17 выходит из зацепления с зубчатым венцом 16 центрального колеса 15 и передача вращения приводной звездочке 11 прекращается. В результате тележка 1 останавливается, подача (перемещение тележки по трубе) прекращается.

При аварийных перегрузках в приводе подачи происходит разрушение срезного штифта 10 и вращение на приводную звездочку 11 не передается, подача останавливается.

Спроектирована машина для резки труб диаметром 315–1440 мм и толщиной стенки до 30 мм.

Машина для резки труб может быть рекомендована при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов.

Библиографический список

1. Грешняев, В.А. Машина для безогневой резки труб «Волжанка – 3М» / В.А. Грешняев // Журнал «Трубопроводный транспорт нефти». – 2009. – № 8. – С. 18–20.

2. Патент на полезную модель 94497 Российская Федерация, МПК B 23 D21/06. Устройство для резки труб / Б.А. Лопатин, Д.Б. Лопатин, Е.А. Полуэктов, Т.Р. Хазиев. – № 2010104653/22; заявл. 10.02.2010; опубл. 27.05.2010 Бюл. № 15. – 3 с.

К содержанию

УДК 621.515.4

К РАСЧЕТУ ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РОТОРОВ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

О.Н. Цуканов

Описан подход к расчету геометрии зубьев роторов и дисковых фасонных фрез для их нарезания в обобщающих параметрах. Приведена укрупненная блок-схема компьютерной программы расчета и результаты расчета для одного из возможных вариантов торцовых профилей зубьев.

Ключевые слова: винтовые компрессоры; профиль зубьев ротора; профиль зубьев фрезы; обобщающие параметры; обобщенные коэффициенты.

Винтовые компрессоры по сравнению с другими типами компрессорных машин отличаются простотой конструкции, более высокой надежностью и долговечностью. Вместе с тем еще имеются значительные резервы повышения производительности, улучшения энергетических показателей и плавности работы, а, следовательно, снижения шума таких компрессоров за счет совершенствования их геометрического проектирования и технологии изготовления инструмента для обработки основных рабочих элементов – зубьев роторов.

Для создания компрессорных машин с наиболее благоприятным комплексом качественных показателей зацепления зубьев роторов необходимо решение задачи совершенствования технологии тесно увязывать с решением задачи совершенствования геометрического проектирования.

Как известно, наиболее эффективной и производительной является обработка инструмента на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Программы обработки подготавливаются с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР). Исходная информация задается в виде массива координат рабочих точек профиля инструмента с малым шагом при линейной аппроксимации или с более крупным шагом при круговой аппроксимации с указанием радиусов аппроксимирующих дуг.

Автором разработан общий подход к расчету профиля зубьев дисковых фасонных фрез для нарезания зубьев роторов с любой формой участков профиля в торцовом сечении.

С этой целью в рассмотрение введены:

– постоянные коэффициенты a_1, a_2, a_3 – общие для любых по форме и размерам участков торцового профиля зубьев ротора;

– обобщающие параметры φ и ε этих участков (рис. 1);

– обобщенные коэффициенты a_4 –a_9, зависящие от их формы.

Чтобы спроектировать профили зубьев дисковых фасонных фрез для нарезания зубьев роторов необходимо иметь значения следующих параметров (исходных данных) [1]:

– винтового параметра $p = t/2\pi$, где t – шаг винтовой поверхности зубьев;

– диаметра начальной окружности ведущего ротора d;

– расстояния от оси фрезы до оси ротора A;

– угла между осью фрезы и осью ротора β;

– чисел зубьев ведущего и ведомого роторов z_1 и z_2;

– высот головок зубьев ведущего и ведомого роторов h_1 и h_2;

– необходимого зазора в зацеплении роторов δ.

В качестве масштабного фактора изделия принимается параметр d.

Значения коэффициентов a_1, a_2, a_3 определяются по следующим формулам:

$$a_1 = p^{*2},\ a_2 = p^* A^* \operatorname{ctg}\beta,\ a_3 = A^* + p^* \operatorname{ctg}\beta,$$

где $p^* = p/d$, $A^* = A/d$.

Торцовый профиль зуба ротора обычно описывается дугами окружности или циклоидальными кривыми. В этом случае обобщающий параметр φ для 1-го участка профиля является его постоянной характеристикой.

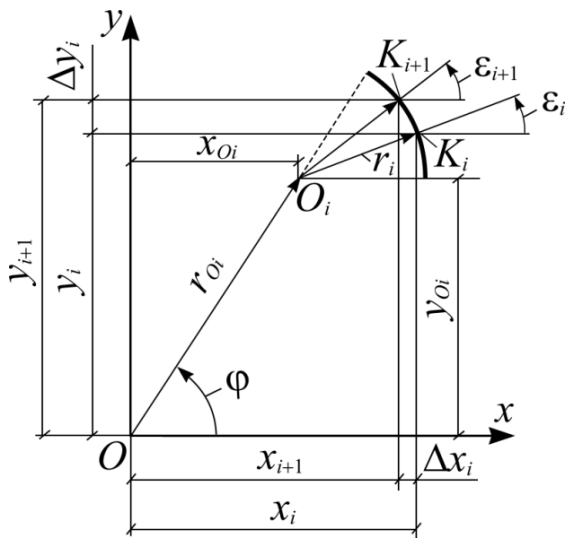


Рис. 1. Обобщающие параметры торцового профиля зуба ротора

В зависимости от значения φ устанавливается один из пределов изменения обобщающего параметра ε, определяющего положение нормали в той или иной точке (*K*) участка (см. рис. 1).

Исследования показали, что уравнения поверхности зубьев ротора при единичном диаметре начальной окружности ведущего ротора ($d = 1$) на любом участке могут быть приведены к следующему обобщенному виду:

$$\begin{aligned} x &= a_4 \cos(a_5\varepsilon + a_6\varphi + \theta) + a_7 \cos(a_8\varepsilon + a_9\varphi + \theta), \\ y &= a_4 \sin(a_5\varepsilon + a_6\varphi + \theta) + a_7 \sin(a_8\varepsilon + a_9\varphi + \theta), \\ z &= p\theta, \end{aligned} \qquad (1)$$

где θ – угловой параметр, определяющий положение точки винтовой поверхности зуба в торцовом сечении.

Для дуги окружности: $a_4 = 0{,}5$, $a_5 = 0$, $a_6 = 1$, $a_7 = h^*$, $a_8 = 1$, $a_9 = 0$; для дуги эпициклоиды: $a_4 = (h^* + u)/2$, $a_5 = 1$, $a_6 = -1$, $a_7 = -h^*/2$, $a_8 = 1 + u/h^*$, $a_9 = -1$. Здесь $h^* = h/d$, $u = z_2/z_1$ – передаточное число.

Для тех участков профиля, форма которых отлична от дуги окружности или циклоиды, величина параметра φ рассчитывается для каждой аппроксимирующей дуги в зависимости от заданного значения параметра ε_i в одной из ее граничных точек с координатами x_i, y_i (см. рис. 1).

Остальные значения ε в соответствующих расчетных точках определяются по формуле

$$\varepsilon_{i+1} = \operatorname{arctg}(y_{i+1} - y_{Oi})/(x_{i+1} - x_{Oi}),$$

где x_{i+1}, y_{i+1} – координаты $(i+1)$ –ой точки кривой профиля; x_{Oi}, y_{Oi} – координаты центра O_i аппроксимирующей дуги (см. рис. 1).

Выражение для определения радиуса r_i аппроксимирующей дуги нетрудно найти из треугольника $K_iO_iK_{i+1}$ (см. рис. 1):

$$r_i = [(\Delta x_i)^2 + (\Delta y_i)^2]^{0,5}/2\cos[\varepsilon_i - \operatorname{arctg}(\Delta x_i/\Delta y_i)^{-1}],$$

где $\Delta x_i = x_{i+1} - x_i$, $\Delta y_i = y_{i+1} - y_i$.

Тогда:

$$x_{Oi} = x_i - r_i \cos \varepsilon_i,$$

$$y_{Oi} = y_i - r_i \sin \varepsilon_i.$$

Уравнения аппроксимирующей дуги:

$$x = r_{Oi} \cos \varphi_i + r_i \cos \varepsilon_{i+1},$$

$$y = r_{Oi} \sin \varphi_i + r_i \sin \varepsilon_{i+1},$$

где $\varphi_i = \operatorname{arctg}(y_{Oi}/x_{Oi})$, $r_{Oi} = (x_{Oi}^2 + y_{Oi}^2)^{0,5}$.

Количество расчетных точек или шаг аппроксимации выбираются таким образом, чтобы обеспечить возможность изготовления зубьев ротора с необходимой степенью точности [1].

Исходя из основной теоремы зацепления, согласно которой вектор скорости относительного движения звеньев должен лежать в общей касательной плоскости к сопряженным поверхностям зубьев в точке их касания, получено общее уравнение зацепления вида:

$$0,5(A - x + p \operatorname{ctg} \beta)\, \partial(x^2 + y^2)/\partial t + p(p\theta\, \partial y/\partial t - A \operatorname{ctg} \beta\, \partial x/\partial t) = 0. \qquad (2)$$

Координаты $Z_ф$, $R_ф$ рабочих точек профиля зуба фрезы в ее диаметральном сечении находятся в зависимости от значений параметра ε и соответствующих им значений параметра θ, определяющего положение точки винтовой поверхности зуба ротора на линии зацепления с фрезой [1]:

$$Z_ф = z \cos \beta - y \sin \beta, \qquad (3)$$

$$R_ф = (x_ф^2 + y_ф^2)^{0,5} = [(A - x)^2 + (y \cos \beta + z \sin \beta)^2]^{0,5}. \qquad (4)$$

Расчет выполняется в следующем порядке:

1) по заданным уравнениям участков торцового профиля зубьев ротора определяются значения обобщенных коэффициентов в уравнениях (1);

2) раскрывается уравнение зацепления (2);

3) задается ряд значений параметра ε и из уравнения зацепления численным методом находятся соответствующие значения параметра θ;

4) по уравнениям (1) находятся значения координат точек зубьев ротора;

5) по формулам (3) и (4) находятся соответствующие значения координат точек зубьев фрезы.

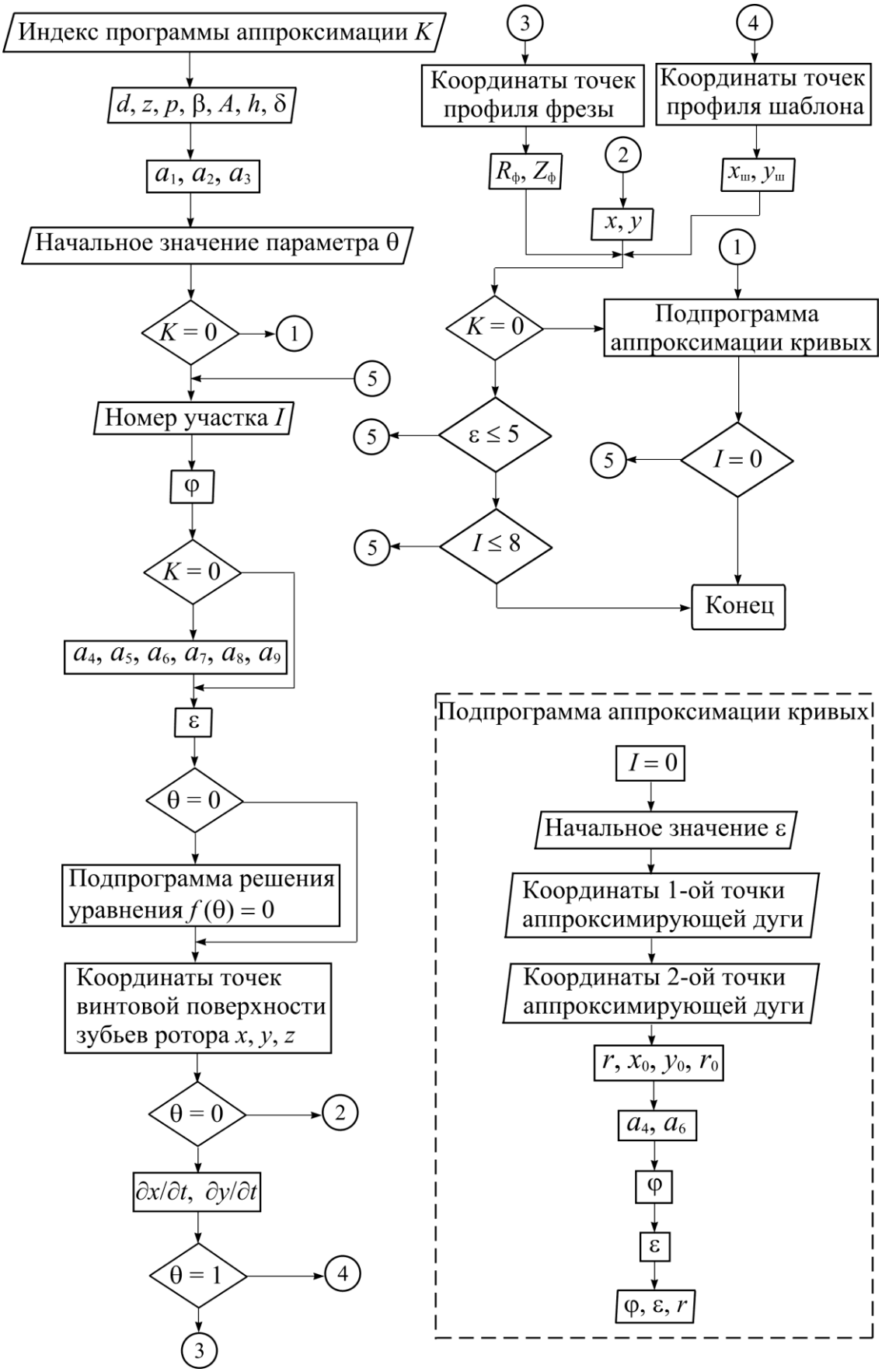
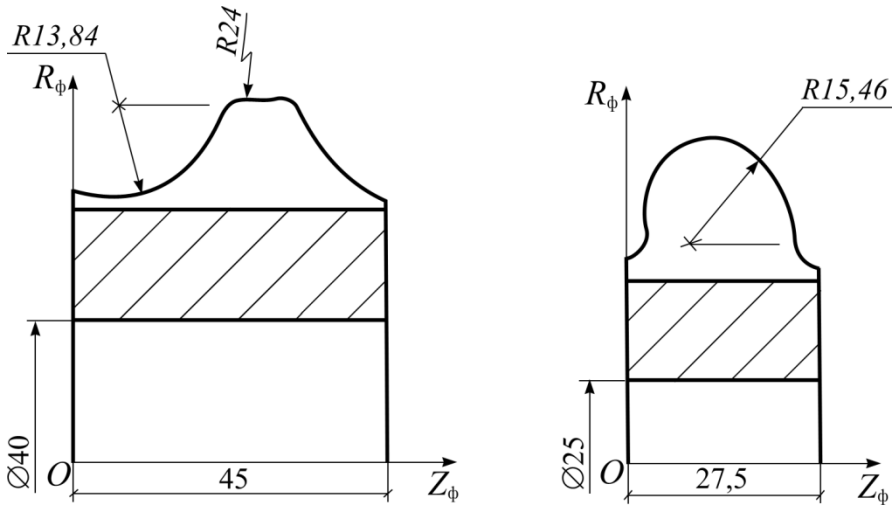


Рис. 2. Блок-схема программы расчета профилей зубьев роторов и фрез

На рис. 2 показана укрупненная блок-схема программы расчета геометрии зубьев роторов, дисковых фасонных фрез для их нарезания и мерительных шаблонов для контроля. На рис. 3 показаны расчетные профили дисковых фасонных фрез в диаметральном сечении для обработки ведущего и ведомого роторов при следующих исходных данных:

$$d = 50 \text{ мм}, z_1 = 4,\ p_1 = 0{,}891\text{d},\ \beta_1 = 60{,}7°,\ A_1 = 1{,}5\text{d},\ h_1 = 0{,}33d;$$
$$z_2 = 6,\ p_2 = -1{,}337\text{d},\ \beta_2 = 60{,}7°,\ A_2 = 1{,}3\text{d},\ h_2 = 0{,}02d.$$



а) б)

Рис. 3. Расчетные профили дисковых фасонных фрез в диаметральном сечении для нарезания зубьев ведущего (а) и ведомого (б) роторов

Библиографический список

1. Амосов, П.Е. Винтовые компрессорные машины: справочник / П.Е. Амосов. – Л.: Машиностроение (Ленинградское отделение), 1977. – 256 с.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. КЫШТЫМ

УДК 519.6 + 004.4

ФИЛЬТРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РЕНТГЕНОВСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Е.Н. Симонов, В.В. Ласьков

Проведена систематизация методов фильтрации артефактов и шумов изображений применительно к изображениям медицинской рентгеновской компьютерной томографии (КТ), рассмотрены их фильтрующие качества, определены наиболее значимые методы и их комбинации для КТ, разработаны алгоритмы и программы для комбинированных методов фильтрации и осуществлено применение их в программном обеспечении КТ.

Ключевые слова: фильтрация; эквализация; томограмма.

Уменьшение влияния артефактов и шумов на качество томографического изображения проводят путем применения фильтрации проекционных данных, или самого изображения, или того или другого совместно. Методы фильтрации можно классифицировать следующим образом.

Пространственная фильтрация:

- линейная пространственная фильтрация (с различным размером маски фильтрации):
  - метод скользящего среднего;
  - метод взвешенного среднего;
- нелинейная пространственная фильтрация (с различным размером маски фильтрации):
  - медианная;
  - метод первой производной;
  - метод второй производной (лапласиан);
  - эквализация;
  - комбинированные фильтры;
- адаптивная пространственная фильтрация:
  - адаптивные локальные фильтры;
  - адаптивные медианные фильтры;
  - рекурсивные фильтры;
  - адаптивные оптимальные фильтры.

Частотная фильтрация:

- низкочастотные фильтры;
- высокочастотные фильтры;
- режекторные (полосовые) фильтры.

Вейвлет-фильтрация.

Линейная пространственная фильтрация основана на определении среднего значения в определенной окрестности, покрытой маской фильтра. Фильтрация исходного изображения проводится последовательно для каждого пикселя изображения, который накрывается маской фильтра, координаты центрального элемента которой совпадают с координатами фильтруемого пикселя изображения.

В общем виде отфильтрованное изображение $g(x,y)$ можно представить в следующем виде:

$$g(x,y)=\frac{\sum_{S=-a}^{a}\sum_{S=-b}^{b}w(s,t)f(x+s,y+t)}{\sum_{S=-a}^{a}\sum_{S=-b}^{b}w(s,t)}, \quad (1)$$

где $f(x+s,y+t)$ – исходное изображение, s и t – координаты маски фильтра, $w(s,t)$ – значения маски,

$a=(m-1)/2$, $b=(n-1)/2$, где m и n размеры маски фильтра; минимальный размер маски $m*n$ равен $3*3$.

Формула (1) описывает метод средневзвешенной фильтрации, при $w(s,t)=1$ для всех координат маски обращается в метод скользящего среднего.

Линейная пространственная фильтрация «убирает» высокие пространственные частоты и потому уменьшает резкость изображения.

Нелинейная пространственная фильтрация основана на порядковых статистиках. Медианную фильтрацию можно представить в следующем виде:

$$g(x,y)=\underset{(s,t)\in S_{xy}}{med}\{f(x,y)\}, \quad (2)$$

где S_{xy} – прямоугольная окрестность размерами $m*n$ с центром в точке (x,y).

Медианная фильтрация в меньшей степени «убирает» высокие пространственные частоты и потому хорошо фильтрует артефакты и шумы с некоторым сохранением резкости изображения. К фильтрам повышения резкости изображения относятся фильтры, основанные на первой и второй производной. Для фильтрации артефактов и шумов фильтры, основанные на первой и второй производной, напрямую, как правило, не используются. Эти фильтры используются как часть комбинированных сложных фильтров. Примером может служить фильтрация:

$$g(x,y)=f(x,y)-\nabla^2 f(x,y), \text{ если } w(0,0)<0 \quad (3)$$

$$g(x,y)=f(x,y)+\nabla^2 f(x,y), \text{ если } w(0,0)\geq 0. \quad (4)$$

Эквализация изображения предполагает изменение гистограммы его яркости с выделением определенного ее диапазона. Для фильтрации артефактов и шумов эквализация напрямую не применяется, она используется

в сложных комбинированных фильтрах – фильтрах, состоящих из последовательности описанных ранее фильтров. Наиболее эффективными фильтрами изображения и, как правило, наиболее сложными являются адаптивные фильтры. Фильтрацию с применением адаптивных локальных фильтров можно представить в следующем виде:

$$g(x,y) = f(x,y) - \frac{\sigma_\eta^2}{\sigma_L^2}[f(x,y) - m_L], \quad (5)$$

где σ_η^2 – дисперсия шума общего изображения, σ_L^2 – локальная дисперсия в окрестности S_{xy}, m_L – локальное среднее в окрестности S_{xy}.

Адаптивный локальный фильтр работает следующим образом:

– если дисперсия шума σ_η^2 равна нулю, то $g(x,y) = f(x,y)$;

– если локальная дисперсия σ_L^2 много больше σ_η^2, то $g(x,y) = f(x,y)$;

– если обе дисперсии принимают значения одного порядка, то $g(x,y) = m_L$.

Применение адаптивного медианного фильтра позволяет изменять размер маски фильтра и сохранять более мелкие детали изображения. Более эффективными являются рекурсивные фильтры и адаптивные оптимальные фильтры. С ними можно ознакомиться в статье [1]. Особое место в фильтрации изображений занимают методы, основанные на преобразовании Фурье – частотные методы. Эти методы, как правило, применяются для уменьшения периодических артефактов и шумов.

Базовая модель частотных методов выглядит следующим образом:

$$G(\omega_1, \omega_2) = H(\omega_1, \omega_2) F(\omega_1, \omega_2), \quad (6)$$

где $G(\omega_1, \omega_2)$ – Фурье-образ отфильтрованного изображения, $F(\omega_1, \omega_2)$ – Фурье-образ исходного изображения, $H(\omega_1, \omega_2)$ – фильтр (Фурье-образ передаточной функции), ω_1, ω_2 – пространственные частоты, соответственно, по осям X и Y изображения.

Выбор функции $H(\omega_1, \omega_2)$ определяет область фильтрации частот: низкочастотные, высокочастотные и режекторные (полосовые) фильтры.

Особую группу фильтров представляют фильтры, основанные на вейвлет-преобразовании. Вейвлет-преобразование – это наиболее тонкий инструмент фильтрации двухмерных сигналов (изображений). Вейвлет-преобразование, в отличие Фурье-преобразования, обладает свойством однозначного соответствия пространственной области и частотной, а также более избирательной способностью фильтрации изображений с резкими перепадами локальных областей и импульсным шумом. Более подробно с вейвлет-фильтрацией можно ознакомиться в статье [2].

Были разработаны алгоритмы и программы для комбинированных (составных) методов фильтрации и применены в программном обеспече-

нии рентгеновского компьютерного томографа для всего тела человека РКТ-01 [3,4]. Реализация некоторых фильтров томографических изображений в системе Matlab представлена ниже.

Фильтрация в пространственной области

На рис. 1 показаны томограммы мозга человека после фильтрации исходной томограммы комбинированными фильтрами в пространственной области с применением формул (1)–(5).

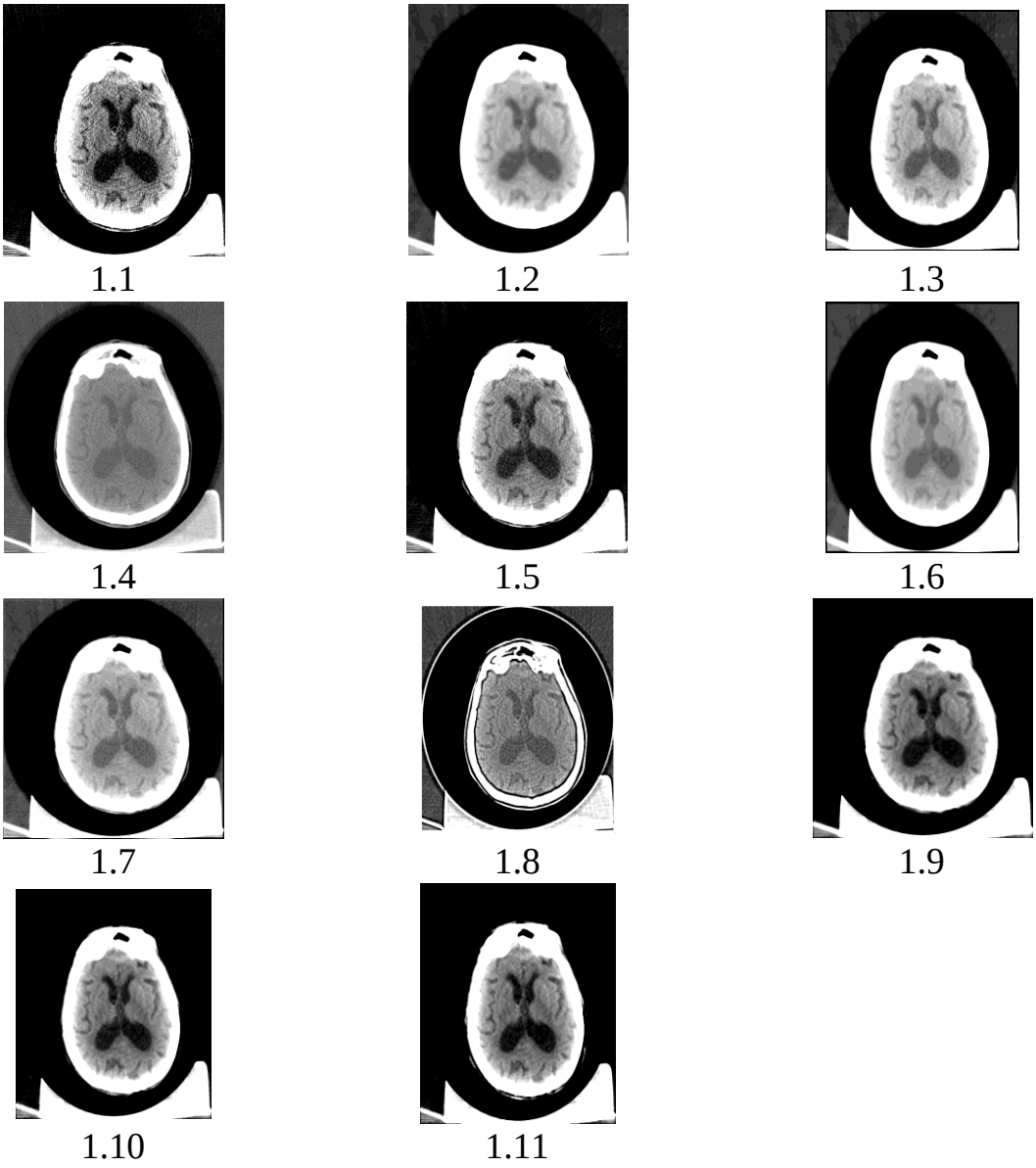
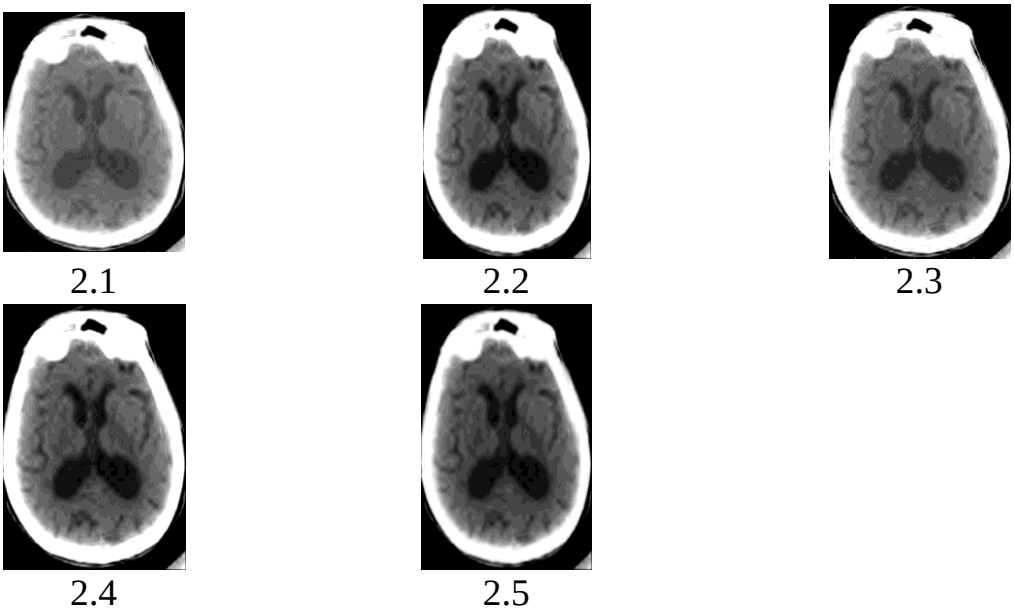


Рис. 1. 1.1 – исходная томограмма, 1.2, 1.3 – после применения выравнивания гистограммы яркости совместно с медианным фильтром с различной величиной маски, 1.4, 1.5, 1.6 – после применения гауссовского фильтра совместно с выравниванием гистограммы яркости и лапласианом, 1.7, 1.8, 1.9 – с выделением колец лапласианом, их вычитанием и медианной фильтрацией, 1.10, 1.11 – после применения адаптивной медианной фильтрации

Фильтрация в частотной области

На рис. 2 показаны томограмы мозга человека после фильтрации исходной томограммы комбинированными фильтрами в частотной области.



2.1 2.2 2.3

2.4 2.5

Рис. 2. Результаты фильтрации в частотной области: 2.1 – исходная томограмма; 2.2, 2.3 – с применением фильтра низких частот; 2.4 – с применением фильтра высоких частот; 2.5 – с применением режекторного фильтра

Вейвлет-фильтрация

На рис. 3 показаны томограмы мозга человека после вейвлет-фильтрации исходной томограммы.

3.1 3.2

Рис. 3. Результаты вейвлет-фильтрации: 3.1 – исходная томограмма; 3.2 – с применением вейвлета Добеши db4

Результаты исследований по фильтрации артефактов и шумов на томографических изображениях показали высокую эффективность применения комбинированных фильтров, основанных на нелинейных методах фильтрации.

Разработанные алгоритмы и программы внедрены в ПО рентгеновского компьютерного томографа для всего тела человека РКТ-01 и могут быть применены также в других медицинских томографических комплексах.

Библиографический список

1. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений: монография / Р. Гонсалес, пер. с англ. – М.: Техносфера, 2006. – 1070 с.

2. Соломенцев, Н.К. Основы теории вейвлетов: монография / Н.К. Соломенцев. – М.: ДМК, 2008. – 445 с.

3. Симонов, Е.Н. Физико-математические основы проектирования томографических рентгеновских компьютерных комплексов: монография / Е.Н. Симонов. – М.: Российская Академия Естествознания, 2011. – 410 с.

4. Симонов, Е.Н. Томографические измерительные информационные системы. Рентгеновская компьютерная томография: монография / Е.Н. Симонов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 440 с.

К содержанию

УДК 519.6 + 004.4

ФИЛЬТРАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ТОМОГРАММ МЕТОДОМ АДАПТАЦИИ РАЗМЕРА ОКНА ФИЛЬТРА К ЛОКАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Е.Н. Симонов, В.В. Ласьков

Предложен алгоритм фильтрации изображений медицинской рентгеновской компьютерной томографии с адаптацией размеров апертуры и метода фильтрации к локальным характеристикам изображения. Алгоритм реализован в виде программного обеспечения и апробирован на проекционных данных томографических изображений. Приведено описание алгоритма и формул, лежащих в его основе. Оценена погрешность, даваемая алгоритмом, приведено сравнение с существующими методами фильтрации.

Ключевые слова: алгоритм фильтрации; тестовое изображение; погрешность алгоритма.

Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры были представлены в статьях Воскобойникова, Белявцева и Бронникова [1, 2]. Известно, что степень сглаживания сигналов зависит от размеров апертуры фильтра. При малом размере апертуры фильтра обработке подвергается меньшее число значений, что обеспечивает лучшее сохранение контрастных деталей сигнала, но при этом шум будет сглажен хуже. При большом размере апертуры фильтра сглаживание шума будет происходить лучше, однако при этом возможна «потеря» некоторых контрастных дета-

лей, присутствующих в исходном сигнале. Таким образом, введение алгоритмов адаптации размеров апертуры позволяет улучшить качественные характеристики данного локального фильтра.

В настоящей статье предложен алгоритм фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры к локальным характеристикам этих изображений.

Описание алгоритма

Основой адаптивного алгоритма является выбор оптимальных параметров фильтрации: определение размера апертуры фильтра по локальным статистикам (локальное среднее, локальная дисперсия, дисперсия шума) и типа фильтра (медианный, скользящего среднего или комбинированный) в зависимости от локальных статистик изображения.

Входные параметры фильтра:

– минимальный и максимальный горизонтальный размер апертуры;

– минимальный и максимальный вертикальный размер апертуры;

– значения параметров k и ε, определяющих чувствительность алгоритма к адаптации. Описание выбора параметров приведено ниже.

Шаги алгоритма описаны ниже.

1. Задаются ограничения на минимальный и максимальный размеры апертуры; задаются параметры k и ε.

2. Первоначальный размер апертуры устанавливается минимальным.

3. Флаг выбора размеров апертуры устанавливается в 0.

4. Флаги изменения размеров апертуры устанавливаются в 1.

5. Пока флаг выбора размеров апертуры не равен 1, выполняется подбор размеров апертуры.

6. При выбранном размере апертуры для выбранной точки рассчитывается медиана.

7. Оценивается дисперсия шума.

8. Рассчитываются средние значения яркости по строкам и столбцам изображения.

9. Рассчитываются среднеквадратические отклонения по строкам и столбцам изображения.

10. Производится проверка условия превышения среднеквадратическими отклонениями заданного уровня шума.

11. В случае истинности условия для строки или столбца соответствующий размер апертуры уменьшается, устанавливаются флаги изменения размеров апертуры.

12. В случае ложности условия соответствующий размер апертуры увеличивается, устанавливаются флаги изменения размеров апертуры.

13. Производится проверка выхода установленных размеров апертуры за пределы минимальных и максимальных размеров.

14. В случае достижения одним из размеров фильтра предельного значения расчёт размеров апертуры заканчивается, флаг выбора размера устанавливается в единицу.

15. Осуществляется проверка критерия останова: если знак приращения размеров апертуры меняется на противоположный, то флаг выбора устанавливается 1, иначе флаг выбора остаётся равным 0.

16. Если флаг выбора равен 0, осуществляется переход к шагу 5.

17. Для выбранного размера апертуры рассчитывается медиана.

18. Для выбранного размера апертуры рассчитывается дисперсия шума.

19. Для выбранного размера апертуры рассчитывается среднее значение.

20. Для выбранного размера апертуры рассчитывается локальная дисперсия.

21. Оценивается и корректируется величина μ.

22. По рассчитанной величине μ определяется тип фильтра.

23. При рекурсивной реализации алгоритма значению $x^{in}(k,l)$ текущей точки присваивается рассчитанное значение $f_{вых}$.

Оценка параметров

Параметр k

На шаге 10 проводится проверка неравенств:

$$\nu_r^2(k,l) \geq k\sigma_M^2,$$
$$\nu_c^2(k,l) \geq k\sigma_M^2$$

где $\nu_r^2(k,l)$ и $\nu_c^2(k,l)$ – среднеквадратическое отклонение по строкам и столбцам, $k\sigma_M^2$ – оценка шума.

В случае истинности условия для строки или столбца соответствующий размер апертуры уменьшается, в обратном случае – увеличивается.

Соответственно, возможные варианты выбора параметра k:

– k<1, если требуется удерживать размеры апертуры, близкие к минимальным;

– k=1, если требуется расчёт по действительной величине шума;

– k>1, если требуется удерживать размеры апертуры, близкие к максимальным.

Параметр E

На шаге 21 оценивается величина μ:

$$\mu = 1 - \frac{XD}{DISP},$$

где XD – дисперсия шума; DISP – локальная дисперсия. Величина μ может принимать следующие значения:

– $\mu = 1$, если локальная дисперсия значительно превосходит дисперсию шума (происходит резкое изменение изображения);

– $0 < \mu < 1$, если размеры локальной дисперсии и дисперсии шума сопоставимы;

– $\mu = 0$, если дисперсия шума превосходит локальную дисперсию (отклонения обусловлены шумом).

По значениям μ и ε определяется тип фильтра:

$$f_{вых} = \begin{cases} f^{M}, & если\ 1-\varepsilon < \mu \le 1, \\ \mu f^{M} + (1-\mu) f^{CP}, & если\ \varepsilon \le \mu \le 1-\varepsilon, \\ f^{CP}, & если\ 0 \le \mu < \varepsilon \end{cases}$$

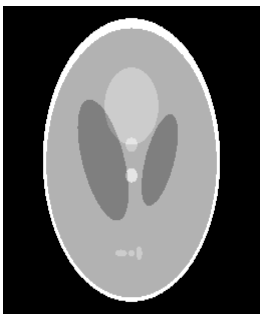
соответственно, имеют смысл значения $\varepsilon \in (0{,}0; 0{,}5)$. Чем большее значение имеет ε, тем шире полосы медианного фильтра и фильтра скользящего среднего. При малых значениях ε расширяется полоса комбинированного фильтра: при $\varepsilon \in = 0{,}05$ полоса составит $(0{,}05; 0{,}95)$.

Результаты вычислительных экспериментов

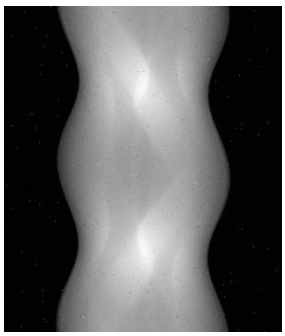
Описание тестового изображения

В качестве тестового изображения использовалось изображение, восстановленное с помощью реконструктора [3, 4] по проекционным данным фантома Шеппа-Логана. Для ухудшения качества изображения на проекционные данные был наложен гауссовый белый шум. Единичные канальные ошибки были смоделированы наложением импульсного шума.

Проекционные данные представлены на рисунке 1.



1)



2)

Рис. 1. Фантом Шеппа-Логана: 1) исходное изображение;
2) зашумлённые проекционные данные

Результаты фильтрации

Полученное изображение было обработано предлагаемым фильтром, а также медианным фильтром и фильтром скользящего среднего в один и два прохода. Результаты фильтрации представлены в таблице 1.

Оценка среднеквадратической ошибки фильтрации производилась по формуле:

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left(\bar{f}_{i,j} - f_{i,j}\right)^2 / \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} f_{i,j}{}^2 ,$$

где $\bar{f}_{i,j}$ – значение отфильтрованной точки изображения, $f_{i,j}$ – значение исходной точки изображения без искажений и шума.

Оценка относительной ошибки фильтрации производилась по формуле:

$$\Delta_2 = \left[\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\left(\bar{f}_{i,j} - f_{i,j}\right)^2 / \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J} f_{i,j}{}^2\right]^{1/2} 100\%$$

где $\bar{f}_{i,j}$ – значение отфильтрованной точки изображения, $f_{i,j}$ – значение исходной точки изображения без искажений и шума.

Полученные проекционные данные были восстановлены. Рассчитанные ошибки фильтрации представлены в табл. 2, восстановленные изображения представлены на рис. 2.

По результатам фильтрации можно сделать вывод, что предлагаемый алгоритм даёт ошибку фильтрации меньшую, чем фильтр скользящего среднего, и сравнимую с ошибкой медианного фильтра. Наименьшая ошибка фильтрации достигается при значениях параметров $k > 1, e = 0{,}15$.

Таблица 1

Параметры фильтрации

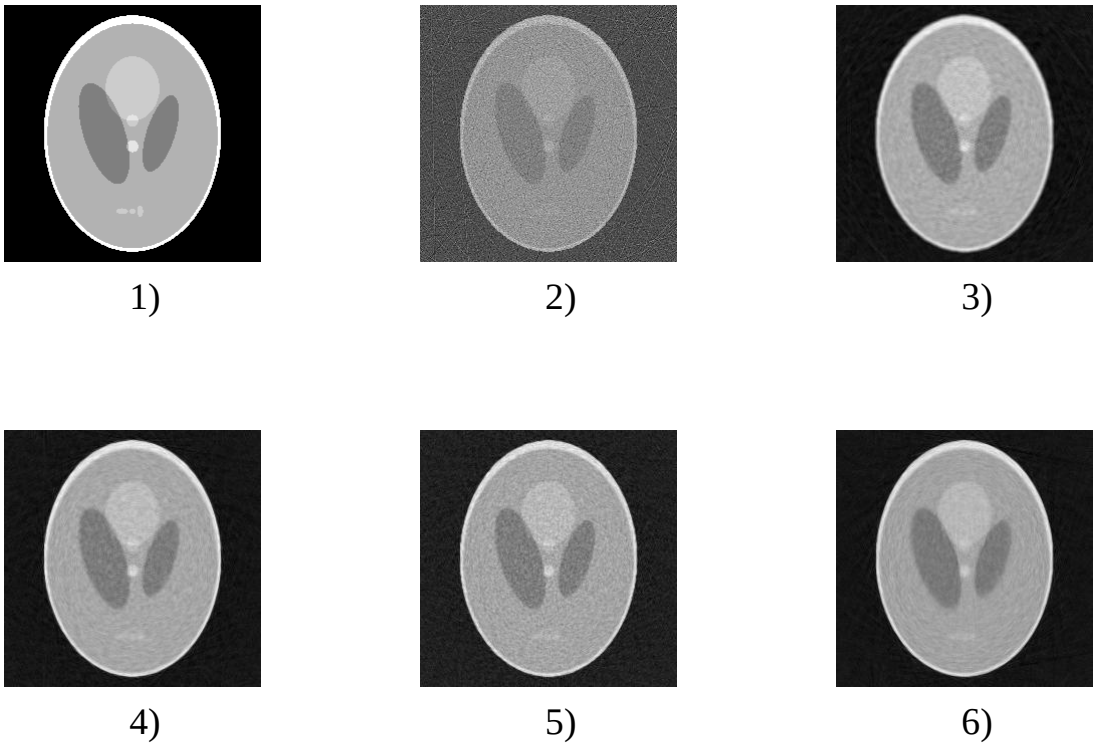
№ п/п	Параметры	Δ_1, 10^{-4}	Δ_2, %
1	k=0,95, e=0,05	3,20	1,79
2	k=1,00, e=0,15	3,16	1,78
3	k=1,05, e=0,15	3,15	1,77
4	k=1,05, e=0,25	3,16	1,78
5	k=1,05, e=0,15 (рекурсивно, 1 проход)	2,89	1,70
6	k=1,05, e=0,15 (рекурсивно, 2 проход)	2,65	1,63
7	ФСС, апертура 3*3, 1 проход	8,61	2,93
8	ФСС, апертура 3*3, 2 проход	9,91	3,15
9	ФСС, апертура 5*5, 1 проход	9,56	3,09
10	ФСС, апертура 5*5, 2 проход	15,00	3,87
11	МФ, апертура 3*3, 1 проход	3,55	1,89
12	МФ, апертура 3*3, 2 проход	2,30	1,52
13	МФ, апертура 5*5, 1 проход	1,77	1,33
14	МФ, апертура 5*5, 2 проход	1,32	1,15

Таблица 2

Ошибки фильтрации

№ п/п	Параметры	Δ_1	Δ_2, %
1	Изображение, восстановленное с зашумлёнными проекционными данными	0,2503	50,0 %
2	ФСС, апертура 5*5, 1 проход	0,0306	17,5 %
3	МФ, апертура 5*5, 1 проход	0,0295	17,2 %
4	Комб, k=1,05, e=0,15	0,0500	22,4 %
5	Комб, k=1,05, e=0,15, рекурсивно, 2 прохода	0,0324	18,0 %

Также можно сделать вывод, что при сравнимом объёме ошибок границы высококонтрастных объектов остаются более резкими, в монотонных областях содержится меньше «зернистости», что является критичным в томографии.



1) 2) 3)

4) 5) 6)

Рис. 2. Восстановленные изображения (1 проход): 1) исходное изображение; 2) изображение, восстановленное с зашумлёнными проекционными данными; 3) фильтр скользящего среднего, апертура 5*5; 4) медианный фильтр, апертура 5*5; 5) предлагаемый комбинированный фильтр, $k = 1{,}05, e = 0{,}15$; 6) предлагаемый комбинированный рекурсивный фильтр, $k = 1{,}05, e = 0{,}15$

Заключение

В результате исследований были решены следующие задачи:

– проанализированы существующие адаптивные алгоритмы в области обработки изображений;

– предъявлены требования к создаваемому алгоритму;

– создан и протестирован алгоритм фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры и метода фильтрации к локальным характеристикам изображения;

– оценены погрешности, даваемые алгоритмом, в сравнении с существующими методами фильтрации.

Предложенный алгоритм можно использовать для фильтрации проекционных данных в рентгеновской компьютерной томографии.

Библиографический список

1. Воскобойников, Ю.Е. Алгоритмы фильтрации изображений с адаптацией размеров апертуры / Ю.Е. Воскобойников, В.Г. Белявцев // Автометрия. – 1998. – № 3.

2. Воскобойников, Ю.Е. Комбинированные алгоритмы нелинейной фильтрации зашумленных сигналов и изображений / Ю.Е. Воскобойников, А.В. Бронников // Автометрия. – 1990. – № 1.

3. Симонов, Е.Н. Физико-математические основы проектирования томографических рентгеновских компьютерных комплексов: монография / Е.Н. Симонов. – М.: Российская Академия Естествознания, 2011. – 410 с.

4. Симонов, Е.Н. Томографические измерительные информационные системы. Рентгеновская компьютерная томография: монография / Е.Н. Симонов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 440 с.

К содержанию

УДК 378.14.014.13 + 378.026.7

ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТОВ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИЗИКИ В ВУЗЕ

Т.В. Киселева

Статья посвящена вопросам организации учебного процесса по дисциплине базовой части учебного плана, составленного в соответствии с ФГОС ВПО. Согласно плану, на самостоятельную работу студентов отводится 50 % всех часов, выделенных для изучения физики, из них некоторая часть – на контроль самостоятельной работы. В связи с этим в статье выделяются два направления применения компьютерных технологий при обучении: непосредственное применение на занятиях и при организации самостоятельной работы студентов.

Ключевые слова: информационные технологии; рейтинговая система; электронный комплекс методического обеспечения; журнал учета текущего рейтинга; самостоятельная работа студентов; виртуальный лабораторный комплекс по физике.

В современной системе высшего образования одним из условий качественной подготовки студентов является постоянное совершенствование технологии обучения в соответствии с инновациями в области информационных, коммуникационных и педагогических технологий, поиском новых возможностей при работе с информационными ресурсами [1].

Причиной использования новых информационных технологий в образовании является то, что объем учебной и научно-технической информации постоянно растет, количество часов же, отводимых на ее изучение, остается постоянным или даже уменьшается. Кроме этого, в вузовской образовательной системе существует проблема, связанная с неэффективностью существующих форм и методов обучения, систем контроля и показателей достоверности.

Применение информационных технологий в учебном процессе позволяет говорить об определенных преимуществах: становится возможной принципиально новая организация самостоятельной работы студентов (в современной обучающей практике ей придается особое значение), возрастает интенсивность учебного процесса, у студентов появляется дополнительная мотивация к познавательной деятельности, доступность учебных материалов в любое время, возможность самоконтроля [2].

В соответствии с требованиями ФГОС ВПО разрабатывается основная образовательная программа (ООП) по направлению подготовки. Содержание и организация образовательного процесса при реализации ООП регламентируются учебным планом, графиком учебного процесса и т.д., в том числе рабочими программами учебных дисциплин с учетом самостоятельной работы студента.

На основании рабочей программы по физике разрабатывается электронный комплекс методического обеспечения учебного процесса по данной дисциплине. В его состав входят:

– инструктивный блок (включает изложение цели, задач курса физики, определение места дисциплины в системе профессиональной подготовки и связей с другими дисциплинами, учебную программу, формы отчетности, итогового и промежуточного контроля);

– информационный блок (в нем представлена определенным образом структурированная учебная информация);

– организационный блок (отражает организационные стороны изучения курса физики, прежде всего самостоятельной работы студентов, тем более что дисциплина читается на первом и втором курсе, что является важным фактором повышенных требований к организации самостоятельной работы еще неопытных студентов и формы дидактического электронного общения преподавателя со студентами);

– контролирующий блок (содержит журнал учета результатов рейтингового контроля по различным модулям учебной программы дисциплины и перехода студентов от одной ступени обучения к другой).

Использование рейтинговой системы позволяет добиться более ритмичной работы студентов в течение семестра. Полезным является тестовый контроль знаний и умений студентов, он объективен и экономит время преподавателя [3].

В течение семестра учебный процесс по физике организован следующим образом. В локальной сети вуза размещается комплекс методического обеспечения дисциплины; там же размещается журнал учета, и студент может следить за текущим рейтингом. Занятия проводятся как в традиционной форме, так и с применением компьютерных технологий: например, лабораторные работы проводятся виртуально (используется комплекс виртуальных лабораторных работ по физике). В виртуальном варианте используется фотографическое изображение реальной установки и используемых в ней измерительных приборов и инструментов.

Виртуальный эксперимент не может полностью заменить реальный, однако с его помощью удается изучать явления, реализация которых затруднена или совсем невозможна (например, лабораторная работа «Изучение α-распада радиоактивного изотопа плутония»). Кроме этого, наличие виртуального лабораторного комплекса решает проблему модернизации лабораторной базы в вузе.

Практические занятия начинаются с опроса, состоящего из десяти вопросов, за который студент может получить 10 баллов.

Контрольные работы (за семестр их проводится две) оцениваются в 50 баллов. Кроме этого, студенты получают индивидуальное семестровое задание (50 баллов). В конце семестра проходит его защита, выставляется итоговая оценка, а экзаменационная оценка – с учетом итоговой.

Итоговая оценка определяется таким образом: если рейтинг студента составляет менее 30 %, ставится оценка «неудовлетворительно», от 30 % до 50 % – «удовлетворительно», от 50 % до 80 % – «хорошо» и от 80 % до 100 % – «отлично».

Предложенная система проста, доступна, позволяет достаточно корректно определять знания студентом данного курса, исходя из посещаемости, написанных тестов, сданных семестровых работ и т.д. Одновременно ведутся и учет посещаемости студентами занятий, и проверка полученных ими знаний.

Объективно оценить степень соответствия содержания и уровня подготовки студентов требованиям ФГОС позволяет участие в федеральном интернет-экзамене в сфере профессионального образования (ФЭПО).

Модернизация учебного процесса, происходящая в настоящее время, направлена, прежде всего, на повышение его эффективности, а современные образовательные технологии ориентированы на достижение глубокого усвоения знаний, умений и навыков, на формирование общих и специальных компетенций согласно ФГОС.

Библиографический список

1. Арзуманова, Н.В. Использование современных информационных технологий в образовательном процессе / Н.В. Арзуманова. – URL: http://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-sovremennyh-informatsionnyh-tehnologiy-v-obrazovatelnom-protsesse.

2. Гордеева, В.В. Активные и интерактивные формы организации и педагогического сопровождения самостоятельной работы студентов / В.В. Гордеева // Известия Пензенского государственного педагогического университета. – 2012. – № 28.

3. Гутова, С.Г. Процессы модернизации в современном образовании: проблемы и перспективы / С.Г. Гутова // Инновационные подходы в организации учебного процесса в вузе: сб. науч. тр. – Нижневартовск, 2011. – С. 102–107.

К содержанию

УДК 378.14

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ В ФИЛИАЛЕ ЮУрГУ В г. КЫШТЫМЕ

Е.Н. Борисова

В статье сформулированы понятия и принципы заочного образования с использованием дистанционных интернет – технологий. Раскрыта роль и место дистанционного обучения в системе непрерывного высшего профессионального образования. Описана организация процесса дистанционного обучения в филиале ЮУрГУ (НИУ) в г. Кыштыме. Перечислены специальности, по которым ведется набор студентов в ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) в г. Кыштыме.

Ключевые слова: дистанционное обучение; интернет – технологии; компьютерные телекоммуникации; интернет – конференции; интернет – лаборатории.

Важным источником получения высшего образования в России на сегодняшний день является система заочного образования. Но для современных условий она уже недостаточно хороша, так как, к сожалению, уже не отвечает потребностям завтрашнего дня.

Одной из главных задач заочного обучения должно быть адекватное, гибкое и эффективное предоставление обучения в соответствии с конкретными потребностями различных категорий обучаемых.

Все более уверенно заявляет о себе форма заочного образования с использованием дистанционных интернет – технологий.[1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) является центром образовательной, научной, культурной и спортивной жизни города Челябинска и всего Челябинского региона. В структуре университета находится институт открытого и дистанционного образования (ИОДО). Институт открытого дистанционного образования предоставляет всем структурным подразделениям университета, заинтересованным лицам и организациям целый спектр образовательных, консалтинговых и технических услуг.

В чем достоинства дистанционного обучения? Прежде всего, оно дает возможность учиться, находясь на любом расстоянии от учебного заведения. И если при заочном обучении студенту приходится все же неоднократно приезжать в учебное заведение, то дистанционное обучение позволяет практически полностью этого избежать. По сути компьютер выполняет роль как преподавателя, так и администратора – организатора учебного процесса, с использованием локальных или глобальных коммуникационных сетей [2].

С 2008 года ИОДО использует электронную образовательную среду Электронный ЮУрГУ для реализации образовательных программ, курсов и отдельных дисциплин. Все партнеры ЮУрГУ могут получить свое виртуальное образовательное пространство в этой оболочке.

Институт открытого дистанционного образования – это активно развивающаяся структура Южно-Уральского государственного университета, призванная формировать информационно – образовательную среду вуза и интегрировать дистанционные технологии в деятельность всех подразделений университета.

За время существования ИОДО:

– сформировалась система подготовки кадров по использованию дистанционных технологий в учебном процессе;

– осуществляется техническая поддержка сетевого обучения студентов и слушателей;

– оказывается методическая помощь в создании электронных учебно-методических ресурсов;

– проводятся исследования в области методики дистанционного обучения.

При организации дистанционного образования огромную роль играют непосредственные участники этого процесса – как обучаемые, так и преподаватели, координаторы дистанционных курсов, консультанты и кураторы учебных групп. Все они используют возможности Internet для решения конкретных педагогических задач. Причем, если обучаемому вполне достаточно просто владеть Internet на уровне пользователя, то от преподавателей и кураторов требуются определенные знания и умения по организации работы курсантов в телекоммуникационной среде в рамках поставленных дидактических задач: знание назначения, особенностей устройства и функционирования телекоммуникационной среды; знание условий хранения и передачи информации внутри сети; знание основных сетевых информационных ресурсов и особенностей работы с ними; знание особенностей организации и проведения телекоммуникационных проектов; знание особенностей организации и проведения тематических телеконференций; знание методических основ организации работы преподавателя и обучаемых в сети; знание основных правил поведения пользователей в сети, основ телекоммуникационного этикета; умение работать с электронной почтой, телекоммуникациями, сетевыми информационными службами; умение отбирать и обрабатывать информацию, полученную по сети; умение проводить поиск информации по сети; умение готовить информацию к передаче по сети с использованием текстового редактора, графического редактора и необходимых утилит; умение организовать, разработать и провести сетевой учебный проект, тематическую телеконференцию.

Для создания бесперебойно действующей учебной среды необходимо взаимодействие её компонентов на трёх уровнях:

– уровень элементов управления, на котором происходит взаимодействие структурных подразделений организации, отвечающих за организацию и планирование учебных курсов, разработку учебных материалов и обеспечение ими курсантов;

– уровень, на котором происходит взаимодействие участников образовательного процесса: преподавателей, курсантов, координаторов;

– уровень элементов доставки, включающих различные телекоммуникационные средства доставки учебной информации и средств обучения от ведущей организации до обучающегося, а также средств доставки отчетных материалов и экзаменационных работ от курсанта к преподавателю [3].

Филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) в г. Кыштыме осуществляет набор абитуриентов на заочную форму обучения с использованием дистанционных технологий по направлениям подготовки:

– 030900.62 Юриспруденция;

– 050100.62 Педагогическое образование;

– 081100.62 Государственное и муниципальное управление;

– 270800.62 Строительство.

Как проходит процесс обучения?

После того, как абитуриент становится студентом университета, ему выдается доступ в информационно-образовательную среду Южно-Уральского государственного университета. Для такого студента, как и для обычных студентов-заочников, организовывается 3 сессии в год. Сессии проходят в виртуальной среде посредством прямых трансляций учебных занятий. Студент видит и слышит все то же самое, что и студенты, которые посещают лекцию очно. Наравне со слушателями в аудитории данный студент получает реальные знания, а не простую презентацию курса. Экран компьютера преподавателя и его объяснения транслируются прямо на компьютер студента, обучающегося дистанционно, и он видит и слышит всю лекционную часть занятия.

Если по какой-то причине студент не может присутствовать на он-лайн занятии, то у него остаётся прекрасная возможность просмотреть все записи учебных занятий в удобное время.

Помимо прямых трансляций учебных занятий студент получает доступ к учебно-методическим ресурсам (текстам лекций) по каждой дисциплине.

Студент, обучающийся дистанционно также участвует в обсуждении, задает вопросы и получает квалифицированные ответы ведущих преподавателей.

Дистанционное обучение – это новая форма обучения, несколько отличная от привычных форм очного или заочного обучения. Она предполагает иные средства, методы, организационные формы обучения, иную форму взаимодействия преподавателя и студента, студентов между собой. Вместе с тем, как любая форма обучения, любая система обучения она имеет тот же компонентный состав: цели, обусловленные социальным заказом для всех форм обучения; содержание, также во многом определенное действующими программами для конкретного типа учебного заведения, методы, организационные формы, средства обучения. Последние три компонента в дистанционной форме обучения обусловлены спецификой используемой технологической основы (например, только компьютерных телекоммуникаций, компьютерных телекоммуникаций в комплексе с печатными средствами, компакт-дисками, так называемой, кейс – технологией, пр.) [4].

Система дистанционного образования может и должна занять свое место в системе образования, так как при грамотной ее организации она может обеспечить качественное образование, соответствующее требованиям современного общества сегодня и в ближайшей перспективе.

Библиографический список

1. Полат, Е.С. Определение эффективности дистанционной формы обучения / Е.С. Полат // Качество дистанционного образования. Концепции. Проблемы. Решения: материалы международной научно-практической конференции. – М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2004. – С. 235–243.

2. Андреев, А.А. Дистанционное обучение: сущность технология, организация / А.А. Андреев, В.И. Солдаткин. – М.: Изд-во МЭСИ, 2000. – 350 с.

3. Нестерова, С.А. Организация дистанционного обучения с помощью современных ИКТ / С.А. Нестерова. – URL: http://www.pandia.ru/text/77/129/150.php.

4. Полат, Е.С. Дистанционное обучение / Е.С. Полат, М.В. Моисеева, А.Е. Петров; под ред. Е.С. Полат. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Владос, 2005. – 192 с.

К содержанию

УДК 378.025.7 + 378.016/51

КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА И ЕЁ РОЛЬ В СТАНОВЛЕНИИ ОБЩЕКУЛЬТУРНОЙ КОМПЕТЕНЦИИ (ОК-10) БУДУЩИХ БАКАЛАВРОВ ИНЖЕНЕРНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ

Т.В. Дубынина

Формирование обобщённой модели качества, позволяющей говорить о более широком поле деятельности молодого специалиста, что весьма важно для повышения его мобильности на рынке труда подразумевает математическую подготовку, обеспечивающую возможность решения различных типов задач возникающих в процессе профессиональной деятельности. Компьютерная математика весьма удачно сочетает обучение основам математики и правилам работы с современными ПК и вполне может повысить эффективность обучения математике большинства студентов. В этой роли системы символьной математики широко известны за рубежом и интенсивно развиваются.

Ключевые слова: компьютерная математика, моделирование, практическое мышление.

Согласно закону об образовании, содержание образования как предметное поле формирования личности представляет собой совокупность приобретаемых знаний, умений, навыков, ценностных установок, опыта деятельности и компетенции, необходимых для развития личности и эффективного включения её в жизнь общества [1]. Компетентностный подход в образовании, подразумевающий ориентацию образования на достижение такого уровня знаний, опыта, осведомлённости, который необходим для осуществления деятельности и общения в различных областях и сферах может служить базой для перестройки образовательного процесса и преодоления односторонне-предметной ориентации образования [3, с. 155]. При этом меняется роль педагога, главной задачей которого становится создание атмосферы творчества, плодотворной совместной работы, социально-личностное развитие и воспитание учащихся. Последнее очень важно, поскольку получение образования в новых условиях информационного общества требует от учащихся ответственности, чётких внутренних установок, большей самостоятельности при выборе образовательных программ, способов и даже содержания образования.

Согласно ФГОС третьего поколения (по большей части инженерных направлений), при изучении цикла естественнонаучных дисциплин, должна формироваться та часть общекультурной компетенции, которая обозначается как ОК-10 и трактуется как «способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования» [2].

Для становления данной компетенции мы используем компьютерную математику.

Компьютерная математика – это совокупность теоретических, методических, аппаратных и программных средств, обеспечивающих эффективное автоматическое и диалоговое выполнение с помощью компьютеров всех видов математических вычислений с высокой степенью их визуализации [5].

В качестве средства реализации используется пакет MathCAD.

Математические системы класса MathCAD под MS-DOS зарождались как системы для автоматизации численных расчётов с пользовательским интерфейсом и входным языком, позволяющим создавать документы, записи в которых максимально приближены к обычному математическому языку (текстовые комментарии, математические выражения, формулы, таблицы, результаты вычислений и рисунки). Весьма популярные у студентов начальных курсов новые версии систем класса MathCAD под Windows превратились в универсальные системы как численных, так и аналитических расчётов [5].

Основную роль в становлении MathCAD как достаточно мощной и гибкой универсальной системы сыграла компьютерная алгебра – система аналитических вычислений. Отличительной чертой систем компьютерной алгебры является возможность вычисления математических выражений в общем виде. Они способны вычислять аналитические производные и интегралы, выполнять подстановки одних сложных выражений в другие, выполнять математические преобразования, словом выполнять «человеческую работу».

Однако следует заметить, что применение компьютерной математики теми, кто не имеет достаточных познаний в решении математических задач, крайне нежелательно, так как может привести к красочно представленным, но неверным и даже абсурдным результатам. С одной стороны, компьютеры облегчают процесс обучения в смысле повышения оперативности передачи учебной информации, контроля её усвоения, коррекции разного рода отклонений в обучении. С другой – чрезмерное увлечение компьютерами, неумелое их применение может стать источником потери познавательных интересов, лености мышления и других нежелательных последствий для обучающихся [5]. Здесь важно соблюдать разумное распределение количества часов отведённых на знакомство с компьютерной математикой, мы в рамках учебного плана отводим по 2 часа на обобщающий урок после каждого раздела программы.

В ходе таких занятий приходится постоянно напоминать, о том, что результаты символьных преобразований часто бывают неоднозначными и в зависимости от применённых правил могут приводить к разительно отличающимся результатам. Показать их идентичность иногда не менее слож-

но, чем выполнить сами преобразования. К тому же современный уровень развития систем компьютерной алгебры не исключает редкого появления даже грубых ошибок в выполнении символьных вычислений или отказ от их выполнения. В таких случаях, компьютеру нужна квалифицированная помощь – надо подсказать правильное направление преобразований. Это возможно, если пользователь владеет достаточными познаниями в математике и знает особенности работы с конкретными системами символьной математики.

Поэтому, с одной стороны, использование пакета MathCAD содействует становлению способности применять методы математического анализа и моделирования, с другой стороны, вырабатывать критическое отношение результатам машинных вычислений. Это подтверждается в следующем примере.

При изучении темы «Матрицы и системы линейных уравнений», раздела «Элементы линейной алгебры» согласно программе необходимо сформировать ту часть компетенции, которая позволяет решать прикладные задачи методами алгебры, но время на отработку навыков ограничено рабочим планом. Поэтому считаем целесообразным ознакомление студентов с теоретическим материалом и теми тонкостями, которые могут возникнуть при решении прикладных задач (плохая обусловленность матрицы, соответствие размерностей перемножаемых матриц, критерий обратимости матрицы, соответствие норм матриц и векторов и др.) на лекции, а в качестве практического занятия предложить решение системы линейных уравнений методом простой итерации и с применением пакета MathCAD. В процессе такого решения можно подготовить обучающегося к изучению раздела «Предел последовательности», так как покоординатная сходимость к искомому решению прослеживается при каждой итерации и на опыте можно убедиться, что означают слова: «….начиная с некоторого номера все элементы последовательности, попадают в заданную окрестность предельной точки...». Такой пример, на наш взгляд, будущему инженеру будет более полезен, чем доказательство существования предела по определению. Как правило, решение теоретических задач не входит в круг их будущих компетенций, как не встречаются в практических вычислениях системы с «красивыми коэффициентами» позволяющие себя решить методом Гаусса или с помощью простого обращения матриц. Векторные и матричные операторы и функции системы MathCAD позволяют решать широкий круг задач линейной алгебры. Как с использованием символьных обозначений ($T^{-1}, T^{T}, |T|$ *и др.*), так и с помощью встроенной функции lsolve(A,B) [5]. Это будет полезно, по нашему мнению, в качестве иллюстрации поиска неподвижной точки для оператора заданного матрицей. Применение метода вращений для нахождения спектра матрицы, иллюстрируют формулы перехода, инварианты, построение матрицы перехода

(поворота базиса пространства). К тому же при выполнении такой работы, отрабатываются приёмы алгоритмического мышления, подготавливающие студента к последующему программированию и создающие информационную основу компетенции ОК-10.

Трудно недооценить роль компьютерных систем в реализации принципа наглядности. Наглядность есть непосредственное восприятие объекта познающим. Мы используем визуальный (зрительный) вид наглядности, считая, что при изучении полиномов и рядов, этот вид наглядности объективно необходим и целесообразен. Главное заключается в том, какую обучающую и развивающую функцию он выполняет. Наглядность заключается в том, чтобы на первом этапе познания создать конкретный чувственный образ предмета или процесса, включая те анализаторы, которые для этого необходимы [4].

При изучении раздела «Введение в анализ», построение графиков функций в системе MathCAD позволяет экономить время, приучить студентов к таким понятиям как *область определения* и *аргумент*, *зависимая переменная* и др. Для построения графиков используются шаблоны, их перечень содержит подменю Graph главного меню. При этом гораздо эффективнее происходит изучение полярной системы координат, параметрического задания кривой, перехода от одного способа задания к другому. Построение графиков «вручную», как правило, достаточно трудоёмкий процесс, связанный либо с построением сеточного аналога, либо с проведением полного анализа функции и упростить его инженеру-практику поможет овладение графическим пакетом системы MathCAD. В освободившееся время можно рассмотреть множество замечательных алгебраических кривых, убедившись в том, что изучение математики, это своего рода приобщение к прекрасному. Научить отличать линию от графика функции, построить множество всевозможных графиков на одном чертеже (сложение, умножение, преобразование графиков), читать свойства функций по графикам. Осознать возможность приближения функций на промежутках гармониками или многочленами, подготавливая, таким образом, фундамент для аппроксимации и интерполирования функций. При этом, сведения об основных элементарных функциях, должны быть, конечно, обобщены и усвоены на теоретическом уровне. На этапе проникновения в сущность изучаемого конкретная наглядность может мешать созданию абстрактного понятия, необходимо заменить её абстрактной. Схемы, таблицы, диаграммы, символы помогают выявить внутренние связи, отношения, структуры, динамику развития. Принцип наглядности, по сути, требует правильного соотношения между конкретным и абстрактным в познании, при этом значительную роль, особенно на продвинутых ступенях обучения, играет словесная наглядность, т.е. образы, схемы, модели, которые воспроизводятся в сознании при помощи слова [3, с. 48–49].

Таким образом, компьютерная математика облегчает поиск и повышает интенсивность усвоения логически структурированной информации, учит логике, конкретности определений и команд, приучает к математическому языку (правильное оперирование символикой), самостоятельности в выборе алгоритмов, развивает навыки самоконтроля и коррекции собственной деятельности. А также высвобождает время для решения творческих задач, облегчает задачу построения и выбора адекватных моделей, чем и способствует формированию ОК-10.

Библиографический список

1. Федеральный закон об образовании в Российской Федерации [принят Государственной Думой 21 декабря 2012 г.: одобр. Советом Федерации 26 декабря 2012 г.].
2. ФГОС ВПО по направлению подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» (квалификация «бакалавр») [утверждён приказом Мин. ОН РФ 24 декабря 2009 г. № 827].
3. Загвязинский, В.И. Теория обучения в вопросах и ответах: учебное пособие / В.И. Загвязинский. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 160 с.
4. Психология и педагогика для технических вузов: учебное пособие / А.И. Волкова, И.А. Дмитриева, В.С. Кукушин, В.В. Пижугийда, под общ. ред. В.С. Кукушина. – М.: ИКЦ «МарТ», 2005. – 624 с.
5. Дьяконов, В.П. Компьютерная математика. Теория и практика / В.П. Дьяконов. – М.: «Нолидж», 2001. – 1296 с.

К содержанию

УДК 338.27

SWOT-АНАЛИЗ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОАО «ЧЕЛЯБИНСКИЙ РАДИОЗАВОД «ПОЛЕТ»

М.Т. Светлова, А.Ю. Светлов

Проведен SWOT-анализ деятельности предприятия. Из рассмотренных моделей описания и оценки корпоративного профиля выделены сильные и слабые стороны. Выявлено влияние внешней среды, как в микроокружении (анализ пяти конкурентных сил модели М. Портера), так и в макроокружении (PEST-анализ), выделены возможности и угрозы. Построена и проанализирована сопоставительная матрица. Определена стратегия: совершенствование бизнеса ОАО «ЧРЗ «Полет», которой необходимо придерживаться для улучшения финансово-экономического состояния предприятия, и выбраны основные стратегические шаги, которые необходимо предпринять для достижения поставленных целей.

Ключевые слова: SWOT-анализ, корпоративный профиль, анализ внутренней среды, анализ внешней среды, сильные стороны, слабые стороны, угрозы, возможности, сопоставительная матрица, стратегия, стратегические шаги.

Только при ясном представлении о целях деятельности предприятия, их своевременной корректировке в соответствии с изменениями внешней среды четкое распределение материальных и людских ресурсов может обеспечить успешную работу предприятия. Для выявления факторов, влияющих на деятельность предприятия со стороны внутренней и внешней среды, проводится SWOT-анализ. SWOT-анализ имеет управленческую и стратегическую ценность, так как связывает воедино факторы внутренней и внешней среды и сообщает, какие ресурсы и возможности понадобятся компании в будущем [1].

Для SWOT-анализа ОАО «ЧРЗ «Полет» использовались данные, представленные различными подразделениями радиозавода, а именно, экономическим, финансовым отделом, отделом закупок, кадров, внешнеэкономической деятельности и др.

Первоначально было проведено исследование внутренней среды ОАО «ЧРЗ «Полет», а именно, характеристик, описывающих функционирование предприятия на рынке. Основой для оценки сильных и слабых сторон фирмы выступил анализ корпоративного профиля. Корпоративный профиль – это совокупность характеристик компании, многоаспектно описывающих ее деятельность, ресурсы, компетенции и прочее. Существует множество моделей для описания и оценки корпоративного профиля, позволяющих исследовать бизнес как укрупненно (например, модель McKinsey «7 S», модель корпоративного профиля И. Ансоффа), так и детально (различные многофакторные модели описания бизнеса) [2].

При выявлении сильных и слабых сторон предприятия был рассчитан ранг каждой характеристики, а полученная интегральная оценка конкурентоспособности предприятия позволила сделать следующий вывод:

Интегральная оценка конкурентоспособности отрицательна, следовательно, слабые стороны преобладают над сильными; необходимо уделить особое первостепенное внимание слабым сторонам предприятия, стремиться к решению основных выявленных проблем:

– недостаточное финансирование НИОКР (ранг характеристики $-8{,}0$);

– отток с предприятия высококвалифицированных кадров ($-7{,}2$);

– нестабильное финансовое положение ($-7{,}2$);

– недостаточные темпы инновационного развития ($-7{,}2$).

Далее были рассмотрены факторы внешней среды (ситуации, обстоятельства, явления, тенденции) на уровне микросреды – это факторы потребительской среды, конкурентной среды, связанные с деятельностью партнеров по бизнесу и др., и на уровне макросреды – это экономические факторы, политические, правовые, социально-демографические, социально-культурные, технологические и научно-технические и др.

При исследовании микроокружения ОАО «ЧРЗ «Полет» для более глубокого понимания природы конкуренции была использована модель пяти сил М. Портера. Основой данной модели является утверждение о том, что прибыльность отрасли (определяемая как отношение нормы прибыли на капитал к стоимости капитала) зависит от пяти источников конкурентного давления. Эти пять сил конкуренции включают в себя три источника «горизонтальной» конкуренции: конкуренцию со стороны товаров-заменителей, конкуренцию между потенциальными участниками рынка и конкуренцию между существующими участниками рынка, и два источника «вертикальной» конкуренции: рыночную власть поставщиков и рыночную власть покупателей [3].

В таблице 1 приведен анализ пяти конкурентных сил модели М. Портера для ОАО «ЧРЗ «Полет».

Макроокружение является частью внешней среды, но частью универсальной, общей для всех организаций. Реакция конкретной организации на воздействие макроокружения оказывается специфической, отражающей особенность каждой организации и ту конкретную ситуацию, в которой она находится [4]. Макроокружение как система включает такие подсистемы, как политика, экономика, общество, технология, институты, природно-географические подсистемы и т. д. (т.е. проводится PEST-анализ).

Цель PEST анализа – выявление и оценка влияния важнейших факторов макросреды на результаты текущей и будущей деятельности предприятия. При этом устанавливаются события, неподконтрольные предприятию, но влияющие на результаты хозяйствования.

Таблица 1

Анализ пяти конкурентных сил модели М. Портера для ОАО «ЧРЗ «Полет»

Параметр	Значение	Описание	Направления работ
Угроза со стороны товаров-заменителей	Средний	Угроза со стороны товаров-заменителей. Однако у некоторых видов выпускаемой продукции не существует аналогов	Концентрировать все усилия на минимизации издержек, повышении качества изделий, внедрении инновационных технологий для увеличения ценности и спроса на товар
Угрозы внутриотраслевой конкуренции	Высокий	Рынок является высоко конкурентным и перспективным. Присутствует возможность сравнения товаров разных предприятий	Проводить постоянный мониторинг предложений конкурентов. Развивать уникальность продукта и повышать воспринимаемую ценность товара. Снижать влияние ценовой конкуренции на продажи
Угроза со стороны новых участников рынка	Низкий	Невысокий риск входа новых участников. Новые компании практически не появляются из-за высоких барьеров входа, требований к качеству продукции (ISO-9001), сложности производства высокотехнологичных изделий и высокого уровня первоначальных инвестиций	Установка длительных и устойчивых связей с потребителями (ГА и МО). Повышение качества изделий, модернизация, НИОКР
Угроза потери текущих клиентов	Средний	На рынке вооружений – постоянный спрос, в том числе, в связи с обновлением парка техники. На рынке гражданской авиации – спрос нестабильный, присутствует сильный конкурент	Стремление к удержанию доли рынка РФ и к увеличению продаж на экспорт, повышение качества товара по отстающим параметрам, гарантийное и послегарантийное обслуживание
Угроза нестабильности поставщиков	Низкий	Стабильность со стороны поставщиков.	Проведение переговоров о снижении цен. Стремление к сокращению сроков поставки.

Проанализировав результаты модели пяти сил М. Портера и PEST-анализа выявлены основные угрозы и возможности ОАО «ЧРЗ «Полет», ранг которых достаточно велик:

– обострение конкурентной борьбы на внешнем и внутреннем рынках (ранг $-10{,}0$);

– качественное изменение продукции конкурентов и применение ими инноваций (−9,0);

– увеличение доли рынка (рост объемов производства и сбыта продукции) (+10,0);

– отсутствие конкуренции по некоторым видам продукции (+10,0);

– отсутствие потенциальных конкурентов, высокие барьеры входа на рынок (+8,1).

Интегральная оценка внешней среды получилась положительной, следовательно, внешняя среда благоприятна, преобладают возможности. Главное, правильно выбрать стратегию развития предприятия, воспользоваться этими возможностями и суметь противостоять угрозам.

Качественная характеристика положения бизнеса в среде ОАО «ЧРЗ «Полет», согласно таблице 2, определяется как слабая фирма, неспособная воспользоваться благоприятными условиями среды.

Таблица 2

Качественная характеристика положения бизнеса в среде

Фирма	Среда	
	Преобладают возможности	Преобладают угрозы
Преобладают сильные стороны	Конкурентоспособная фирма в благоприятной среде	Сильная фирма в рискованной среде
Преобладают слабые стороны	Слабая фирма, неспособная воспользоваться благоприятными условиями среды	Слабая фирма в рискованной среде (проблемный бизнес)

Согласно оценки бизнеса в зависимости от сочетания сил, слабостей, возможностей и угроз по Котлеру [5] бизнес ОАО «ЧРЗ «Полет» оценивается как проблемный, не смотря на то, что благоприятные возможности и присутствуют, однако они уравновешиваются угрозами, а если рассмотреть внутреннюю среду предприятия, то слабые стороны преобладают над сильными, что говорит о критическом состоянии предприятия, а именно, радиозавод практически не способен противостоять внешним опасностям. Необходимо выработать правильную стратегию развития предприятия, решить основные проблемы и устранить или устремить к минимальному значению значимые слабости.

Следует принять во внимание, что SWOT-анализ нацелен не столько на получение интегральных оценок, характеризующих конкурентоспособность фирмы, благоприятность среды и положение фирмы в среде, сколько на выявление и анализ частных параметров: сил и слабостей, возможностей и угроз.

Согласно стратегической матрице (таблица 3) были выделены основные стратегические действия, актуальные для сочетания полученных сил, слабостей, возможностей и угроз.

Таблица 3

Стратегическая матрица

Фирма	Среда	
	Преобладают возможности	Преобладают угрозы
Преобладают сильные стороны	Развитие бизнеса	Гибкое реагирование (компенсация угроз)
Преобладают слабые стороны	Совершенствование бизнеса	Ликвидация проблем

Согласно представленной таблице 2 ОАО «ЧРЗ «Полет» необходимо придерживаться стратегии – совершенствование бизнеса.

Основные стратегические шаги, которые необходимо предпринять на предприятии:

1. Большую значимость для формирования конкурентоспособности предприятия имеют следующие характеристики корпоративного профиля, а именно, сильные стороны предприятия, которые следует поддерживать и развивать:

– производство сложной радиотехнической аппаратуры для ГА и МО;

– высокое качество продукции;

– высокий научный потенциал.

2. Следует обратить внимание на предмет избавления от таких слабых сторон предприятия как:

– недостаточное финансирование НИОКР;

– отток с предприятия высококвалифицированных кадров;

– нестабильное финансовое положение;

– недостаточные темпы инновационного развития.

3. С выгодой для предприятия, прежде всего, необходимо воспользоваться такими возможностями:

– увеличение доли рынка (рост объемов производства и сбыта продукции);

– отсутствие конкуренции по некоторым видам продукции;

– отсутствие потенциальных конкурентов, высокие барьеры входа на рынок.

4. В первую очередь радиозавод должен пытаться защититься от таких угроз как:

– обострение конкурентной борьбы на внешнем и внутреннем рынках;

– качественное изменение продукции конкурентов и применение ими инноваций.

Таким образом, была определена стратегия: совершенствование бизнеса ОАО «ЧРЗ «Полет», которой необходимо придерживаться для улучшения финансово-экономического состояния предприятия, и были выбраны основные стратегические шаги, которые необходимо предпринять для достижения поставленных целей.

Библиографический список

1. Арутюнова**,** Д.В. Инновационный менеджмент: учебное пособие / Д.В. Арутюнова**.** – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. – 122 с.

2. Орлова, Н.А. Курсовая работа по дисциплине «Современный стратегический анализ»: методическое пособие / Н.А. Орлова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2013.

3. Грант, Р.М. Современный стратегический анализ / Р.М. Грант; пер. с англ. под ред. В.Н. Фунтова. – 5-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2008**.** – 560 с.

4. Лапыгин, Ю.Н. Стратегический менеджмент: учебное пособие / Ю.Н. Лапыгин. – М.: Высшая школа, 2009. – 174 с.

5. Котлер, Ф. Маркетинг менеджмент: экспресс-курс / Ф. Котлер; пер. с англ. под ред. С.Г. Божук. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Питер, 2006**.** – 464 с.

К содержанию

УДК 621.922

ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СОВРЕМЕННОГО МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д.В. Ардашев

Современное машиностроение функционирует в условиях жесткой конкуренции и характеризуется постоянным обновлением выпускаемой продукции. В этих условиях особенно остро стоит вопрос сокращения всевозможных расходов на технологическую подготовку производства, в том числе и при проектировании операций шлифования. Вопрос выбора абразивного инструмента и назначения режимов его работы в настоящее время не решен: абразивный инструмент нередко подбирается наугад, либо в работу принимается тот инструмент, который установлен на станке. Это вызвано широким диапазоном применимости абразивного инструмента – шлифование разных марок сталей и сплавов, а также достижение различной точности обработки. В статье предлагается принципиально новый подход к проектированию операций абразивной обработки: на основе данных об эксплуатационных возможностях инструментов создается континуальное пространство эксплуатации, в котором подбирается характеристика абразивного инструмента во взаимосвязи с режимами его работы и параметрами выполнения операции шлифования.

Ключевые слова: многономенклатурное производство; проектирование операции абразивной обработки; назначение режимов шлифования; выбор характеристики инструмента.

В настоящее время задача проектирования операций шлифования решается по нормативным справочникам, в основе которых заложено типовой алгоритм решения технологических задач проектирования операции шлифования решение: все рекомендации по выбору характеристики круга и режимов шлифования представлены для обработки одного материала – стали 45, на измененные условия обработки введены поправочные коэффициенты [1, 2]. Для обработки заготовок разных деталей, отличающихся материалом, требованиями по точности и шероховатости, нормативы рекомендуют другую характеристику шлифовального круга и режимы шлифования, т.е. нормативы представляют собой строгодетерминированные рекомендации, конкретные для каждого шлифуемого материала, наилучшие условия использования круга конкретной характеристики.

Описанные рекомендации применимы в условиях массового производства деталей машиностроения: для изготовления партий больших объемов, при редком изменении ассортимента выпускаемой предприятием продукции действительно выгодно при освоении нового вида продукции затрачи-

вать вспомогательное время на подготовку производства – заменять установленные шлифовальные круги на рекомендуемые справочниками, осуществлять их длительную правку и многократную балансировку. Эффективность операций, спроектированных по таким рекомендациям, обеспечивается применением наилучшей характеристики инструмента, рекомендованной для обработки конкретной заготовки.

Мировое машиностроение развивается в условиях быстрой и частой смены деталей, обрабатываемых малыми партиями. В связи с этим в настоящее время на машиностроительных предприятиях кругом одной характеристики, установленной на станке, обрабатывают большое количество деталей, отличающихся как требованиями чертежа, так и материалом. Поскольку в настоящее время отсутствуют рекомендации по проектированию операций шлифования различных деталей кругом одной характеристики, то для успешного функционирования машиностроительного производства в современных рыночных условиях необходим совершенно иной подход к проектированию операций шлифования.

Кроме того, задача выбора характеристики шлифовального круга в этих условиях приобретает несколько иную значимость: на этапе проектирования операции абразивной обработки при выборе необходимо подобрать такую характеристики инструмента, которая позволила бы с наименьшим падением производительности процесса обработать как можно большее количество заготовок, различающихся не только требованиями качества, но и исходным материалом.

В современном машиностроении отсутствует методическая база для проектирования операций абразивной обработки, т.к. область эффективного использования инструмента в изменяющихся технологических условиях не определена, либо определяется эмпирическим путем, что для успешного функционирования предприятия не достаточно.

В основу создаваемой информационно-методической базы проектирования операций абразивной обработки для условий многономенклатурного производства должна быть положена взаимосвязь между эксплуатационными показателями шлифовальных кругов, через режимы их эксплуатации с выходными показателями процесса шлифования – качеством обработанной детали. Для этого необходимы сведения о работоспособности абразивных инструментов в изменяющихся технологических условиях – эмпирические либо расчетные.

Для получения эмпирических численных значений эксплуатационных показателей кругов был разработан испытательный стенд, оборудованный специальными регистрирующими контурами [3, 4].

Была разработана функциональная характеристика, представляющая собой технологические эксплуатационные паспорта шлифовальных кругов [5–7] и позволяющая решать ряд важнейших технологических задач [8–11]:

- сравнение инструментов разных характеристик либо производителей без проведения сравнительных или тестовых испытаний;
- определение эффективного времени работы круга – периода его стойкости в различных технологических условиях;
- назначение режимов шлифования;
- определение стабильности выходных показателей процесса шлифования и др.

Поскольку разработанные паспорта созданы в условиях шлифования заготовок из стали 45, то в настоящее время стоит задача разработки прогнозных моделей, позволяющих расширить применение эталонного паспорта для проектирования операций шлифования различных сталей и сплавов. Система прогнозирования эксплуатационных абразивных инструментов позволит расчетным способом наполнять и постоянно обновлять информационную базу для проектирования операций шлифования.

Основным параметром процесса шлифования, в значительной степени влияющим на выходные показатели процесса шлифования является износ шлифовального круга, следовательно, при разработке прогнозных моделей необходимо, прежде всего, учесть интенсивность и величину различных механизмов износа шлифовального круга.

В качестве основных механизмов износа были выделены два основных – механический (усталостный) и физико-химический.

Для исследований усталостной прочности абразивных зерен был выбран ряд сталей и сплавов, прошедших термическую обработку, соответствующую операциям шлифования. Испытания проводились на образце, предварительно нагретом до температур 20, 200, 400, 600 ºС. В качестве индентора принималось единичное зерно формокорунда, имитировался шлифовальный круг и на образце наносились риски [12–14].

Для количественного определения износа единичных абразивных зерен измерялись следующие выходные параметры процесса:

- величина радиального износа зерна y за все время микрорезания, мм;
- количество циклов нагружения n за все время микрорезания, шт;
- суммарная длина контакта абразивного зерна с материалом f, мм;
- коэффициент термомеханической усталости, рассчитываемый по формуле:

$$k_y = \frac{y}{n}. \quad (1)$$

- коэффициент истирания, рассчитываемый по формуле:

$$k_f = \frac{y}{f}. \quad (2)$$

Результаты измерений показателей взаимодействия зерен с обрабатываемым материалом приведены в табл. 1. Износ абразивных зерен и коэффициент термомеханической усталости рассчитывался по результатам трехкратных повторов испытаний при каждой температуре образца.

Таблица 1

Результаты испытаний

Показатель	Темп-ра, град	Марка стали					
		45	40Х	40ХН	38ХГН	12ХН3А	12Х18Н10Т
		Величина показателя					
Радиальный износ y, мм	21	0,015	0,019	0,017	0,018	0,021	0,015
	200	0,016	0,016	0,018	0,015	0,016	0,015
	400	0,016	0,013	0,015	0,012	0,018	0,016
	600	0,015	0,011	0,014	0,010	0,019	0,019
	800	0,015	0,011	0,014	0,013	0,014	0,019
Количество циклов нагружения n, шт	21	60	65	60	90	50	60
	200						
	400						
	600						
	800						
Коэффициент термомеханической усталости k_y, 10^{-3}	21	0,263	0,289	0,368	0,206	0,439	0,292
	200	0,272	0,249	0,349	0,196	0,349	0,249
	400	0,276	0,198	0,315	0,139	0,356	0,273
	600	0,258	0,173	0,268	0,111	0,402	0,317
	800	0,251	0,169	0,261	0,147	0,398	0,314
Коэффициент истирания k_f ,10^{-3}	21	1,051	0,701	0,656	0,620	0,970	0,712
	200	0,845	0,956	0,955	0,795	1,089	0,715
	400	0,598	0,550	0,833	0,666	0,944	0,455
	600	0,583	0,499	0,533	0,548	0,633	0,338
	800	0,499	0,506	0,441	0,540	0,556	0,355

Характер изменения интенсивности износа абразивных зерен из белого электрокорунда при обработке второй группы исследуемых материалов – высоколегированных сталей – примерно одинаков: изменение концентраций никеля и титана изменяют лишь величину интенсивности примерно в 1,5 раза. Дальнейшее развитие данной задачи видится в применении к описанию механизмов изнашивания абразивного зерна в процессах шлифования кинетической теории прочности твердых тел [15–17].

Исследование физико-химического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала выполнялось с применением электронного сканирующего микроскопа JSM 6460LV (JEOL, США), с использованием энергодисперсионной приставки, позволяющей провести полный качественный и количественный химический анализ в выбранных точках, а также получать карты распределений элементов по площади и вдоль выбранной линии. В качестве исследуемых образцов были изготовлены кубики из

электрокорунда белого. Кубики вводились в контакт с плоскими образцами из различных марок сталей, помещались в печь, нагревались до 1000 °С, выдерживались и охлаждались на воздухе [18, 19].

Одним из наиболее важных факторов, отличающих шлифование от других методов механической обработки, является кратковременность контакта отдельного абразивного зерна с обрабатываемы материалом – порядка 2×10^{-5} с, однако как это ни странно именно этот факт в значительной степени повышает вероятность протекания диффузионных и реакционных процессов в зоне шлифования: наибольшая скорость взаимного растворения контактирующих веществ наблюдается при значительном сокращении времени их контакта. Это объясняется, прежде всего, значительным градиентом концентраций контактирующих веществ друг в друге: в электрокорунде отсутствует железо, а в рассматриваемых сталях нет алюминия.

Поскольку процессы, протекающие процессы между абразивным и обрабатываемыми материалами, не ограничиваются взаимодействием только железа и алюминия, а представляют собой более сложные химические взаимодействия, обусловленные наличием и концентрациями легирующих элементов в стали, то для описания взаимосвязи толщины диффузионной прослойки и времени контакта материалов можно применить параболический закон Фика.

При расчете величины коэффициента химического сродства D использовалась величина толщины диффузионной прослойки x, измеренная по химическому спектру, полученному при химическом анализе вдоль линии. Физический смысл коэффициента сродства аналогичен смыслу коэффициента диффузии: это коэффициент пропорциональности, характеризующий диффузионный поток между сталью и электрокорундом при градиенте концентраций последних на границе их контакта (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты химического сродства электрокорунда белого с различными обрабатываемыми сталями

Марка стали	Толщина диффузионной зоны $x \cdot 10^{-3}$, мм	Коэффициент химического сродства $D \cdot 10^{-10}$, мм^2/с
45	8,3300	18,9
40Х	3,6600	3,6
40ХН	4,9600	6,7
38ХГН	8,0000	17,4
12ХН3А	4,5200	5,5
38ХС	3,6600	3,6
ВТ-15	4,8700	6,4
ОТ-3	4,9100	6,5
У8А	4,8300	6,3
ШХ-15	4,8300	6,3
СЧ-20	4,7100	6,0

Обобщая, можно заключить, что для успешного функционирования мирового машиностроения и реализации ресурсосберегающей энергоэффективной технологии абразивной обработки необходимо информационное оснащение, которое позволит:

1. Выбирать характеристику абразивного инструмента, позволяющую наиболее эффективно обрабатывать группы деталей, отличающихся не только требованиями чертежа, но и исходным материалом.

2. Эффективно использовать ресурс работоспособности инструмента при его эксплуатации в изменяющихся технологических условиях.

3. Прогнозировать работоспособности инструментов при проектировании операций абразивной обработки в широком диапазоне технологических условий.

Библиографический список

1. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. Ч. 3: протяжные, шлифовальные и доводочные станки. – 3-е изд. – 1978. – 360 с.

2. Режимы резания на работы, выполняемые на шлифовальных и доводочных станках с ручным управлением и полуавтоматах: справочник / Д.В. Ардашев, Д.Е. Анельчик, Г.И. Буторин и др. – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2007. – 384 с.

3. Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин. – Патент России № 107996. 2011. Бюл. № 25.

4. Система измерения эксплуатационных показателей абразивного инструмента / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин, Б.А Чаплыгин. – Патент России № 97078. 2010. Бюл. № 24.

5. Ардашев, Д.В. Комплекс показателей оценки эксплуатационных свойств шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Технология машиностроения. – 2010 – № 9. – С. 30–33.

6. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 113–116.

7. Ардашев, Д.В. Основы групповой технологии шлифования / Д.В. Ардашев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 54–55.

8. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение проектирования групповой технологии операций шлифования / Д.В. Ардашев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2(288) – С. 14–19.

9. Ардашев, Д.В. Информационно-методическая база режимно-инструментального оснащения операций абразивной обработки для современных условий мирового машиностроения / Д.В. Ардашев // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 6. – С. 813–817.

10. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 113–116.

11. Ардашев, Д.В. Основы групповой технологии шлифования / Д.В. Ардашев // Вестник машиностроения. – 2012. – № 11. – С. 54–55.

12. Стенд для исследования взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки / Д.В. Ардашев, А.А. Кошин, А.А. Дьяконов. – Патент России № 113362. 2012. Бюл. № 4.

13. Стенд для исследования многоциклового взаимодействия инструмента и образца при высокоскоростных методах обработки / Заявка №2012134174/28. Пр. от 09.08.2012 г. Д.В. Ардашев Патент на полезную модель № 127923. Опубл. 10.05.2013, бюл. № 13.

14. Ардашев, Д.В. Стенд для исследования взаимодействия абразивного зерна и образца в процессах абразивной обработки / Д.В. Ардашев, В.В. Ахлюстина // Технология машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 27–28.

15. Ардашев, Д.В. Кинетическая трактовка стойкости абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 10–19.

16. Ардашев, Д.В. Термофлуктуационный механизм износа абразивного зерна в процессах шлифования / Д.В. Ардашев // Наукоемкие технологии. – 2013. – № 12. – С. 23–28.

17. Ардашев, Д.В. Определение износостойкости абразивного зерна при шлифовании на основе кинетической теории прочности / Д.В. Ардашев // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: сб. трудов I Межд. заочн. научно-техн. конф. – 2013. – С. 260–267.

18. Ардашев, Д.В. Химическое сродство абразивного и обрабатываемого материалов / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2011. – № 6. – С. 29–32.

19. Ардашев, Д.В. Основные механизмы износа абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – Кисловодск, 2013. – С.40–43.

К содержанию

УДК 378.4(470.55)+621

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КАФЕДРЫ «ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ» ФИЛИАЛА ЮУрГУ В г. КЫШТЫМЕ

Н.Н. Суворова

В статье дается описание становления и развития кафедры «Технология обработки материалов» филиала ЮУрГУ в г. Кыштыме. И история развития специальности «Технология машиностроения» начиная с открытия филиала до настоящего времени.

Ключевые слова: институт, университет, филиал, кафедра, преподаватели, специалисты.

В 1960 г. Кыштымский радиозавод (КРЗ) выпустил первую продукцию. В Кыштыме в то время радиозавод называли «Новым» заводом. Естественно, что завод нуждался в квалифицированных кадрах и естественно, что молодежь города стремилась пойти работать на новый завод.

Руководство радиозавода, горкома партии и горисполком обратились в ректорат Челябинского политехнического института (ЧПИ) с просьбой организовать подготовку специалистов в г. Кыштыме из числа молодых работников радиозавода без отрыва от производства. И осенью 1961 г. в Кыштыме был открыт филиал Челябинского политехнического института для подготовки специалистов для градообразующих предприятий городов Кыштыма и Касли по специальностям 0705 «Радиотехника» и 0501 «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструмент». 1 октября 1961 г. – дата основания Кыштымского филиала ЧПИ. Обучение в филиале велось только по очно-заочной форме.

В своем становлении учебное заведение прошло различные этапы развития.

В 1990 г. – отделение энергетического вечернего факультета. В том же году Челябинский политехнический институт (ЧПИ), а вместе с ним и филиал, получил статус университета и стал именоваться «Челябинский государственный технический университет» (ЧГТУ).

В 1995 г. – Кыштымский радио-механический факультет.

В 1997 г. – филиал Южно-Уральского государственного технического университета.

В 2004 г. – в соответствии с приказом Федерального агентства по образованию от 9.12.2004 г. № 329 он был преобразован в филиал государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» в г. Кыштыме.

А приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 23 мая 2011 г. № 1704 переименован в филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (Национальный исследовательский университет) в г. Кыштыме.

К этому времени в филиале было образовано пять кафедр: «Технология обработки материалов и реализации продукции»; «Радиотехника»; «Металлургия»; «Экономика и управление на предприятии (машиностроения)» и «Гуманитарные науки», из них четыре первые выпускающие, которые готовили специалистов по специальностям: «Технология машиностроения», «Металлургия», «Радиотехника», «Управление и информатика в технических системах», «Экономика и управление на предприятии (машиностроения)».

По мере роста потребности предприятий города и региона в квалифицированных кадрах данных специальностей (в 1991 г.) в филиале было открыто дневное, а затем (в 2007 г.) и заочное отделение, вследствие чего, значительно увеличился выпуск специалистов.

Кафедра «Технология обработки материалов и реализации продукции» (ТОМ и РП) организована 05.05.1997 г. приказом ректора Челябинского государственного технического университета №44 от 30 04 1997 г. для подготовки специалистов по специальностям: «Технология машиностроения», «Технология швейного производства», «Технология художественной обработки материалов» и «Металлургия», которые затем выделились в самостоятельные кафедры. С 1.03.2005 г. кафедра стала выпускающей только по специальности 120100 «Технология машиностроения» и была переименована в кафедру «Технология обработки материалов» (ТОМ). В последствии, по объективным причинам, кафедры «Технология художественной обработки материалов» и «Технология швейного производства» были закрыты, а в 2012 г. кафедры «Технология обработки материалов» и «Металлургия» вновь объединились.

Первым заведующим кафедрой, до сентября 2004 г., был Лакирев Сергей Григорьевич, доктор технических наук, профессор. Затем с июня 2005 г. по сентябрь 2006 г. Кафедру возглавлял профессор Гузеев Виктор Иванович, доктор технических наук. С октября 2006 г. по декабрь 2007 г. заведующим. Кафедрой был доктор технических наук, профессор Белевитин Владимир Анатольевич. До сентября 2008 г. и.о. заведующего кафедрой был Родионов Борис Валентинович (ныне покойный), который внес огромный вклад в развитие филиала будучи его директором и и.о. заведующего кафедрой. С сентября 2008г. заведующим кафедрой является кандидат технических наук, доцент Ардашев Дмитрий Валерьевич.

Первоначально для работы в филиале и на кафедре привлекались ведущие специалисты с производственных предприятий вначале на условиях совместительства, а позднее штатными преподавателями. Так в разное время пришли старший преподаватель кафедры, Е.Н. Емельянова доценты Г.М. Кушнарев, Н.Н. Суворова, В.В. Ахлюстина, заведующий лабораториями С.Ф. Плаксин. Они имеют многолетний опыт работы на предприятиях. После успешной защиты дипломного проекта осталась работать

на кафедре молодые специалисты Л.А. Силаева, Н.И. Пневская, Т.Ю. Долгова, (которые проработали в филиале более тридцати лет) В.В. Карпухин, А.В. Попова и Е.В. Малышева.

Открытие дневного и заочного отделений повлияло на кадровую политику кафедры. В университет были привлечены высококвалифицированные специалисты выпускники аспирантур различных вузов страны после окончания очной формы обучения к.т.н. Н.Т. Карева, д.т.н. В.К. Дубровин, к.х.н. О.Н. Груба. В то же время кафедра стала готовить и свои кадры, направляя в аспирантуру университета своих наиболее способных выпускников. В.В. Карпухин и А.В. Попова после окончания аспирантуры остались на кафедре продолжая работать над кандидатской диссертацией. В.В. Карпухин в 2012 г. успешно защитился

С приходом Дмитрия Валерьевича к работе на кафедре были привлечены молодые ученые: В.В. Батуев, И.С. Болдырев и А.А. Дьяконов. А.А. Дьяконов в 2013 г. защитил докторскую диссертацию и стал самым молодым доктором технических наук Южно-Уральского государственного университета. Остальные в настоящее время работают над докторскими диссертациями.

Сферой деятельности кафедры главным образом является учебная работа. На данный момент, в связи с введением многоуровневой профессиональной системы обучения, ориентированной на международные стандарты образования, является обучение согласно планам подготовки бакалавров. Профессорско-преподавательский состав перестраивает учебные планы в соответствии с требованиями Министерства образования Российской Федерации и изменением потребности промышленных предприятий и перспективами их дальнейшего качественного развития.

Научно-педагогическая квалификация преподавателей и сотрудников кафедры позволяет обеспечить высокий уровень подготовки специалистов, учебный процесс на кафедре осуществляют 12 преподавателей, из них 1 профессор и 8 доцентов (в том числе два доктора и четыре кандидата наук). Сочетание производственного опыта накопленного на предприятиях и знаний полученных при обучении в аспирантурах благоприятно влияет на качество обучения студентов.

Преподаватели кафедры постоянно работают над переработкой обучающих программ, выпуском учебно-методической литературы: методических указаний, методических пособий с присвоением им грифа УМО. К участию в научно-методических работах привлекаются также и студенты, их статьи печатают в научно-технических журналах. В 2013 г. студенты кафедры впервые приняли участие во Всероссийской студенческой олимпиаде по специальности 151001 «Технология машиностроения» в г. Уфа и заняли третье место. Наши студенты постоянные участники ежегодного фестиваля «Весна студенческая».

Ежегодно преподаватели и студенты принимают участие в научно-технических конференциях, публикуют результаты своих исследований в научных журналах. На счету кафедры более 10 патентов на изобретения и полезные модели. Дипломные проекты выпускников имеют практическую значимость. Новейшие разработки внедряются на предприятиях. Экономический эффект от внедрения дипломного проекта выпускника 2012 г. Хорошенина Александра Витальевича на предприятии «Радий» (г. Касли) составил пять миллионов рублей.

В структуру кафедры входят лаборатории и специализированные аудитории. Кафедра сотрудничает со многими предприятиями города и области, на которых студенты проходят учебную, производственную и преддипломную практику и оказывает содействие в трудоустройстве выпускников.

За время своего существования кафедра показала себя как жизнеспособное развивающееся подразделение. Ею выпущено более 500 специалистов. Выпускники кафедры работают ведущими специалистами на предприятиях городов Кыштыма, Касли, Карабаша на предприятиях Челябинской и других областей России, а также странах ближнего и дальнего зарубежья.

В 2011 г. году филиал ЮУрГУ в г. Кыштыме отметил свой пятидесятилетний юбилей. В 2012 кафедре «Технология обработки материалов» исполнилось 15 лет.

В настоящее время (начиная с 2011 года) кафедра готовит бакалавров по направлению подготовки 151900 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 150400 «Металлургия».

Направление подготовки «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» было утверждено приказом Министерства образования и науки РФ № 827 от 24.12.2009 г. Профиль подготовки «Технология машиностроения». Бакалавры по данному направлению готовятся к профессиональной деятельности: проектно-конструкторской; производственно-технологической; организационно-управленческой; научно-исследовательской; сервисно-эксплуатационной; специальным видам деятельности. Профессиональные дисциплины: компьютерная графика и программирование; системы сквозного проектирования; технология обработки на станках с ЧПУ; автоматизация производственных процессов; размерно-точностное проектирование позволяют готовить специалистов высокого класса, которые востребованы машиностроительными предприятиями города и региона.

Направление подготовки «Металлургия», также было утверждено приказом Министерства образования и науки РФ № 16377 от 11.02.2010 г. Профиль подготовки «Металлургия цветных металлов» готовит бакалавров к таким видам профессиональной деятельности, как производственно-

технологическая; организационно-управленческая; научно-исследовательская; проектная. Изучаемые профессиональные дисциплины: моделирование процессов и объектов в металлургии; информационные технологии в металлургии; теория термической обработки; теория и технология литейного производства; теория и технология процессов обработки металлов давлением готовят специалистов для металлургических предприятий региона.

К содержанию

УДК 621.922

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА С ЗАГОТОВКОЙ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

Д.В. Ардашев

В статье приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния абразивного зерна методом конечных элементов. Определено влияние геометрических характеристик зерна (размер, площадка затупления) и температуры в зоне шлифования на величину распределения эквивалентных напряжений в теле зерна. Результаты расчета могут использоваться для прогнозирования процесса износа абразивных зерен.

Ключевые слова: шлифование; износ; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов.

Процесс механического износа абразивного зерна в процессах шлифования играет превалирующую роль наряду с другими механизмами износа. Прогнозирование величины износа абразивного инструмента является в настоящее время одной из задач, решение которой позволит максимально эффективно технологии абразивной обработки [1, 2]. При шлифовании абразивное зерно вступает во много цикловое взаимодействие с обрабатываемым материалом, при этом в зерне возникает напряженно-деформированное состояние. Для прогнозирования величины износа зерна необходимо знать величину и распределение напряжений и деформаций, возникающих в нем.

Для определения величины напряжений и деформаций в абразивном материале, соответствующей различным условиям шлифования была создана, конечно-элементная модель процесса резания и проведена серия численных экспериментов в пакете конечно элементного анализа ANSYS. В качестве абразивного материала рассматривался электрокорунд белый, обрабатываемый материал – сталь 45, при этом учитывалось действительное сопротивление материала шлифованию [3, 4] . Японскими учеными

в 1985 году был спроектирован и изготовлен специальный стенд, позволяющий напрямую измерять температуру абразивного зерна на поверхности шлифовального круга с помощью специального инфракрасного детектора с чувствительным элементом [5]. В соответствии с полученными ими данными, температура отдельных абразивных зерен колеблется в пределах 400–1200 ºС, при этом ими подчеркивается, что зерно нагревается до температуры около 1400 ºС и сохраняет тепло в течение сравнительно длительного времени. Для настоящего исследования температура абразивного зерна изменялась в пределах 200–1000 ºС.

Определение напряженно-деформированного состояния зерна является трудной задачей, так в процессе резания зерно находится в сложном напряженном состоянии. Точный расчет такого состояния возможен только с использованием численных методов, в частности метода конечных элементов (МКЭ). При этом возможны два варианта. Первый заключается в создании конечно элементной модели абразивного зерна с последующим приложением нагрузок и граничных условий, эквивалентных силе резания, действующей на зерно [6, 7]. Недостаток такого подхода заключается в том, что при этом невозможно учесть контактные явления (трение, износ, нагрев зерна и т.д.). Кроме того, сложно найти экспериментальные данные о силе резания, действующей на одно зерно, для различных обрабатываемых и абразивных материалов. Второй подход заключается в том, чтобы численно смоделировать сам процесс резания с учетом некоторых контактных явлений, возникающих при этом. В этом случае нет необходимости собирать экспериментальные данные о силе резания, действующей на зерно, так как решается контактная задача с отделением стружки. В данной работе был использован второй подход.

Для реализации этого метода авторами была создана конечно элементная модель абразивного зерна в виде усеченного конуса (с площадкой износа) и фрагмента заготовки (рис. 1). Свойства материала заготовки и зерна приведены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов заготовки и зерна

Свойство	Зерно	Обрабатываемый материал
Модуль упругости, МПа	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Плотность, кг/м^3	8000	7800
Предел текучести, МПа	–	200

Материал зерна рассматривался как абсолютно упругий. Материал заготовки – упругопластический, с учетом кинематического упрочнения. Кривая упрочнения задавалась по степенной зависимости, соответствующей конструкционной стали 45. Кулоновский коэффициент трения принимался равным 0,3. Конечноэлементная модель заготовки в виде параллелепипеда имела длину 1 мм, ширину 0,2 мм и толщина 0,11 мм. Толщина срезаемого слоя – 0,01 мм. Зерно было представлено в виде усеченного конуса высотой 0,2 мм, диаметром большего основания 0,25 мм, диаметр меньшего основания менялся в зависимости от износа зерна. Скорость резания равнялась 80 м/с. Критерий стружкоотделения задавался виде предельной деформации 2 %. Моделирование проводилось с помощью явного динамического анализа. Время расчета в зависимости от износа зерна составляло от 30 мин. до 2 часов. В целях снижения времени расчета рассматривалась симметричная модель зерна и заготовки с приложением соответствующих граничных условий.

В результате расчета удалось определить величину и распределение всех компонентов тензоров напряжений и деформаций в зерне и заготовке, а также силы контактные взаимодействия между зерном и заготовкой.

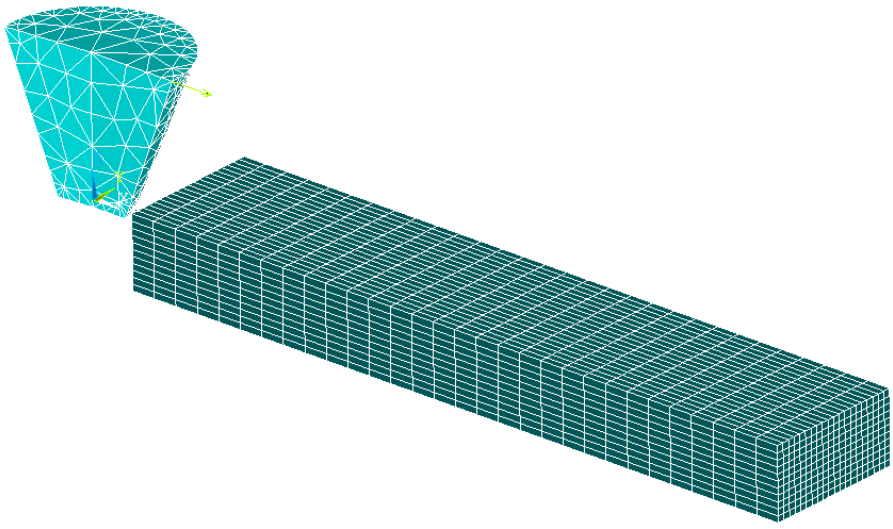


Рис. 1. Конечно элементная модель абразивного зерна (корунд)
и фрагмента заготовки (сталь 45)

Результаты этого моделирования приведены на рис. 2–6 и в табл. 2.

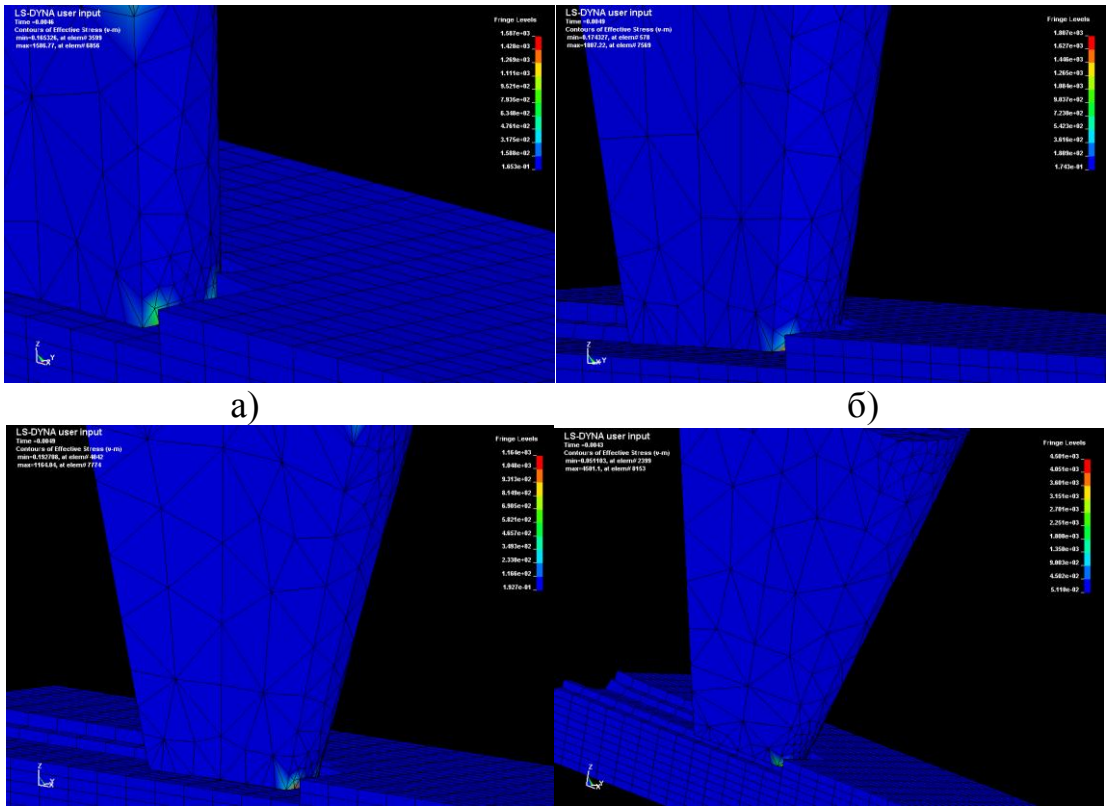


Рис. 2. Результаты моделирования контактного взаимодействия обрабатываемого и абразивного материала различной зернистости при температуре 200 ºС (распределение эквивалентных напряжений): а) F90; б) F60; в) F54; г) F46

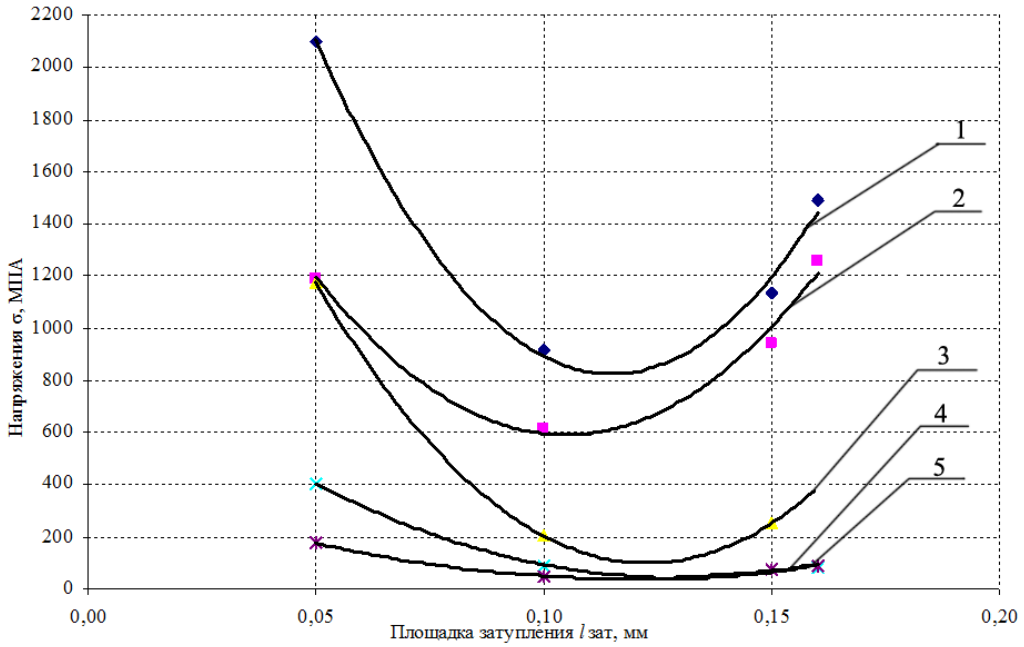


Рис. 3. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F90 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

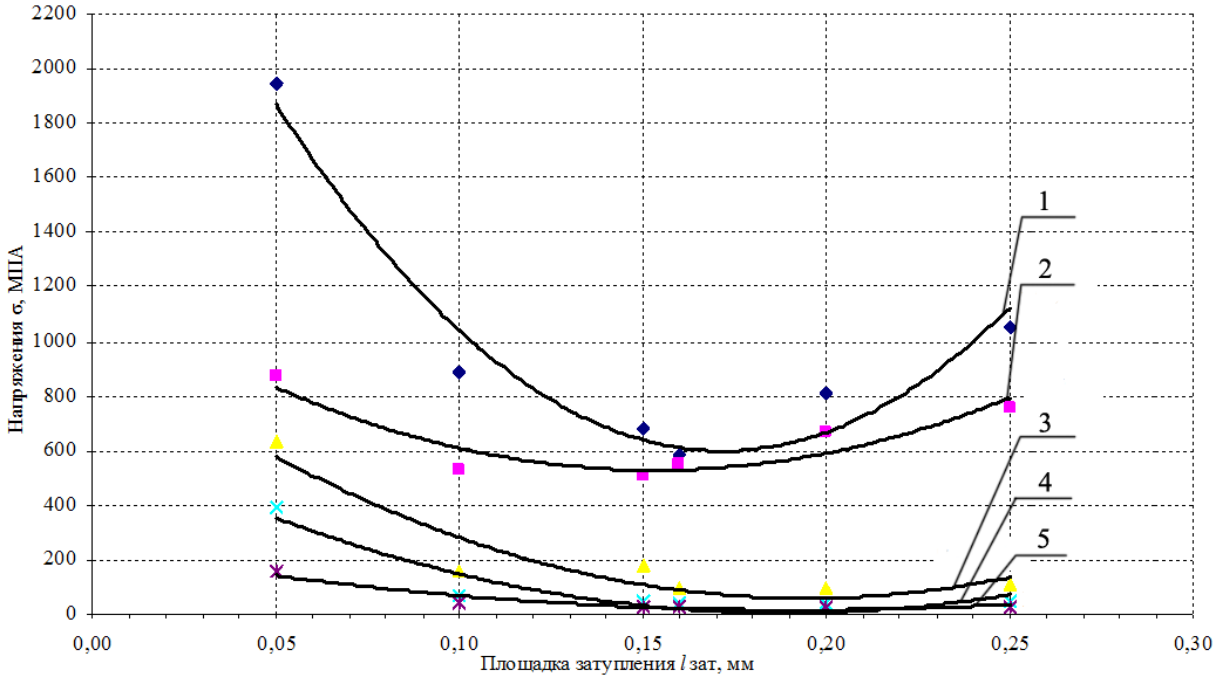


Рис. 4. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F60 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

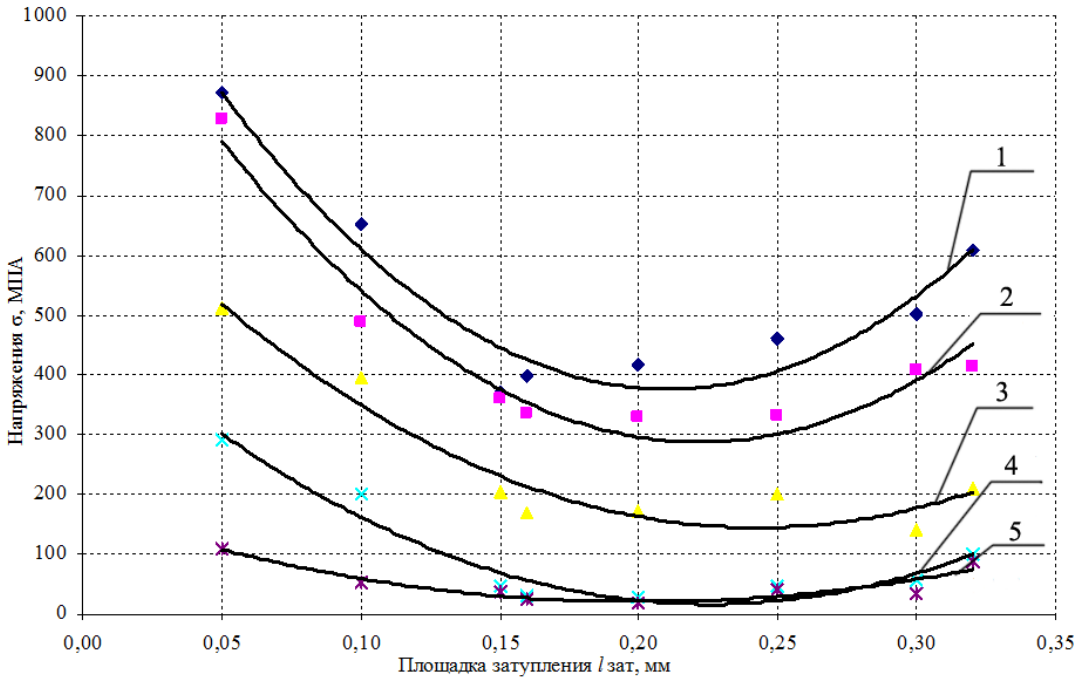


Рис. 5. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F54 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

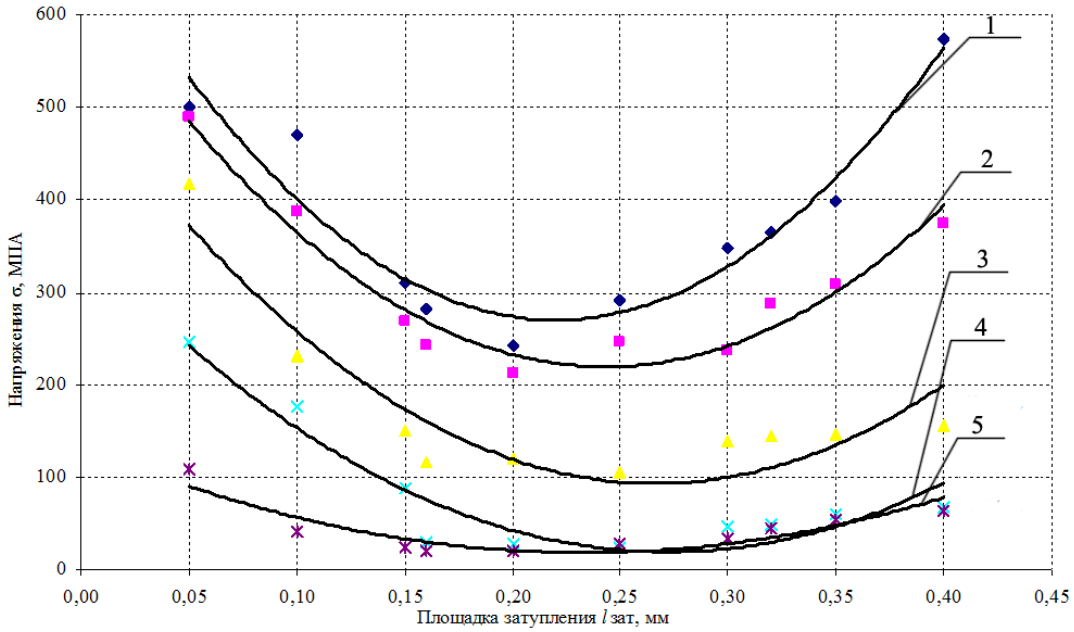


Рис. 6. Зависимость эквивалентных напряжений в абразивном зерне F46 от величины площадки затупления, при различных температурах: 1 – 200 ºС; 2 – 400 ºС; 3 – 600 ºС; 4 – 800 ºС; 5 – 1000 ºС

Таблица 2

Величина эквивалентного напряжения в абразивном зерне в различных технологических условиях

Температура, ºС	Зернистость	Площадка затупления *l*зат, мм							
		0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
		Эквивалентные напряжения σ, МПа							
200	F90	2097	913	1131	–	–	–	–	–
	F60	1944	887	677	809	1053	–	–	–
	F54	870	653	369	416	460	500	–	–
	F46	500	470	309	241	291	348	398	573
400	F90	1191	616	943	–	–	–	–	–
	F60	871	532	507	669	752	–	–	–
	F54	828	489	361	327	332	408	–	–
	F46	488	387	268	211	246	236	308	374
600	F90	1172	203	252	–	–	–	–	–
	F60	631	154	175	92	93	107	–	–
	F54	509	395	203	168	172	201	142	–
	F46	417	231	150	119	104	138	147	155
800	F90	404	89,3	76	–	–	–	–	–
	F60	388	67	47	42	38	49	–	–
	F54	290	201	45	32	28	46	57	–
	F46	246	177	88	27	23	46	59	67
1000	F90	177	49,7	72	–	–	–	–	–
	F60	155	39	30	30	30	28	–	–
	F54	110	52	36	24	20	39	35	–
	F46	109	41	24	19	29	34	55	63

Анализируя приведенные на рисунках 2–6 зависимости можно заключить, что между технологическими условиями (степень затупления зерна, температура в зоне контакта, зернистость абразивного зерна) и величиной эквивалентных напряжений, возникающих в теле зерна, имеется четкая зависимость. Так, в начальный период работы зерна на нем образуется и начинает постоянно увеличиваться площадка затупления. Это приводит к снижению напряжения в абразивном материале, что соответствует периоду приработки и образованию на абразивном зерне «наилучшей», с точки зрения долговечности абразивного зерна, величины площадки затупления, при которой напряжения в теле абразивного зерна минимальны. Дальнейший рост площадки затупления приводит к увеличению напряжения в абразивном зерне, возможно за счет существенного увеличения трения по площадке затупления, тем более, когда величина самой площадки сопоставима с размерами самого зерна. Это объясняется уменьшением количества связей в элементарном объеме зерна, воспринимаемых напряжения, а впоследствии, существенным увеличением напряжения, действующего на одну связь.

Влияние зернистости абразивного зерна (его геометрических размеров) на величину напряжения в зерне также однозначно: с увеличением номера зернистости, при одинаковых температурах и величинах площадки затупления зерна меньшего размера испытывают большие напряжения. Это объясняется опять же наличием в крупных зернах большего количества межатомных связей, воспринимающих внешнюю нагрузку.

Рост контактной температуры приводит к снижению напряжений в теле абразивного зерна: увеличение температуры в 2 или 3 раза приводит к снижению эквивалентных напряжений в 1,2 и 8 раз соответственно.

Представленная в настоящей статье модель механического взаимодействия абразивного и обрабатываемого материала является основой для создания многофакторной имитационной стохастической модели износа абразивных зерен в процессах шлифования, учитывающей различные механизмы износа [8, 9]. Переход к прогнозированию объемов изношенной части абразивного зерна возможен в частности на основе эмпирических данных, полученных, в том числе методами микрорезания [10].

Библиографический список

1. Ардашев, Д.В. Комплексное описание эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов / Д.В. Ардашев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 33. – С. 113–116.

2. Ардашев, Д.В. Термомеханическая усталость абразивного зерна / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2012. – № 4. – С. 2–4.

3. Дьяконов, А.А. Практическая реализация теории технологической обрабатываемости материалов в процессах абразивной обработки / А.А. Дьяконов, А.А. Кошин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 6–3(290). – С. 18–25.

4. Дьяконов, А.А. Исследование обрабатываемости материалов – эффективный путь повышения производительности процесса шлифования / А.А. Дьяконов // СТИН. – 2012. – № 3. – С. 25–29.

5. Уэда, Т. Исследование температуры абразивных зерен при шлифовании с помощью инфракрасного радиационного пирометра / Т. Уэда, А. Хосокава, А. Ямамото // Конструирование. – 1985. – № 2. – С. 109–116.

6. Шмидт, И.В. Напряженное состояние полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – 2013. – № 7. – С. 27–31.

7. Шмидт, И.В. Модель напряженного состояния полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 4. – С. 46–48.

8. Ардашев, Д.В. Химическое сродство абразивного и обрабатываемого материалов / Д.В. Ардашев // Металлообработка. – 2011. – № 6. – С. 29–32.

9. Ардашев, Д.В. Режимно-инструментальное оснащение проектирования групповой технологии операций шлифования / Д.В. Ардашев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2(288) – С. 14–19.

10. Стенд для исследования взаимодействия абразивного зерна и образца в процессах абразивной обработки / Д.В. Ардашев, В.В. Ахлюстина // Технология машиностроения. – 2013. – № 6. – С. 27–28.

К содержанию

УДК 378:004.77

СОЦИАЛЬНЫЕ СЕТИ КАК ВЕБ-СЕРВИС В ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА В ВУЗЕ

Л.А. Силаева

Популярность социальных сетей растет год от года. Интерес, проявляемый интерес молодым поколением к социальным сетям, необходимо использовать в модели дистанционного обучения. В образовательные стандарты всех уровней образования закладываются информационные технологии как обязательное условие реформирования отечественного образования. и цель данной статьи является выявление педагогического потенциала в модели дистанционного обучения студентов инженерных специальностей.

Ключевые слова социальные сети; веб-ресурсы; вики страницы; электронные ресурсы; файлообменник.

Выбор данной темы для конференции обоснован, прежде всего желанием использования современных социальных сетей в процессе обучения студентов дневной и особенного заочной формы обучения, из-за низкого уровня школьной подготовки и недостаточного количества аудиторных часов при изучении дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика».

Небольшая историческая справка. Популярность в Интернете социальные сети начали завоёвывать в 1995 году, с появлением американского портала Classmates.com («Одноклассники« являются его русским аналогом). Проект оказался весьма успешным, что в следующие несколько лет спровоцировало появление не одного десятка аналогичных сервисов. Но официальным началом бума социальных сетей принято считать 2003–2004 гг., когда были запущены LinkedIn, MySpace и Facebook. И в настоящее время социальные сети продолжают находиться на пике популярности.

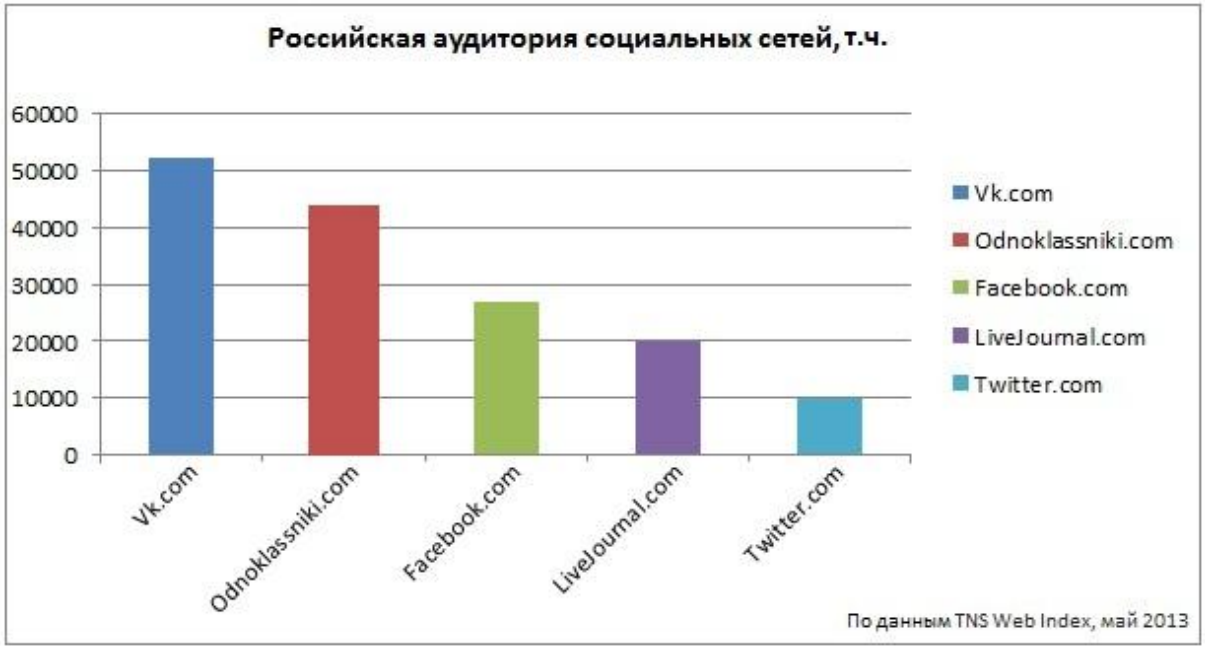
В настоящее время стали появляться образовательные и научные социальные сети. Наиболее популярной является американская социальная сеть Facebook. Она признается одним из наиболее популярных инструментов (программного обеспечения) обучения и развития. Американской социальной сетью Facebook пользуются около 800 миллионов людей. Facebook позволяет преподавателям университетов создавать курсы для студентов, организации могут создать закрытую корпоративную сеть сотрудников на

платформе Facebook: работники одной компании могут находиться на постоянной связи с коллегами из разных филиалов, публиковать новости своей организации и т.д.

Самыми известными социальными сетями в России являются «Одноклассники», «В контакте», «Мой мир», причем «В контакте» отличается более молодой аудиторией: доля респондентов от 18 до 24 лет в этой сети составляет 85 %. В контакте» является лидером по активности посещения проекта: 45 % зарегистрированных на этом портале пользователей посещают его ежедневно, а 70 % – чаще одного раза в день; Каждый третий участник «В контакте» тратит на одно посещение более получаса своего времени. Исходя из представленных данных, логично предположить, что «В контакте» является самым популярным социальным ресурсом для молодой аудитории.

По данным ФОМ (ФОНД ОБЩЕСТВЕННОГО МНЕНИЯ) на июнь 2013 доля интернет аудитории – это выходящие в Сеть хотя бы раз за сутки – сейчас составляет 57 % населения (+5 % за 6 месяцев). Годовой прирост интернет-пользователей, выходящих в сеть хотя бы раз за месяц, составил 11 %, а для суточной аудитории данный показатель равен 14 %.

Самая популярная социальная сеть – vk.com, за месяц её посещают порядка 50 млн человек. На втором месте – Одноклассники – 43 млн ежемесячных посетителей (см. рис.) [1].



Активность посещения сайта

В последние годы в мировом педагогическом сообществе обсуждаются вопросы применения социальных сетей в образовании. Безусловно, социальные сети не могут являться единственным средством сетевого обучения, но, тем не менее, их образовательные возможности недооценены.

В рамках вопроса организации процесса профессионального образования с использованием социальных сетей, студентам была предложена анкета на предмет использования социальной сети «В контакте» в учебном процессе. По результатам анализа была создана закрытая группа для студентов первого курса, где студенты получают информацию, связанную с изучением дисциплины «Начертательная геометрия и инженерная графика», информацию о смене расписания, проведения общественных мероприятий и т.д.

Что показало использование социальных сетей в учебном процессе [2].

1. Для студента это комфортная и привычная среда общения. Внешний вид окна (интерфейс), способы коммуникации, организация и содержание контента изучены студентом и полностью понятны ему, что объясняется длительным опытом использования. Нет необходимости обучать студентов работе в сети. Если сравнивать активность использования студентами специально создаваемых преподавателем в целях обучения веб-ресурсов с активностью посещения студентами их профилей в социальных сетях, то, безусловно, она будет ниже. Кроме того, студент осознает возможности социальной сети не только, как развлекательного инструмента, но и как мощного средства организации профессиональной деятельности.

2. Для совместной работы, открылся широкий диапазон возможностей и форм взаимодействия, разнообразие форм коммуникации: вики-страницы, форумы, опросы, голосования, комментарии, подписки, отправка персональных сообщений и другое. Кроме того, в социальной сети легче обмениваться интересными и полезными ссылками на другие ресурсы. Для этого достаточно просто поделиться найденными ссылками через используемую социальную сеть. Существенным плюсом использования социальных сетей в образовательном процессе является социальная доступность преподавателей в вопросах осуществления коммуникации.

3. Однозначная идентификация пользователей. Чаще всего в социальной сети человек выступает под своим именем и фамилией, реже – под псевдонимом. В других Интернет – сервисах происходит наоборот. Кроме того положительным моментом является то, что студенту не требуется запоминать новые логин и пароль для входа в систему, он пользуется привычным для себя способом идентификации в сообществе. Социальная сеть

позволяет преподавателю лучше визуально запоминать студентов и понимать их интересы, разработать для него задания, которые бы заинтересовали студента, а значит – обеспечили более качественное усвоение учебного материала.

4. Возможность фильтрации поступающей информации. Активность участников прослеживается через ленту новостей, этот инструмент позволяет не растеряться пользователю в многообразии информационных потоков и осуществлять эффективный мониторинг обновлений разнообразного контента. У студентов появляется возможность быть в курсе всех изменений, происходящих в процессе учебной деятельности, отслеживать образовательную активность одногруппников и преподавателя, который, в свою очередь, наблюдает и координирует работу учащихся.

5. Широкие возможности совместной деятельности. Совместное планирование и наполнение учебного контента, собственных электронных образовательных ресурсов, социальные сети открывают студентам возможность поделиться тем, чему они научились и тем, что обнаружили интересного в сети, не только со своими сокурсниками и преподавателем, но и со всем миром. Кроме того, в социальной сети существует возможность привлечения к участию в образовательном процессе «третьих» лиц: экспертов, консультантов, специалистов в изучаемой области. Студентка разместила в группе образец выполнения задания по инженерной графике, чтобы могли воспользоваться все участники группы.

6. Возможность организации непрерывного обучения. Возможность постоянного взаимодействия студентов и преподавателей в сети в удобное для них время обеспечивает непрерывность учебного процесса, появляется возможность более детальной организации работы индивидуально с каждым из студентов. Кроме этого, дискуссии, обсуждения, диалоги, начатые во время аудиторных занятий, могут быть продолжены в социальной сети, что позволяет студентам больше времени находиться в процессе обсуждения учебных вопросов, что обеспечивает более тщательное освоение материала и активную позицию студента в процессе обучения. Информационная поддержка учебного курса в социальной сети позволяет студентам, пропустившим занятие, не выпадать из образовательного процесса, принимать участие в обсуждениях и выполнять задания из дома.

7. Широкие демонстрационные возможности. Обучение с использованием социальных сетей позволяет преодолеть технические трудности оснащения учебных аудиторий необходимым оборудованием для демонстрации наглядных материалов в электронном виде. Файлом, ссылкой на скачивание файла из файлообменника, ссылкой для просмотра уже загруженного файла преподаватель беспрепятственно делится со студентами, а те,

в свою очередь, имеют возможность, ознакомится с содержанием файла в любое удобное время. Экономия бумаги также является достаточно весомым аргументом «за» использование социальных сетей в распространении наглядного раздаточного материала. В некоторых социальных сетях присутствует большой выбор приложений, которые можно использовать в учебных целях (например, приложение «Образовательная литература» социальной сети «В контакте»).

В настоящее время невооруженным глазом виден огромный потенциал социальных сетей как платформы для развития дистанционного обучения. Студентами отмечаются многочисленные положительные моменты такой системы образования, среди которых особое место занимают непрерывность и интерактивность самого учебного процесса, возможность самостоятельного выбора времени и места для выполнения того или иного задания и то, что преподаватель становится гораздо ближе студентам.

Библиографический список

1. Бондаренко, Е.С. Социальные сети как инструмент развития: виды и возможности / Е.С. Бондаренко. – URL: http://www.trainings.ru/library/articles/.

2. Фещенко, А.В. Социальные сети в образовании: анализ опыта и перспективы развития / А.В. Фещенко // Открытое и дистанционное образование. – 2011. – № 3. – С. 44–50.

К содержанию

УДК 621.923.01

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СЪЕМА МЕТАЛЛА ПРИ ВНУТРЕННЕМ ШЛИФОВАНИИ

А.В. Попова

Рассмотрен процесс формирования фактической величины припуска для процесса внутреннего шлифования, учитывающий влияние радиальной составляющей силы резания и упругой деформации системы.

Ключевые слова: силы резания, упругая деформация, фактическая глубина резания.

Развитие техники и технологии привело к появлению оборудования, обладающего новыми технологическими возможностями, современного, режущего инструмента, обрабатывающего и обрабатываемого материала. В результате, чего стало возможным производить обработку с повышенными значениями скоростей и подач. На большинстве предприятий машиностроительной отрасли Росси назначение параметров обработки осуществляется двумя путями: 1) на основании данных, назначенных по нормативно-справочной литературе; 2) методом подбора (обработка ряда пробных заготовок). Каждый из способов имеет ряд существенных недостатков: нормативно-справочная литература 60,70,80-х годов выпуска, составлена на основании статистических данных того периода и для универсальных станков, полуавтоматов, что делает ее не приемлемой для применения на современном оборудовании. Метод подбора для условий серийного производства является не рентабельным, так как требует дополнительных затрат. Подобранные параметры обработки зачастую не являются эффективными. С целью решения данной проблемы нами впервые разработана методика создания оптимальных ступенчатых циклов внутришлифовальной обработки, основанная на модели съема металла и применяемая для выбора оптимального решения метод динамического программирования [1].

Рассмотрим по подробнее процесс формирования фактической величины снимаемого припуска. Фактическая величина снимаемого припуска находится в зависимости от радиальной составляющей силы резания. Существуют два похода для расчета сил резания в процессе внутреннего шлифования – аналитический и эмпирический. Расчет сил резания по узконаправленным эмпирическим формулам не представляется возможным, так как отсутствуют взаимосвязей между основными технологическими параметрами процесса шлифования. Существующие аналитические зависимости имеют ряд значительных недостатков. Например, моделирование силы резания для процесса внутреннего шлифования, разработанного в работе [2], не учитывает характеристику круга, степень затупления, расположение зерен в пятне контакта и др.

Необходимо отметить, что расчет по данной силовой модели, применяемой к нашей методики создания оптимальных циклов, будет происходить годами. Что делает данную модель не приемлемой для дальнейшего рассмотрения. Применение силовых моделей, разработанных для других видов шлифования, не представляется возможным, так как они не учитывают кинематику и особенности внутреннего шлифования.

В основе разработанной нами модели сил резания находится подход расчета составляющих сил резания, разработанный в работе [3], и функциональная взаимосвязь интенсивности съема металла кругом с деформируемыми в зоне сдвига элементарными объемами металла, предложенный в работе [4]. Разработанная силовая модель охватывает большую часть технологических факторов, влияющих на изменение силы резания: изменения значения программной и фактической радиальной подачи, механические свойства шлифуемого металла, геометрические параметры зоны контакта круга и заготовки, характеристику круга степень затупления зерен круга и т.д. Общий вид формулы, полученной для расчета радиальной составляющей силы резания, возникающей в процессе внутреннего шлифования [5]:

$$P_{Yz,i,} = M_1 \cdot t_{z,i,} + M_2 \cdot \sqrt{t_{z,i}},$$

$$M_1 = \frac{1{,}86\sigma\pi d_{заг} V_{Soc}}{\sqrt{\left(V_{кр} + V_{заг}\right)^2 + V_{Soc}^2}} \qquad (1)$$

$$M_2 = \frac{\sigma\eta B}{3}\sqrt{\frac{d_{заг} D_{круга}}{(d_{заг} - D_{круга})}}$$

где z – порядковый номер ступени цикла; i – порядковый номер хода шлифовального круга; t – глубина шлифования, равна радиальной подачи шлифовального круга, мм/ход; $V_{кр}$ – окружная скорость круга, мм/мин; $V_{заг}$ – скорость заготовки, мм/мин; V_{Soc} – скорость осевая подача, мм/мин; σ – среднее значение интенсивности напряжений, Н/мм^2; μ – коэффициент трения абразивного зерна по обрабатываемому материалу; η – степень затупления шлифовального круга; $d_{заг}$ – диаметр заготовки, мм; $D_{круга}$ – диаметр круга, мм; Т – ширина шлифовального круга, мм.

В результате действия радиальной составляющей силы резания в технологической системе возникают упругие деформации (прогибы). Из всех элементов технологической системы в процессе внутреннего шлифования наибольшей податливостью обладает шлифовальной шпиндель с оправкой и кругом. Из уравнения упругой линии оси шлифовального шпинделя получены формулы для нахождения упругих деформаций и угла поворота режущей кромки круга [6]:

угол поворота режущий кромки круга

$$\varphi_{z,i} = P_{Yz,i}\left(\frac{1}{EJ_{X2}}\left(\frac{\mathrm{T}L + L^2}{2}\right) - \frac{T^2}{2EJ_{X1}}\right),$$

минимальное значение упругой деформации режущей кромки круга:

$$y_{z,i} = P_{Yz,i}\left(\frac{L^2T + 2L^2}{EJ_{X2}}\right), \qquad (2)$$

где E – модуль упругости, МПа; L – длина вылета шлифовальной оправки, мм; $J_{X1,2}$ – полярный момент инерции для 1-го и 2-го сечения шлифовальной оправки.

Действие радиальной составляющей силы резания приводит к тому, что величина фактической глубины резания меньше заданной программной радиальной подачи на величину упругих деформаций режущей кромки шлифовального круга:

$$t_{\Pi z,i} = t_{\Phi z,i} + y_{z,i},$$

где $t_{\Pi z,i}$ – программное значение радиальное подачи на i-ом ходу z-ой ступени цикла, мм/ход; $t_{\Phi z,i}$ – фактическое значение радиальной подачи на на i-ом ходу z-ой ступени цикла, мм/ход. В результате действия радиальной составляющий силы резания круг «выдавливается» из зоны контакта круга с заготовкой (рис. 1). Выделим три варианта контакта круга с заготовкой: 1) круг частично контактирует с заготовкой, при этом величина активной части ширина круга меньше общей ширины круга (рис. 1, а); 2) заготовка и круг находятся в контакте по всей ширине круга, т.е. величина активной части ширины круга равна обшей ширине (рис. 2, а); 3) теоретически максимально возможное значение активной части ширины круга больше общей ширины круга (рис. 2, б). Это становится возможным в результате резкого увеличения значения программной радиальной подачи при малом значении общей ширины круга. В дальнейшем, в процессе расчетов для данного случая величину активной части ширины круга принимаем равной общей ширине.

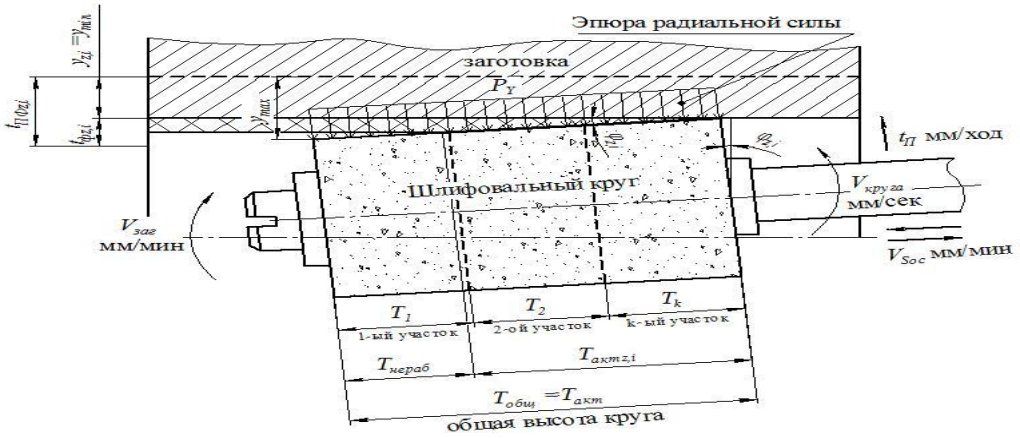


Рис. 1. Расчетная схема снятия припуска
при неполном контакте круга с заготовкой ($T_{общ} > T_{акт}$)

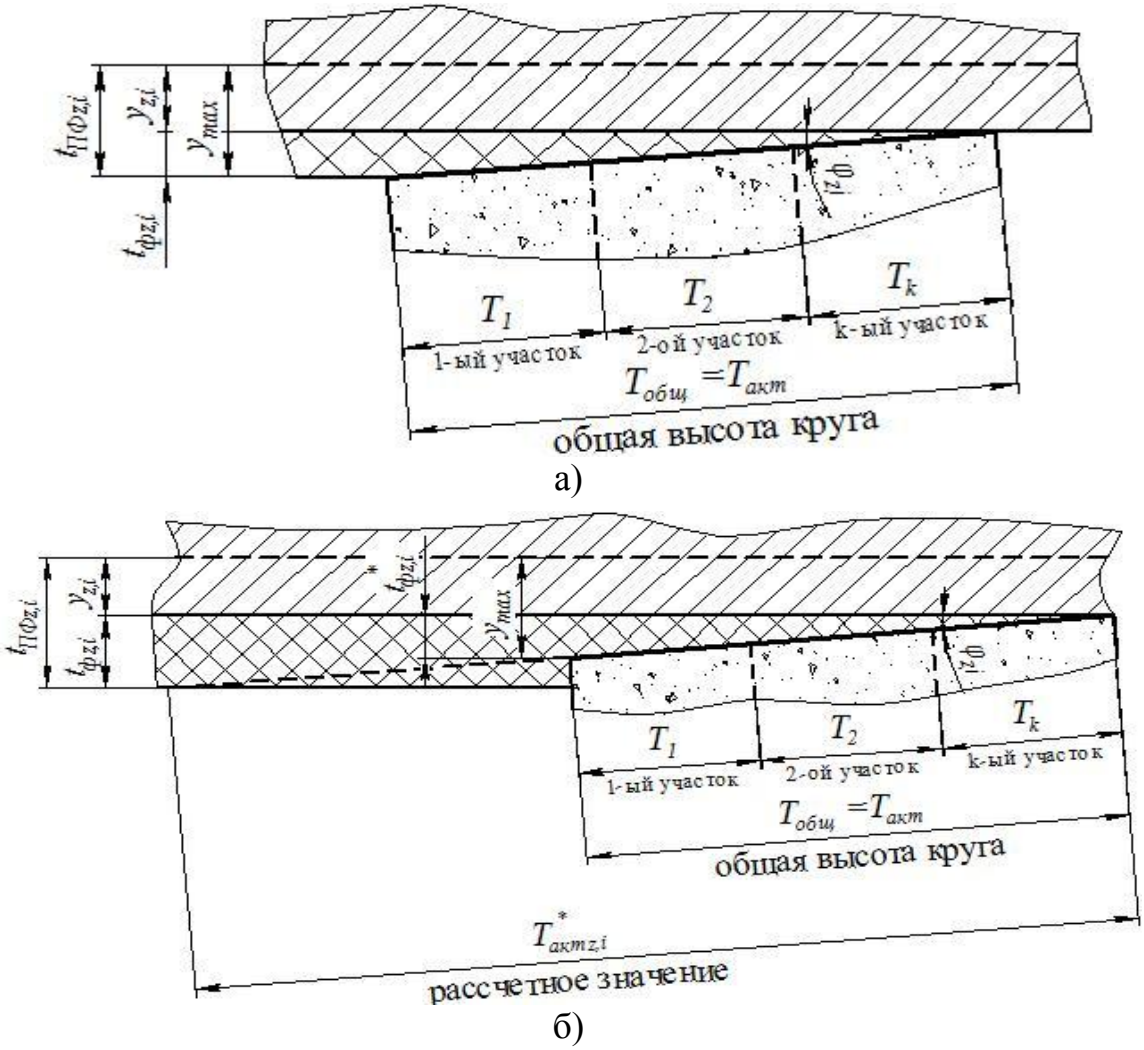


Рис. 2. Расчетная схема снятия припуска: при полном контакте круга с заготовкой: а) $T_{общ} = T_{акт}$; б) $T_{общ} < T_{акт}$.

Процесс снятия припуска в целом для внутреннего шлифования сложнее, так как требует учета переходных процессов. С этой целью введено понятие программно-фактическая подача – это расстояние между режущей кромкой круга и заданной величиной программной скорости радиальной подачи, измеренное в перпендикулярном направлении. Значение программно-фактической подачи зависит от порядного номера (четный, нечетный) и вида хода (холостой, рабочий). Рассмотрим по подробнее порядок построения размерных схем для каждого хода в отдельности на примере, состоящего из 4 ходов (рис. 3):

$$t_{ПФz,i} = t_{Фz,i} + y_{z,i}, \quad (3)$$

1-ый од: $t_{ПФ1,1} = t_{П1,1(2)} \Rightarrow t_{П1,1(2)} = t_{Ф1,1} + y_{1,1}$

2-ой ход: $t_{ПФ1,2} = y_{1,1} \Rightarrow y_{1.1} = t_{Ф1,2} + y_{1,2}$

3-ий ход: $t_{ПФ1,3} = t_{П1,3(4)} + y_{1,2} \Rightarrow t_{П1,3(4)} + y_{1,2} = t_{Ф1,3} + y_{1,3}$

4-ый ход: $t_{ПФ1,4} = y_{1,3} \Rightarrow y_{1.3} = t_{Ф1,4} + y_{1,4}$

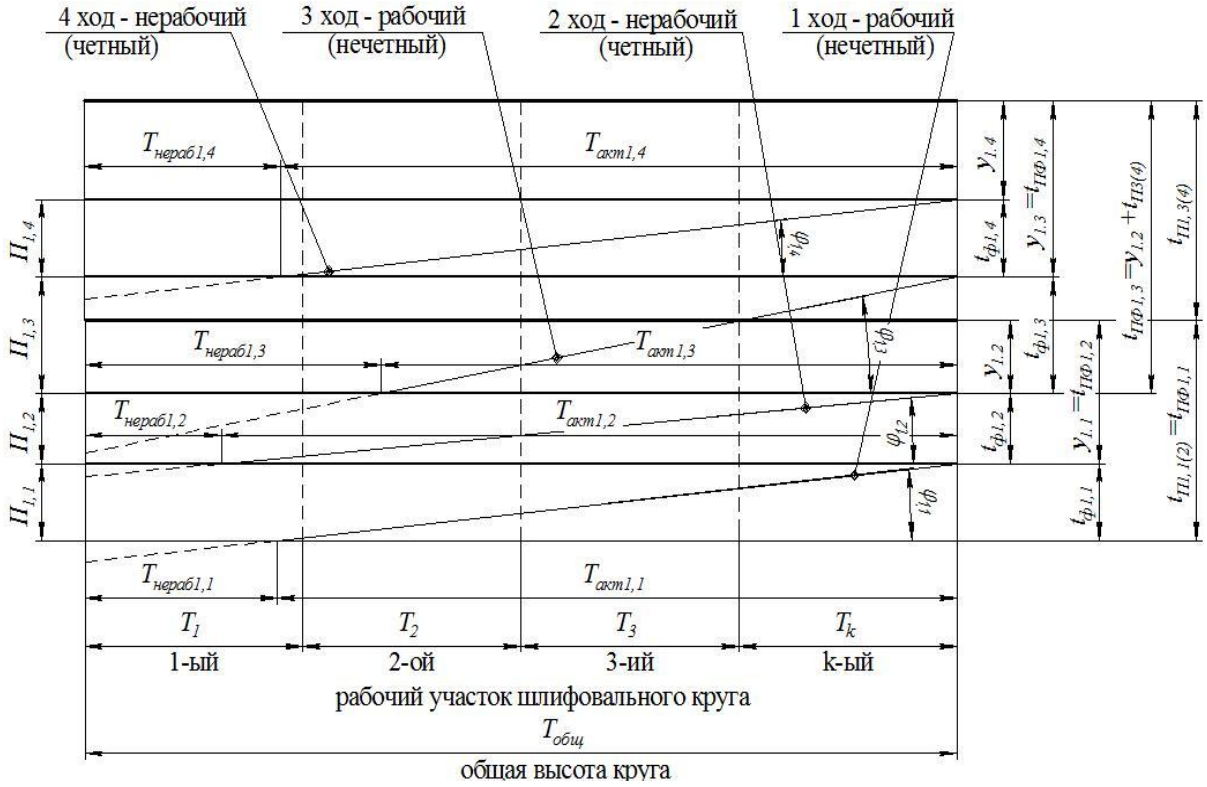


Рис. 3. Схема снятия припуска для 4-х ходов

На основании разработанной силовой модели (1), формулы для расчета упругой деформации режущей кромки круга, учитывающая активную часть ширины круга (2), а так же размерных схем и формулы (3), полученных для различного сочетания ходов выведена формула для расчета фактического значения скорости радиальной подачи:

$$t_{\Phi} = \left(\frac{\sqrt{K_5} - K_1 M_3 W_q}{2 + 2K_1 M_1} \right)^2, \qquad (4)$$

где W_q – активная части ширина круга для q-ом пересчета; K_1, K_5 – коэффициенты, определяющиеся по формулам:

$$K_1 = \left(\frac{L^2 \mathrm{T}^{\text{дано}}_{\text{акт/z,i,q}} + 2L^2}{EJ_{X2}} \right),$$

$$K_5 = \left(\mathrm{K}_1 M_3 T^{\text{дано}}_{\text{акт/z,i,q}} \right)^2 + 4t_{\Pi\Phi z,i} + 4t_{\Pi\Phi z,i} K_1 M_1 .$$

Величина активной части ширины круга определяется методом математического подбора. Для первого пересчета она принимается равной общей ширине круга, для последующих пересчетов определяется по формуле:

$$W_{q+1} = 0.5(W_{\mathrm{q}} + T_{\text{акт/z,i}}) .$$

где $T_{\text{акт/z,i}}$ – расчетное значение активной части ширины круга, определяющиеся по формуле:

$$T_{\text{акт/z,i}} = \frac{t_{\Phi z,i}}{K_6 M_1 t_{\Phi z,i} + K_6 M_3 W_q \sqrt{t_{\Phi z,i}}}$$

$$K_6 = \left(\left(\frac{W_q L + L^2}{2EJ_{X2}} \right) - \frac{W_q^2}{2EJ_{X1}} \right)$$

Количество пересчетов q определяется погрешность расчета активной части ширины круга:

$$\left| \frac{W_q - T_{акт/z,i,k}}{W_q} \right| \cdot 100\% < 1\%$$

Одним из определяющих факторов эффективности технологического процесса помимо точности и качества обрабатываемой поверхности является основное время. В подавляющем большинстве нормативно-справочной литературе расчет основного времени осуществляется:

$$T_o = 2i_z \frac{l_{обр} + (0{,}3....0{,}5)T_{общ}}{V_{Soc} K_{VSoc}}, \quad (5)$$

где $l_{обр}$ – длина обработки, мм; K_{VSoc} – поправочный коэффициент на скорость осевой подачи; i_Z – количества ходов, определяется по формуле:

$$i_Z = \frac{2П_{z,i}}{t_{Пz,i}}, \quad (6)$$

где $2П_{z,i}$ – величина припуска для i-ого количества ходов z-ой ступени, мм.

Количество ходов и как следствие основное время определить в явном виде, так как это предлагается данных формулах (5) и (6), невозможно. Вследствие того, что невозможно предсказать фактический съем металла на каждом ходе из-за наличия упругих деформаций. Тем более для процесса внутреннего шлифования, где на каждом ходе разная полнота контакта круга, и сила резания изменяется из-за сложной функциональной связи упругих деформаций с параметрами режимов резания и технологических параметрами. В результате чего можно сделать принципиальный вывод: количество ходов можно только путем пошагового моделирования процесса съема металла. Разработанный математический аппарат позволяет рассчитать количество ходов и время цикла путем моделирования съема металла на каждом ходе при заданных режимах резания, при этом учитываются упругие деформаций, особенности кинематики резания.

Библиографический список

1. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во ин.лит., 1960. – 400с. с.

2. Дьяконов, А.А. Разработка научно-методической базы повышения эффективности процессов абразивной обработки на основе многофакторной оценки обрабатываемости материалов: дис. … д-ра техн. наук / А.А. Дьяконов. – Челябинск, 2013. – 386 с.

3. Корчак, С.Н. Теоретические основы влияния технологических факторов на повышение производительности шлифовальных стальных деталей: дис. … д-ра техн. наук / С.Н. Корчак. – Челябинск, 1973. – 372 с.

4. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. … д-ра техн. наук / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1999. – 293 с.

5. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.

6. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов / В.И. Феодосьев. – М,: Наука, 1979. –560 с.

К содержанию

УДК 621.923.01

РАСЧЕТ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ ДЛЯ ВНУТРЕННЕГО ШЛИФОВАНИЯ

А.В. Попова

Рассмотрен процесс разработки управляющих программ для внутришлифовальных операций, базирующего на модели съема металла и выборе оптимального решения методом динамического программирования.

Ключевые слова: внутреннее шлифование, оптимизация процесса, ступенчатые циклы, динамическое программирование.

На данном этапе развития машиностроительной отрасли России очень остро становится вопрос назначения оптимальных параметров обработки. Появление современного оборудования и шлифовального инструмента, позволяющих производить обработку на повышенных скоростях, сделало не приемлемым применение нормативно-справочной литературы. Так как данная литература разрабатывалась на основании статистических данных 60, 70, 80-х годов прошлого века для универсальных станков, полуавтоматов. В результате чего, на предприятии вынуждены подбирать режимные параметры обработки, удовлетворяющие требованиям по качеству и точности, методом побора. При этом назначенные режимы не всегда являются произ-

водительными, так же происходит увеличения затрат на производство. На данный момент практически отсутствуют теоретические разработки, позволяющие разрабатывать оптимальные управляющие программы для станков с ЧПУ для различных видов обработки. Существующие разработки уделяют моделированию силы резания и технологических ограничений, оказывающих на производительность процесса обработки. Для решения данной проблемы на основе метода динамического программирования, впервые разработана методика оптимизации ступенчатых циклов обработки внутришлифовальной обработки. Разработанная методика оптимизации ступенчатых циклов внутреннего шлифования позволяет оперативно рассчитать оптимальные режимы резания, осуществить подбор оптимальных типоразмеров шлифовального круга (диаметр, ширина круга) и технических условий обработки (величина перебега круга, конструктивных параметров шлифовального шпинделя и др.). В последующем, на основании данной методики предполагается разработать САПР и общемашиностроительные нормативы режимов резания для внутришлифовальных операций, удовлетворяющих требованиям современного производства.

Рассмотрим некоторые особенности построения циклов внутришлифовальной обработки в трехмерной системе координат (рис. 1). Современные шлифовальные центры, позволяют производить управление параметрами обработки в зависимости от величины снимаемого припуска и в независимости друг от друга. Частный случай трехмерных циклов обработки ставит изменения параметров управления в зависимость друг от друга, а также от величины снимаемого припуска. Рассмотрим особенности построения пространственного 3-х ступенчатого цикл внутришлифовальной обработки для частного случая. На рис. 1 можно увидеть: во-первых, пространственную траекторию управляющей программы, представляющую собой совокупность взаимосвязей всех управляющих параметров, во-вторых, изменения взаимосвязи определенного управляющего параметра от других (например, скорости осевой подачи от припуска и от программного значения скорости радиальной подачи). Под влиянием радиальной составляющей силы резания фактическая радиальная подача отличается от программной на величину упругих деформаций режущей кромки шлифовального круга. Графическое представление изменения фактического значения радиальной подачи представлено в координатных осях $t_{\text{П}}$ и $\mathit{П}$ (штриховая линия). Вследствие того что рассматриваемый цикл представлен в трехмерной системе координат фактическая скорость радиальной подачи по мимо представления в двухмерном пространстве имеет пространственное представление, обозначенное на рис. 1 штрихпунктирной линией с точкой. Так как процесс обработки носит переменный характер, в процессе проектирования оптимальных циклов необходимо учесть исходное биение заготовки и допуск на готовую деталь.

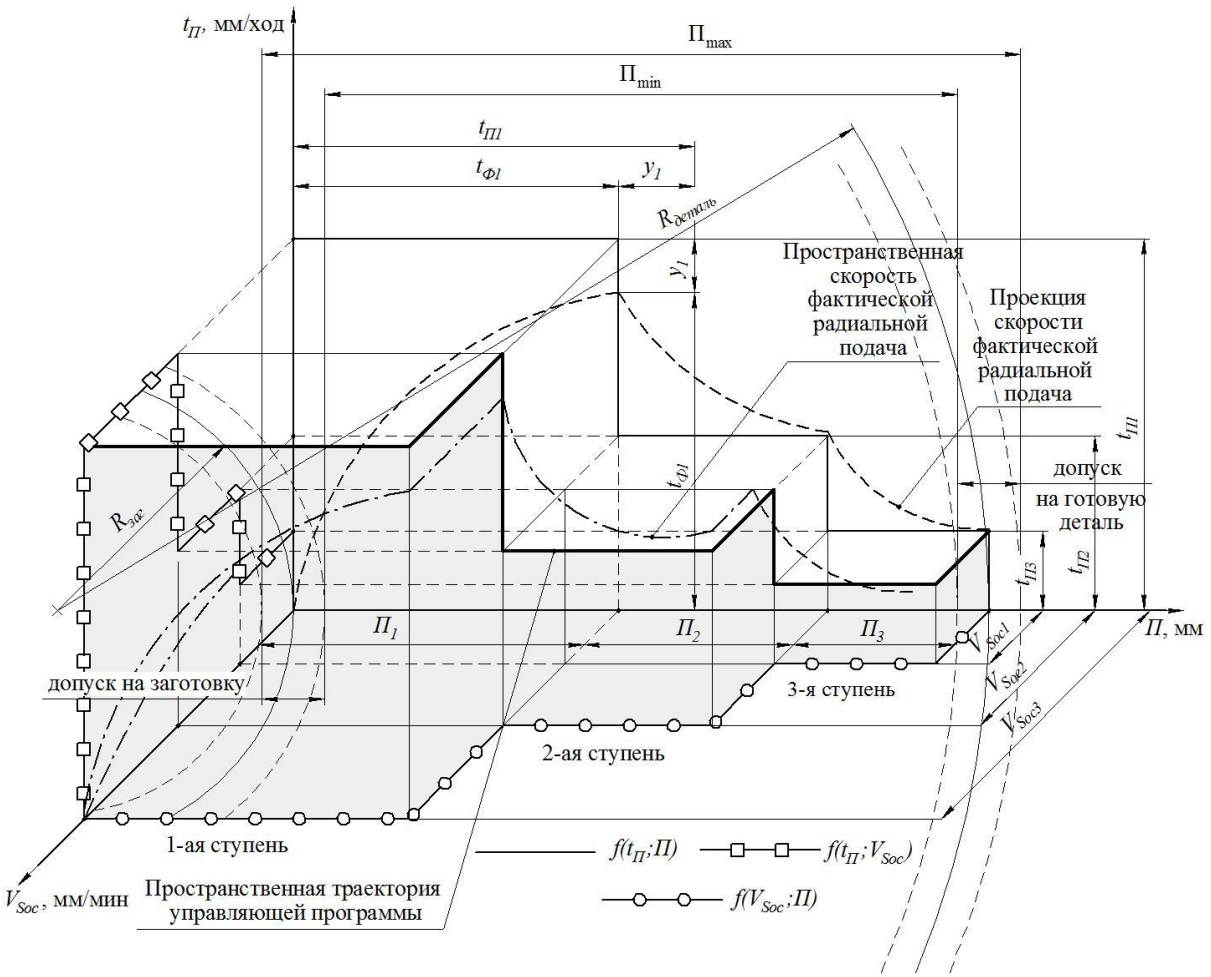


Рис. 2. График управляющей программы в 3-х мерном пространстве для 3-х ступенчатого цикла внутришлифовальной обработки

Кроме рассмотренных трех параметров процесса внутреннего шлифования в оптимизации нуждаются и другие управляющие параметры, оказывающие значительное влияние на производительность процесса, качество и точность обрабатываемой поверхности: ширина и диаметр шлифовального круга, частота оборотов заготовки. В результате чего, полная оптимизация циклов внутришлифовальной обработки возможна в шестимерном пространстве, что требует развития применения метода динамического программирования для многомерного пространства. С этой целью проведена адаптация и развитие метода динамического программирования для многомерного пространства, примененного при разработке новой методики проектирования оптимальных циклов внутришлифовальной обработки, комплексно охватывающей все вышеперечисленные управляющие параметры. Метод динамического программирования не чувствителен к характеру целевой функции и её ограничениям, и не требует построения заранее области допустимых значении управляющих параметров. В основе динамического программирования лежит, разработанный Р. Беллманом, прин-

цип оптимизации: оптимальное поведение обладает тем свойством, что каковы бы не были первоначальные состояния и решение в начальный момент, последующие решения должны составлять оптимальное поведение относительно состояния в результате первого решения [1]. Недостатком метода динамического программирования является то, что в силу необходимости применения дискретных значений управляющих параметров глобальный минимум целевой функции находится с определенной погрешностью, зависящей от величины их дискретности [3].

За критерий оптимальности чаще всего принимают переменную часть переменную часть затрат, зависящую от режимов обработки, т.е. время обработки. Оптимизация цикла шлифования сводится к сокращению времени обработки до минимально возможного значения. Поэтому в качестве целевой функции оптимизации цикла внутреннего шлифования выбрано минимальное время обработки. Отыскание минимума целевой функции в процесс оптимизации цикла внутришлифовальной обработки происходит при помощи учета комплекса технологических ограничений. В табл. 1 представлен комплекс моделей ограниченней процесса внутришлифовальной обработки [3, 4, 5].

Таблица 1

Комплекс моделей ограничений процесса внутреннего шлифования

Ограничения, накладываемые в начале цикла	Ограничения, накладываемые в конце цикла
по осыпаемости шлифовального круга	по допустимой погрешности размеров обрабатываемой поверхности
по допустимой глубине прижога на обрабатываемой поверхности;	
по диапазону затупления круга	по допустимой шероховатости обрабатываемой поверхности
по мощности привода вращения круга и заготовки	по достижимой точности обработки на станке
по диапазону скоростей подач поперечной и осевой	по величине погрешности измерения

Необходимо отметить, что метод динамического программирования не ограничивает ни количество оптимизируемых параметров управления, ни количества ограничений целевой функции. Например, можно ввести ограничения, связанные с динамическими процессами технологической системы или в качестве оптимизируемых параметров ввести параметры характеристики круга.

Предложенная нами методика создания оптимальных ступенчатых циклов внутреннего шлифования позволяет отказать от полного перебора возможных вариантов обработки цикла, заменив его на направленный пе-

ребор с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (длительных по времени) вариантов. В результате происходит сокращение времени, затрачиваемое на производстве на подбор оптимальных значений режимов обработки.

Библиографический список

1. Беллман, Р. Динамическое программирование / Р. Беллман. – М.: Изд-во ин. лит., 1960. – 400 с.

2. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис. … д-ра техн. наук / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1999. – 293 с.

3. Переверзев, П.П. Моделирование и оптимизация управляющих программ в автоматизированном машиностроительном производстве / П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 12 (271). – С. 152–157.

4. Переверзев, П.П. Аналитическое моделирование взаимосвязи силы резания при внутреннем шлифовании с основными технологическими параметрами / П.П. Переверзев, А.В. Попова // Металлообработка. – 2013. – № 3. – С. 24–30.

5. Переверзев, П.П. Моделирование технологических ограничений при оптимизации автоматических циклов шлифования / П.П. Переверзев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2012. – № 12 (271). – С. 165–168.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. МИАСС

УДК629.113

О СПОСОБАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ МИКРОПРОФИЛЯ ДОРОГИ НА ТРАНСПОРТНОЕ СРЕДСТВО

М.И. Абрамов

На ранних этапах проектирования в процессе оценки нагрузочных характеристик, действующих на транспортное средство, необходимо определить уровень внешнего воздействия со стороны дороги в заданных условиях эксплуатации. Для этого требуется количественная оценка неровностей поверхности дороги и математическое описание микропрофиля дороги.

Ключевые слова: микропрофиль дороги; внешнее воздействие; спектральная плотность; корреляционная функция; транспортное средство.

Для обеспечения необходимых свойств конструкции автомобильного транспортного средства (АТС) при проектировании инженеры всегда опираются на требования, определяемые нормативными документами. Одним из основных свойств является прочность. Требования к обеспечению прочности конструкции изложены в ГОСТ 27609-88 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Основные положения и требования к проведению и нормативно-техническому обеспечению». Данный стандарт определяет основным нормативно-техническим документом «Нормы прочности изделий отрасли». К сожалению, единых норм прочности в автомобилестроении не существует, за исключением автобусов [1].

Важным разделом норм прочности является «Нагрузки и режимы функционирования», где устанавливаются конкретные виды и характеристики внешних воздействий и нагрузок, связанные с внешними условиями среды. Для АТС основными внешними условиями являются дорожно-скоростные режимы: характеристики дорожных неровностей и максимально допустимая скорость движения. Именно эти параметры определяют уровень и частотный состав эксплуатационных нагрузок, которые приводят к отказам по прочности – статической или усталостной.

К настоящему времени невозможно перечислить всех работ, посвященных исследованиям и предложениям по обеспечению прочности автомобильных конструкций. Однако, не смотря на многочисленность упомянутых работ – расчетных или экспериментальных – основная сущность их сводится к тому, чтобы напрямую получить количественные характеристики прочности (деформации и напряжения), минуя предшествующее им важное звено – предельные количественные характеристики внешних экс-

плуатационных факторов (дорожных неровностей) и действующих эксплуатационных нагрузок. Как правило, внешние эксплуатационные факторы описываются качественно: цементобетонные, булыжные, щебеночные, грунтовые дороги и т.д. Действующие при этом нагрузки вообще остаются в стороне. В виде исключения можно привести полигонные испытания, где дороги заранее профилированы. Однако, во-первых, до настоящего времени не решен вопрос о соответствии полигонных условий нагружения условиям реальной эксплуатации, во-вторых, при движении по дорогам полигона действующие нагрузки, как правило, не определяются, за исключением вопросов плавности хода, где действующие виброускорения непосредственно являются критериальными величинами. Идеологическим обоснованием такого подхода является утверждение Н.Н. Яценко: «Установить связь напряжений в отдельных сечениях рамы с прикладываемыми усилиями или наблюдаемыми деформациями … весьма сложно. Сложность взаимодействия элементов конструкции рамы, конфигурации их, наличие многочисленных концентраторов напряжений, неопределенность предварительных напряжений в сочленениях делают практически невозможным теоретическое построение достаточно надежных формул для расчета напряжений и определения опасных сечений. Поэтому действительные напряжения находят экспериментальными методами с помощью тензометрирования» [2]. Не смотря на правомерность данного тезиса основной недостаток вышеизложенного подхода заключается в том, что (несмотря на значительный объем экспериментальных данных для конкретного образца АТС) их практически невозможно использовать даже для его модификаций, не говоря уже об обобщении и распространении на аналогичные типажи. Это объясняется тем, что деформации или напряжения являются весьма неоднородной функцией и, кроме того, обладают «тонкой» структурой, т.е. при небольшом изменении нагрузок могут значительно менять свои числовые характеристики. Тем самым резко сужается возможность накопления, обобщения и использования результатов ранее проведенных работ на этапе проектирования будущих образцов АТС. Но практика создания сложных машиностроительных конструкций показывает, что наиболее целесообразна и экономически выгодна такая схема работ, где прочность и долговечность конструкции закладывается при проектировании, подтверждается и доводится до требуемого уровня на стадии экспериментальной отработки и поддерживается на достаточном уровне при серийном производстве. Не противопоставляя указанные выше стадии и этапы, необходимо отметить, что проектирование является важнейшим звеном общего процесса, поскольку никакими, сколь угодно длительными и сложными доводочными испытаниями невозможно исправить грубых конструкторских просчетов, если такие имеют место при проектировании.

С широким внедрением компьютерных технологий появились новые, ранее неосуществимые, проектные возможности оценки нагруженности, прочности и долговечности конструкций АТС в замкнутой форме (абсолютном виде), т.е. с получением оценок по величинам коэффициентам запаса. Наиболее узким местом при проведении таких оценок является выбор и принятие решения по числовым характеристикам внешних воздействий, т.е. по характеристикам неровностей дорог предполагаемой схемы эксплуатации. Поэтому в данной работе проведено обобщение известных накопленных данных по неровностям различных дорог, и разработаны предложения по нормированию внешнего воздействия на АТС для анализа динамики, нагруженности и прочности его конструкции на этапе проектирования.

Для оценки внешнего воздействия как нагрузки, действующей на АТС, необходимо иметь представление о микропрофиле дороги. Под дорогой понимаются инженерные сооружения, обеспечивающие пропускную способность транспортного потока. Под микропрофилем дороги понимаются такие неровности, которые вызывают колебания подрессоренных и неподрессоренных частей АТС на элементах подвески. Неровности дороги, не вызывающие колебаний подвески и гасящиеся в шине, при оценке микропрофиля дороги не принимаются во внимание. Для грузовых АТС, колебания вызываются дорожными неровностями, длина волн которых находится в диапазоне 0,2–30 м.

Характеристики микропрофиля могут быть определены только экспериментально. Бурное развитие и накопление экспериментальных данных по характеристикам микропрофилей дорог происходило в 60–80-х годах прошлого столетия, что, по-видимому, связано с широким внедрением методов статистической динамики применительно к исследованию сложных механических систем.

Микропрофиль неровностей q определяют как функцию пути (расстояния) l, т.е. $q(l)$. При этом внешнее воздействие определяется выражением:

$$q(l/v)= q(t), \quad (1)$$

где t – время, сек; v – скорость движения АТС, м/сек.

В подавляющем большинстве работ микропрофиль представляется как стационарная случайная функция с нормальным законом распределения. При постоянной скорости движения АТС, по какой либо дороге. Внешнее возмущение также будет представлять реализацию стационарного случайного процесса с нормальным законом распределения. При этих предпосылках необходимыми и достаточными характеристиками неровностей микропрофиля является либо спектральная плотность мощности (СПМ) $G_q(f)$, $G_q(n)$, либо корреляционная функция $R_q(\tau)$, $R_q(\delta)$. Эти СПМ и соответствующие им корреляционные функции связаны зависимостями:

$$G_q(f) = \frac{1}{v} G_q(n), \tag{2}$$

$$R_q(\tau) = R_q(\delta) \text{ при } \delta = v \cdot \tau, \tag{3}$$

где f – частота внешнего возмущения, Гц; n – дорожная частота или волновое число, цикл/м; τ – время корреляции, с; δ – интервал корреляции, м.

Непосредственно СПМ и корреляционная функция связаны между собой преобразованием Фурье:

$$G_q(n) \Leftrightarrow R_q(\delta), \tag{4}$$

где символом $\Leftrightarrow$ обозначена пара преобразований Фурье.

Переход от расстояния l и времени t в частотную область осуществляется с использованием очевидных преобразований:

$$n=1/\lambda; \tag{5}$$

$$f=n \cdot v, \tag{6}$$

где λ – длина волны неровностей, м.

С математической точки зрения удобнее использовать круговые частоты, которые определяются как:

$$\Omega=2\pi \cdot n; \tag{7}$$

$$\omega=2\pi \cdot f, \tag{8}$$

где Ω – круговая дорожная частота, рад/м; ω – круговая частота внешнего возмущения, рад/сек.

До появления в 70-х годах алгоритмов быстрого преобразования Фурье основная характеристика дорожного возмущения – спектральная плотность мощности $G_q(f)$ – оценивалась путем преобразования Фурье корреляционной функции $R_q(\tau)$, которая аппроксимировалась различными аналитическими функциями. Для микропрофиля в большинстве случаев использовалась зависимость вида:

$$R_q(\delta) = S_q^2 \sum_{i=1}^{m} A_i e^{-\alpha_i |\delta|} \cdot \cos \beta_i \delta, \tag{9}$$

где S_q – среднее квадратическое значение ординат микропрофиля; A_i – весовые множители ($\sum_{i=1}^{m} A_i = 1$); α_i – коэффициенты, характеризующие затухание корреляционной функции; β_i – коэффициенты, характеризующие периодическую составляющую микропрофиля.

На основании данной модели накоплено достаточно большое количество экспериментальных данных по различным типам дорожного покрытия (цементобетон, асфальтобетон, грунт, булыжник).

В последующие годы алгоритм определения СПМ микропрофиля дороги основывался на быстром преобразовании Фурье (БПФ) с использованием метода Уэлча. При этом аппроксимация СПМ описывается степенным уравнением вида [3].

$$G_q(n) = G(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w_1} \text{ при } n \le n_0;$$
$$G_q(n) = G(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w_2} \text{ при } n \ge n_0, \quad (10)$$

или в более простом виде:

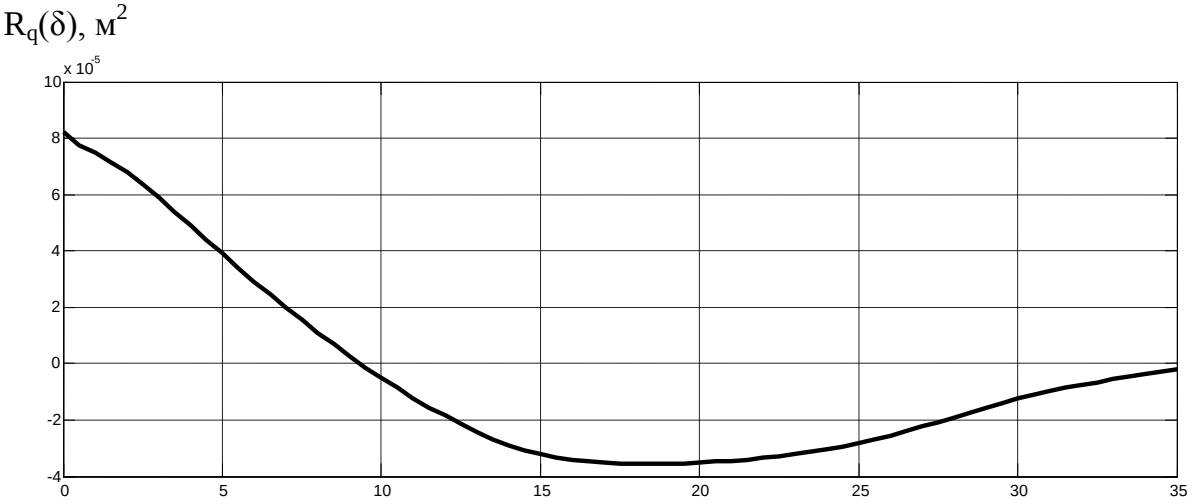
$$G_q(n) = G_q(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w}, \quad (11)$$

где $G(n_0)$ – «коэффициент неровностей», представляющий собой значение СПМ на дорожной частоте n_0.

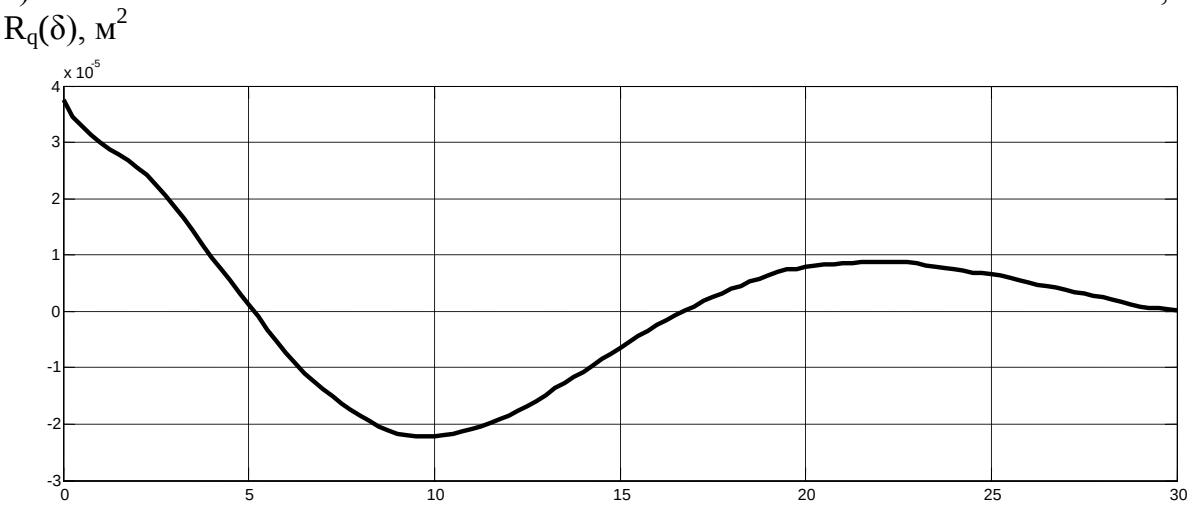
В настоящее время степенная аппроксимация является основной как в отечественной и зарубежной литературе, так и в нормативной документации. К сожалению, в технической литературе для дорог РФ экспериментальные данные по данной модели микропрофиля освещены очень скудно.

Таким образом, существует две модели, описывающие микропрофиль дороги через СПМ. Одна модель позволяет получить СПМ микропрофиля через корреляционную функцию при помощи преобразования Фурье (модель 1). Другая модель позволяет получить СПМ напрямую с использованием БПФ (модель 2). Учитывая тот факт, что корреляционная функция является явно нелинейной характеристикой из-за своей периодической составляющей, то очевидно, что при переходе в частотную область будет иметь место определенная погрешность в значении СПМ. При этом основной массив экспериментальных данных по микропрофилям дорог РФ накоплен для модели 1. Допустимо ли объединять массивы данных по двум моделям микропрофилей в целях дальнейшей их систематизации и использования в расчетных оценках?

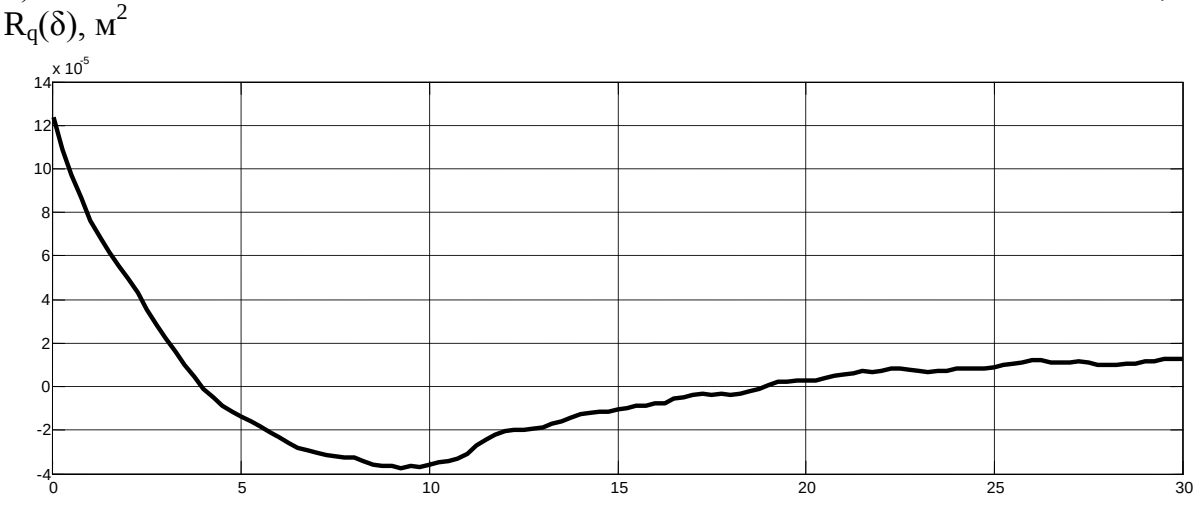
Для анализа представленных моделей была проведена обработка имеющихся измерений микропрофиля дорог с различным типом покрытия (асфальтовое шоссе; булыжная дорога; грунтовая дорога, укрепленная булыжником и песком). Измеренные процессы центрировались, а затем фильтровались фильтром низких частот (ФНЧ). Частота среза фильтра определялась максимальной длиной дорожной волны λ_{max} = 30 м. Для построения СПМ минимальная длина волны на основании теоремы Котельникова определялась по двум точкам, т.е. по двум дискретным отрезкам измеренных процессов. Результаты обработки для каждого типа покрытия представлены на рисунках 1–3.



а) δ, м



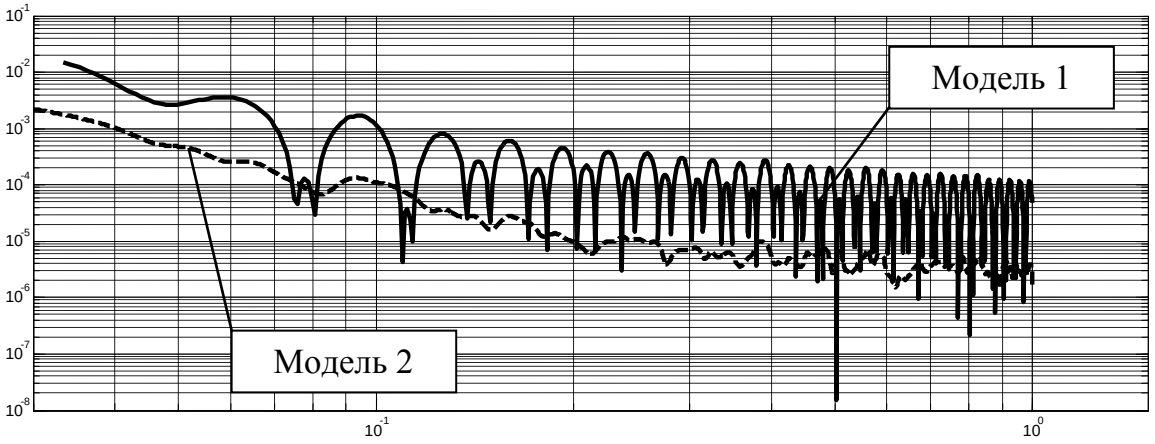
б) δ, м



в) δ, м

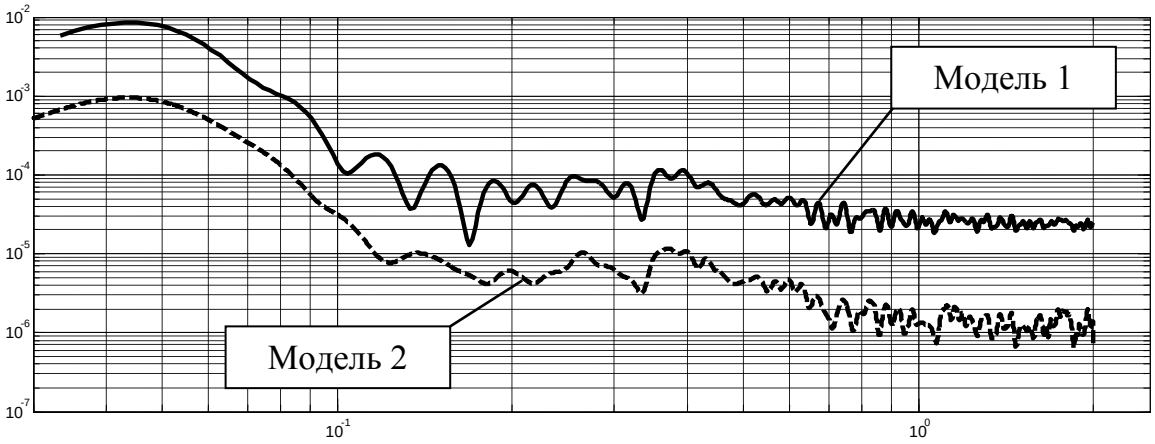
Рис. 1. Корреляционная функция микропрофиля:
а) асфальт; б) булыжник; в) щебень

$G_q(n)$, м^3/цикл



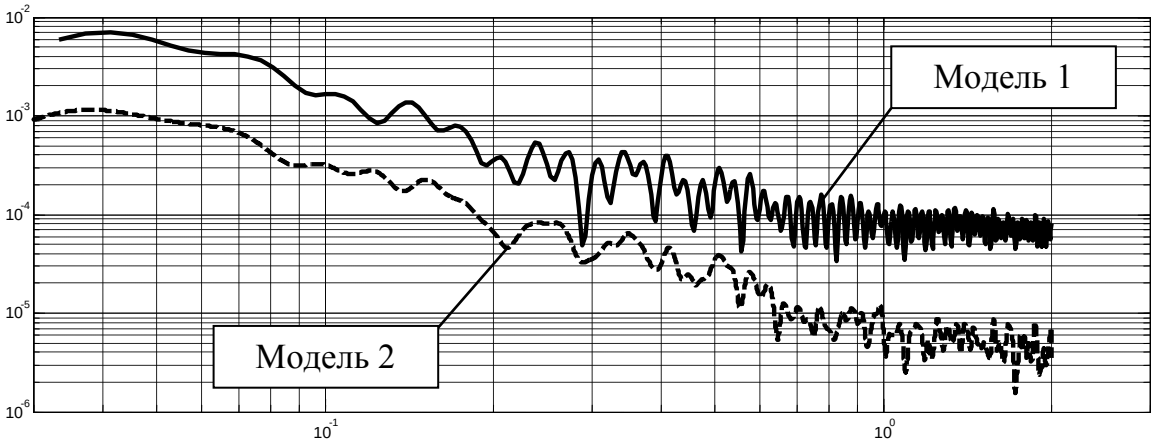
а) n, цикл/м

$G_q(n)$, м^3/цикл



б) n, цикл/м

$G_q(n)$, м^3/цикл



в) n, цикл/м

Рис. 2. Спектральная плотность мощности микропрофиля, полученная по двум моделям: а) асфальт; б) булыжник; в) щебень

Как видно из графиков имеется расхождение между характеристиками СПМ, полученными по модели 1 и 2. Данное расхождение, как уже говорилось выше, вызвано нелинейностью модели 1.

В целом это говорит о невозможности обобщения экспериментальных данных по двум моделям. При этом остается актуальным вопрос: как оценить диапазон изменения СПМ для различных типов микропрофилей?

В связи с вышеизложенным, каждое предприятие, специализирующееся на выпуске определенного класса АТС, вынуждено разрабатывать собственные методики и руководства по расчету и экспериментальной доводке конструкции. При этом комплексный подход и нормирование в данной области могли бы существенно облегчить решаемые задачи отечественных производителей АТС.

Библиографический список

1. Григалюк, Э.И. Нормирование прочности несущих систем автобусов / Э.И. Григолюк, Е.А. Коган, Н.А. Кулаков. – М.: МГААТМ, 1994. – 132 с.

2. Яценко, Н.Н. Колебания, прочность и форсированные испытания грузовых автомобилей / Н.Н. Яценко. – М.: Машиностроение, 1972. – 372 с.

3 Вибрация. Профили дорожных покрытий. Представление результатов измерений: Международный стандарт ISO 8608. – Женева: Международная организация по стандартизации, 1995. – 30 с.

К содержанию

УДК378.1; 658.5.011

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ СМК В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ МС ИСО 9001 В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ

В.А. Горшков

Проанализированы некоторые проблемы внедрения системы менеджмента качества на основе международных стандартов серии ИСО 9000 на примере реализации восьми основных принципов менеджмента качества.

Ключевые слова: высшее образование; управление качеством; система менеджмента качества.

Новое в преподавании полезно только тогда, когда на опыте определено, что оно лучше старого.

П.Л. Чебышев

Известно, что семейство стандартов ИСО 9000 было разработано «с целью оказания помощи организациям всех видов и размеров при внедрении и обеспечении функционирования эффективных систем менеджмента качества» (СМК), кроме того в этих стандартах определены восемь принципов «чтобы высшее руководство могло руководствоваться ими с целью улучшения деятельности организации» [1].

Образование это основа основ любой социальной систем и поэтому проблема качества образования касается всех граждан Российской федерации (РФ) от рождения и до глубокой старости. Действительно, как только человек появляется на свет, его начинают учить, при этом процесс обучения можно разделить на пять основных этапов:

Этап первый. От рождения до 6–7-ми лет (сначала это родители, потом это могут быть дошкольные учреждения: ясли и детские сады). По итогам обучения в этот период ребенок не проходит никакой аттестации (по крайней мере, законодательно это не закреплено).

Этап второй. От 6–7-ми лет до 17–18 лет: обязательное среднее образование (11 лет). Именно на этом этапе в головы юных граждан закладываются представления о том обществе и стране, в которой они живут, а также специальные знания из таких областей как: история, литература, математика, физика, химия и т.п. Официально получение среднего образования подтверждается сдачей единого государственного экзамена (ЕГЭ) и аттестатом о среднем образовании.

Этап третий. Старше 17–18 лет:

– около 80 % выпускников средних школ в настоящее время стремятся поступать в вузы для получения высшего технического и гуманитарного

образования (специалисты, бакалавры, магистры, интерны и т.п.). Следует отметить, что далеко не все, из поступивших в вузы, заканчивают их и, поэтому вынуждены, с некоторым опозданием, получать профессиональное образование;

– около 20 % выпускников средних школ, получают профессиональное образование (колледжи, лицеи, училища, обучение на рабочих местах, на курсах и т.п.).

Этап четвертый. После получения профессионального, высшего технического и гуманитарного образования часть граждан (сравнительно небольшая) продолжает обучаться:

– на курсах повышения квалификации осваивая новые профессии;

– в аспирантуре или докторантуре, с тем, чтобы получить степень кандидата или доктора соответствующих наук;

– получая второе и даже третье (дополнительное) высшее техническое или гуманитарное образование.

Этап пятый. После ухода на отдых (когда человек оставляет работу) люди все равно не прекращают учиться, но уже самостоятельно (для себя), используя средства массовой информации (печатные издания, радио, телевидение, интернет и т.п.), при этом, как и в дошкольном возрасте, они не проходят никакой аттестации.

Очевидно, что наибольший интерес, с точки зрения качества образования представляют, второй, третий и четвертый этапы обучения, т.к. их проходят практически все граждане РФ, кроме того, именно на этих этапах формируется уровень общей образованности населения страны, а также получается отдача от полученных знаний в реальных секторах экономики.

Законодателем в области образования в РФ является Министерство образования и науки, оно определяет пути и направления в образовательном процессе, как в средней школе, так и в профессиональном и высшем образовании, поэтому рассмотрим, как руководство министерства выполняет принципы ИСО, обеспечивая качество образования.

Принцип «Ориентация на потребителя». В советское время система образования была жестко ориентирована на удовлетворение потребностей государства в квалифицированной рабочей силе, необходимой промышленному производству и сельскому хозяйству. В дореформенный период потребителем системы образования было государство, которое содержало систему образования и определяло: сколько и каких специалистов потребуется народному хозяйству. Не будем оценивать, насколько это было эффективно, но недостатка в квалифицированных кадрах промышленность не испытывала. Советская система образования считалась лучшей в мире и была принята в ряде стран за основу при реформировании их систем образования (США, Япония, Китай и др.).

В ходе реформ в РФ по переходу к рыночной экономике во главу угла в хозяйственной деятельности поставлена прибыль, при этом «эффективный собственник» не даст и «ломанного гроша», чтобы решать проблемы системы образования, если это не принесет прибыли, и в тоже время «эффективный собственник» с удовольствием совершенно бесплатно получает квалифицированных специалистов.

Образование в основном стало платным (этапы 3 и 4, частично этап 2), но при этом исказилось понятие «потребитель» для системы образования. Действительно: «Кто платит, тот и заказывает музыку» – и фактически потребителем стал студент (назовем так, того, кто оплачивает свое образование), но студент не знает потребности государства в квалифицированных специалистах для промышленности и других отраслей. Студент исходит из своих соображений: стоимость обучения, сумма баллов за ЕГЭ, набор предметов, по которым сдавался ЕГЭ, стоимость проживания в месте учебы и т.п., а это ничего общего не имеет с потребностями науки, промышленности и других отраслей.

Несмотря на то, что президент, правительство и представители промышленности бьют тревогу об острой нехватке инженерно-технических кадров и высококвалифицированных рабочих, система образования продолжает наращивать выпуск специалистов по гуманитарно-социальным, экономическим специальностям, сокращая, при этом выпуск специалистов в области математических и естественно-научных направлений [2].

Система образования в РФ уже много лет подвергается реформированию, но как можно заниматься реформами, если Министерство образования и науки фактически не знает требований настоящих потребителей специалистов, т.е. науки, промышленности и других отраслей.

Принцип «Лидерство руководителя». Стандарты ИСО 9000 отводят ведущую роль в создании качественной продукции и услуг высшему руководству организаций, при этом «гуру» качества считают, что СМК любой организации будет эффективна, тогда и только тогда, когда высшее руководство не на словах, а на деле будет демонстрировать работникам свою приверженность идеям всеобщего обеспечения качества (TQM). В стандарте ГОСТ ISO 9001 есть раздел 5 «Ответственность руководства», в котором установлены требования к высшему руководству, заключающиеся:

– в обеспечении выполнения требований потребителей;

– в разработке Политики и Целей в области качества;

– в проведении регулярных анализов СМК с целью обеспечения ее пригодности и результативности, а также постоянных улучшений;

– во внедрении предложений по улучшению только после всесторонней проверки результативности и эффективности этих предложений [3].

Реформы системы образования ведутся поэтапно, но анализа результативности и эффективности произведенных изменений Министерством об-

разования и науки не было представлено, не было проведено и оценки качества образования после внедрения новшеств. На вопрос: «Зачем мы копируем американскую систему образования?», бывший министр Минобразования Фурсенко ответил: «Мы копируем американскую систему образования, потому что в США самая эффективная экономика!». Во-первых: нельзя однозначно отождествлять образование и экономику, а во-вторых: экономика США далеко не самая эффективная в мире, так доля промышленного производства в ВВП США составляет менее 16 %, тогда как в Китае она более – 35 % [4].

Реформирование системы образования в РФ идет без анализа и оценки его результатов руководством Министерства образования и науки, а это к росту качества образования привести не может.

Принцип «Вовлечение работников». Все «гуру» качества и руководители ведущих мировых фирм, таких как Тойота, Ниссан, Форд моторс, Шевроле и др. считают, что добиться высокого и стабильного качества продукции можно только в том случае, если использовать не только физические возможности персонала фирмы, но и его интеллектуальные ресурсы. Для этого делается все, чтобы вовлечь буквально весь персонал фирмы от генерального директора до вахтера в работу по подаче предложений не только по улучшению качества продукции, но и самой работы на конкретном рабочем месте. Для вовлечения персонала в работы, связанные с повышением качества на фирмах используют различные виды мотивации, как материальной, так и моральной [5].

Для того, чтобы повысить качество образования в вузах РФ нужен высококвалифицированный профессорско-преподавательский состав (ППС) и современная лабораторная база, кроме того ППС должен быть мотивирован на высококачественную работу.

Как же мотивирован ППС? К сожалению, дела с мотивацией обстоят плохо – зарплата выпускников на новом рабочем месте зачастую выше, чем зарплата профессора нашего вуза. Аналогичная ситуация наблюдается и в других городах Челябинской области, в том числе и в Челябинске. Очевидно, что такая мотивация не настраивает ППС на то, чтобы отдавать все свои силы на повышение качества преподавания и увеличение времени индивидуальной работы со студентами, кроме того, многие преподаватели вынуждены работать на других работах, т.к. зарплата за преподавание не позволяет им содержать семью, что также негативно отражается на качестве их работы.

Принцип «Процессный подход». Образование всегда рассматривалось как процесс, причем процесс, растянутый во времени на 11 и более лет. Стандарты ИСО 9000 определяют процесс как «совокупность взаимосвязанных или взаимодействующих видов деятельности, преобразующих входы в выходы».

Рассмотрим, что мы имеем на выходе процесса среднего образования: выпускник средней школы имеет аттестат о среднем образовании и результаты ЕГЭ, при этом предметы для сдачи ЕГЭ он выбрал сам, исходя из того, что легче для него сдать, чтобы получить приличный балл и поступить в вуз. Кроме того, школа заинтересована в том, чтобы показатели по ЕГЭ были как можно выше. Борьба за показатели приводит к тому, что школьников зачастую уже не учат решать задачи по физике или математике, а просто натаскивают на сдачу ЕГЭ.

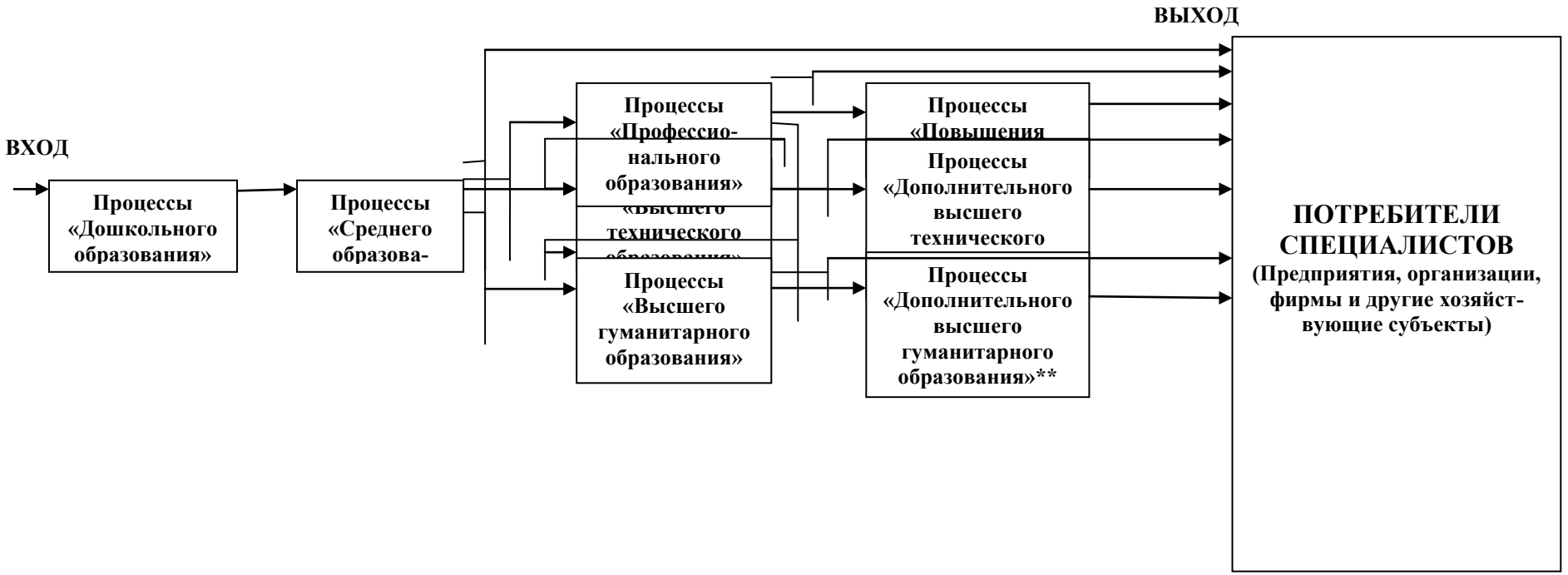
Результат: среди студентов технических ВУЗов уже многие не умеют оперировать с дробями, не могут найти площадь прямоугольного треугольника, часть студентов не умеет даже нормально читать (т.е. буквы они, конечно же, знают и могут их складывать в слова, но смысла прочитанного не улавливают – это, так называемая, функциональная неграмотность), у многих не развита память, они не могут пересказать прочитанное, не умеют грамотно излагать свои мысли и т.п.

Очевидно, что такой выход из процесса среднего образования не может удовлетворить требованиям к входу в процесс профессионального, высшего технического и гуманитарного образования, т.к. этот процесс должен дать студенту новые, более высокие знания, но выпускник средней школы не готов воспринимать эти знания, а преподаватели не имеют возможности в процессе учебы исправлять недочеты средней школы. Аналогичная ситуация складывается и с согласованием других процессов в системе образования РФ.

Принцип «Системный подход к менеджменту». Принципы «Процессный подход» и «Системный подход к менеджменту» взаимосвязаны, т.к. невозможно добиться качественной работы какой либо системы, если не заниматься совершенствованием всей системы в целом. Образование в РФ всеми понимается как система, так ее понимают и те, кто обучается, и те, кто обучает, т.е. преподаватели, и те, кто занимается организацией образования, т.е. Минобразования и руководители образовательных учреждений. Схема взаимодействия основных процессов в системе образования приведена на рис. 1.

Организацией системного подхода к менеджменту образования должно в первую очередь заниматься Минобразования. Реформирование системы образования должно проводиться с учетом системного подхода, а именно, внесение изменений в процессы школьного образования необходимо увязывать с процессами, для которых оно является входом. Аналогично необходимо поступать при изменениях других взаимосвязанных процессов.

На государственном уровне системность проявляется пока только в систематическом снижении федерального финансирования системы образования, так с 2012 г. по 2014 г. федеральное финансирование общего образования уменьшается с 88 до 20 млрд руб., т.е. более чем в 4-е раза [6].



Примечания:

* Имеется ввиду обучение, связанное с повышением разряда, получением 2-ой профессии и т.п.

** Имеется ввиду обучение в магистратуре, аспирантуре, докторантуре, получение 2-го высшего образования и т.п.

Рис. 1. Схема взаимодействия основных процессов системы образования

Принцип «Постоянное улучшение». В соответствии с этим принципом руководство должно рассматривать постоянное улучшение деятельности организации, «как ее неизменную цель», а для этого руководители Минобразования и образовательных учреждений в своей повседневной работе обязаны постоянно использовать все принципы ИСО 9000.

Стандарты ИСО 9000 требуют, чтобы руководство организаций ставило «своей целью повышение удовлетворенности потребителей посредством эффективного применения СМК, включая процессы постоянного ее улучшения, и обеспечение соответствия требованиям потребителей и соответствующим обязательным требованиям».

Очевидно, что выполнить этот принцип применительно к качеству образования невозможно, поскольку настоящего потребителя у образовательного процесса просто нет, а это значит, что совершенно непонятно, как и что нужно улучшать и какие требования удовлетворять.

Принцип «Принятие решений, основанное на фактах». «Эффективные решения должны основываться на анализе данных и информации» – так комментирует этот принцип ГОСТ ISO 9000-2011, действительно, руководители Минобразования и образовательных учреждений должны «определять, собирать и анализировать соответствующие данные для демонстрации пригодности и результативности» системы образования РФ, в т.ч. с точки зрения качества образовательного процесса. Однако руководители образовательных учреждений озабочены не качеством образования, а финансовым состоянием своего учреждения, для чего им необходимо любыми путями сохранять численность «потребителей», т.е. студентов. Комментарии по качеству такого образования, как говориться, излишни.

Интересно было бы узнать, на каких фактах основывалось решение о реформировании системы образования в РФ. Стандарты ИСО 9000 настоятельно рекомендуют, что прежде чем вносить какие-либо изменения, их нужно проанализировать, верифицировать и валидировать соответствующим образом, одобрить до внесения, а также оценить влияние изменений на процессы, взаимосвязанные с изменяемым процессом. Ничего подобного при реформировании системы образования к сожалению не происходит. В результате, как считает академик Версан: «снижается качество подготовки специалистов, не созданы условия для эффективной работы ученых, нет продуманной системы подготовки и продвижения по службе чиновников. Зато сегодня появились тысячи менеджеров, да таких, что им все равно, чем управлять. Они знают информатику и моделирование, но не знают главного – процессов создания материальных ценностей, элементарных правил организации производства» [7].

Принцип «Взаимовыгодные отношения с поставщиками». Поставщиками в процессы «Высшего технического образования», «Профессионального образования» и «Высшего гуманитарного образования» являются

процессы школьного образования. Именно в школе закладываются те знания, на которых базируются новые знания, связанные с будущей профессией, при этом преподаватели ожидают, что их знания будут прибавляться (суммироваться) к знаниям, полученным в школе. Общение же с выпускниками средней школы, поступившими в университет в последние годы, показывает, что уровень их образованности резко падает, а это значит, что процессы школьного образования как поставщики учащихся в процессы «Высшего технического образования», «Профессионального образования» и «Высшего гуманитарного образования» свою задачу не выполняют, а знания, полученные в школе, не могут стать базой для новых знаний.

Государство в лице руководителей Минобразования какое–либо регулирование в сфере образования проводить не хочет, считая, что рынок сам все отрегулирует. К сожалению, уже давно все убедились, что дикий рынок без вмешательства государства ничего сам отрегулировать не может.

В этих условиях построить взаимовыгодные отношения между поставщиками, которыми являются образовательные учреждения, и фактическими потребителями, т.е. наукой, промышленностью и другими отраслями, невозможно.

Таким образом, Минобразования в своей работе по реформированию системы образования РФ не использует международный опыт по созданию высококачественных систем, а именно, рекомендации, заложенные в принципах международных стандартов ИСО 9000, а это означает, что ожидать повышения качества образования после окончания текущего реформирования системы образования РФ не приходится.

Библиографический список

1. ГОСТ ISO 9000–2011. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. – М.: Стандартинформ, 2012. – 43 с.

2. Кара-Мурза, С.Г. Куда идет Россия. Белая книга реформ / С.Г. Кара-Мурза, С.А. Батчиков, С.Ю. Глазьев. – М.: Алгоритм, 2008. – 448 с.

3. ГОСТ ISO 9001–2011. Системы менеджмента качества. Требования. – М.: Стандартинформ, 2012. – 61 с.

4. Левинсон, У. Бережливое производство: синергетический подход к сокращению потерь / У. Левинсон, Р. Рерик. – М.: Стандарты и качество, 2007. – 272 с.

5. Имаи, М. Кайдзен: ключ к успеху японских компаний / М. Имаи. – М.: Альпина Бизнес Букс: Приоритет, 2007. – 273 с.

6. Воронин, Г. Слово главного редактора / Г. Воронин // Стандарты и качество. – 2013. – № 7. – С. 3.

7. Версан, В. Качество – стратегический путь возрождения России / В. Версан // Стандарты и качество. – 2013. – № 8. – С. 63–66.

К содержанию

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068: 519.8

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА СХЕМНО-КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА

В.Г. Зезин, М.И. Решетников

Предложен метод многокритериального выбора наилучшего варианта конструктивно-схемного исполнения вспомогательных систем ракетного комплекса, основанный на нечетком логическом выводе, позволяющем адекватно учитывать неопределенности, присущие процессу разработки, оперировать гетерогенной информацией (качественного и количественного характера) о проектируемых системах.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, нечеткая логика, нечеткопродукционная система, лингвистическая переменная.

Вспомогательные системы ракетно-космической техники, которым относятся системы наддува, заправки, системы инициирования пиросредств, отделения и т.д. выполняют важную роль при эксплуатации и функционировании ракетного комплекса (РК). От совершенства их конструктивно-схемного исполнения в значительной степени зависят не только успешное выполнение программы запуска и полета и эксплуатационные характеристики, но зачастую, и энергомассовое совершенство РК в целом. Задача выбора наилучшего варианта исполнения вспомогательных систем остается актуальной на всех этапах создания РК от начальной стадии проектирования до разработки рабочей документации, так как разработка ракетного комплекса – процесс динамический, в течение которого происходит постоянное согласование параметров отдельных систем, уточнение предъявляемых к ним требований. Этот фактор обуславливает и значительную долю неопределенности постановки задачи выбора наилучшего варианта, так как критерии выбора систем и ограничения на целевую функцию на каждой конкретной стадии разработки могут быть сформулированы только с некоторой степенью нечеткости. Кроме того, существует нечеткость исходной информации, обусловленная физическим содержанием критериев выбора: если такие показатели качества, как масса или надежность могут быть оценены количественно с достаточной степенью объективности, то этого нельзя сказать, например, о безопасности, оценка которой производится экспертно. При этом альтернативные варианты должны сравниваться по целому комплексу зачастую противоречивых критериев и ограничений. Как видим, задача выбора наилучшего варианта исполнения вспомогательной системы РК представляет собой задачу многокритериального анализа альтернатив в условиях нечеткой информации.

Таким образом, имеем множество $\boldsymbol{S} = \{s_1, s_2, ...s_k\}$ альтернативных вариантов исполнения систем РК. Традиционными методами выполнения проектно-конструкторских проработок для каждой системы s_i может быть получена оценка ее соответствия частным критериям c_i и ограничениям g_i, имеющим качественное либо количественное выражение, то есть могут быть заданы множества $\boldsymbol{C} = \{c_1, c_2, ..., c_m\}$ и $\boldsymbol{G} = \{g_1, g_2, ..., g_n\}$. В соответствии с системным подходом к разработке, необходимо для каждой альтернативы сформировать единый интегральный показатель качества w, то есть задать отображение:

$$f : \boldsymbol{C}_1 \times \boldsymbol{C}_2 \times ... \times \boldsymbol{C}_m \times \boldsymbol{G}_1 \times \boldsymbol{G}_2 \times ... \times \boldsymbol{G}_n \to \boldsymbol{W} = \{w_1, w_2, ..., w_k\}. \quad (1)$$

Разрабатываемый метод принятия решений «погружен» в нечеткую среду, находящуюся под воздействием флуктуаций внешних факторов. Следовательно, решать рассматриваемую задачу необходимо с использованием нечетких моделей, несомненным достоинством которых является возможность параллельного оперирования гетерогенной информацией, представленной в виде сложных качественных лингвистических описаний и количественных данных [1, 2, 3]. При нечетко-множественном подходе оценки соответствия систем критериям и ограничениям представляют собой нечеткие множества $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$ и $\tilde{\boldsymbol{G}}_i$, $i = \overline{1,k}$. Сформировав нечеткое множество решений $\tilde{\boldsymbol{W}} = \{w_i, \mu_W(w_i)\}, i = \overline{1,k}$, мы найдем наилучший вариант, как элемент этого множества с наибольшей степенью принадлежности $\mu_W(w_i)$.

Рассмотрим возможные методы решения интересующей нас задачи. На начальном этапа разработки РК, когда формируется облик ракеты, доступны только очень грубые оценки характеристик систем, которые чаще всего формулируются в виде экспертных высказываний типа «система s_1 Θ лучше/хуже системы s_2 по параметру p», где Θ – модификатор, имеющий смысл «значительно», «существенно» и т. п. Здесь под нечеткой переменной p понимаются частные критерии качества и проектные ограничения, то есть элементы множеств $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$ и $\tilde{\boldsymbol{G}}_i$. Согласно принципу нечеткого обобщения [2, 3] отображение (1) и совокупность нечетких множеств $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$ и $\tilde{\boldsymbol{G}}_i$. однозначно порождают нечеткое отображение $\tilde{\boldsymbol{F}}_i : \boldsymbol{C}_1 \times \boldsymbol{C}_2 \times ... \times \boldsymbol{C}_m \times \boldsymbol{G}_1 \times \boldsymbol{G}_2 \times ... \times \boldsymbol{G}_n \to \boldsymbol{W}$ с функцией принадлежности, определяемой формулой

$$\mu_W(w) = \min_{\substack{i=1,m \\ j=1,n}} \left[\mu_{C_i}(c_i), \mu_{G_j}(g_j) \right]. \quad (2)$$

Согласно правил алгебры нечетких множеств выражение (2) соответствует операции пересечения нечетких множеств критериев $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$ и ограничений $\tilde{\boldsymbol{G}}_i$. Физически это означает, что разрабатываемые системы должны соответствовать всем критериям и ограничениям одновременно, а нечеткое решение есть:

$$\tilde{\boldsymbol{W}} = \tilde{\boldsymbol{C}}_1 \times \tilde{\boldsymbol{C}}_2 \times ... \times \tilde{\boldsymbol{C}}_m \times \tilde{\boldsymbol{G}}_1 \times \tilde{\boldsymbol{G}}_2 \times ... \times \tilde{\boldsymbol{G}}_n .$$

Такой метод нечеткого логического вывода предложен Р. Беллманом и Л. Заде в работе [4] и получил широкое распространение в системном анализе. Таким образом, если удастся найти степени принадлежности, входящие в (2), то наилучшая система s_p, найдется как:

$$s_p : \mu_W \left(w_p \right) = \max_{i=1,k} \mu_W \left(w_i \right).$$

Для определения степеней принадлежности $\mu_{C_i} \left(c_i \right)$ и $\mu_{G_j} \left(g_j \right)$, с учетом сделанного выше замечания относительно формы выражения оценок качества систем, удобно применить метод парных сравнений [5]. Для этого экспертно определяется уровень преимущества a_{ij} системы s_i над системой s_j с использованием 9 бальной шкалы Саати [6], табл. 1.

Таблица 1

Уровень преимущества s_i над s_j	a_{ij}	Уровень преимущества s_i над s_j	a_{ij}
Отсутствует	1	Почти явное	6
Почти слабое	2	Явное	7
Слабое	3	Почти абсолютное	8
Почти существенное	4	Абсолютное	9
Существенное	5		

Так как по своему смыслу $a_{ij} = \mu_C \left(c_i \right) / \mu_C \left(c_j \right), i = \overline{1,k}, j = \overline{1,k}$, то коэффициенты a_{ij} удовлетворяют системе уравнений:

$$\sum_{j=1}^{k} a_{ij} \mu_C \left(c_j \right) = k \mu_C \left(c_i \right), \; i = \overline{1,k} . \qquad (3)$$

С другой стороны система (3) есть задача на собственные значения и собственные векторы матрицы $\mathbf{A} = \left[a_{ij} \right], i = \overline{1,k}, \; j = \overline{1,k}$. Таким образом, если в результате попарных сравнений построена матрица **A**, то степени принадлежности могут быть определены как компоненты собственного вектора этой матрицы, соответствующего ее максимальному собственному значению. При этом дополнительно используется условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^{k} \mu_C \left(c_i \right) = 1.$$

Для учета того, что различные частные критерии и ограничения могут иметь неодинаковую важность при принятии решения, в соответствии с подходам предложенном в [7], используется операция концентрирования нечетких множеств. И тогда вместо формулы (2) применяется выражение:

$$\mu_W(w) = \min_{\substack{i=1,m \\ j=1,n}} \left[\mu_{C_i}^{\alpha_i}(c_i), \mu_{G_j}^{\beta_j}(g_j) \right],$$

где для определения показателей степени α_i и β_j также может использоваться метод парных сравнений.

Изложенный метод многокритериального анализа алгоритмически прост, не требует большой вычислительной работы, поэтому был реализован в среде VBA в виде надстройки к MS Excel. Это дает возможность в полной мере использовать интерфейс Excel при работе с табличными данными и графическим материалом, оперативно проводить оценки различных вариантов, исследовать влияние точности экспертных оценок на робастность итогового решения и пр. Фрагменты интерфейса программы показаны на рис. 1.

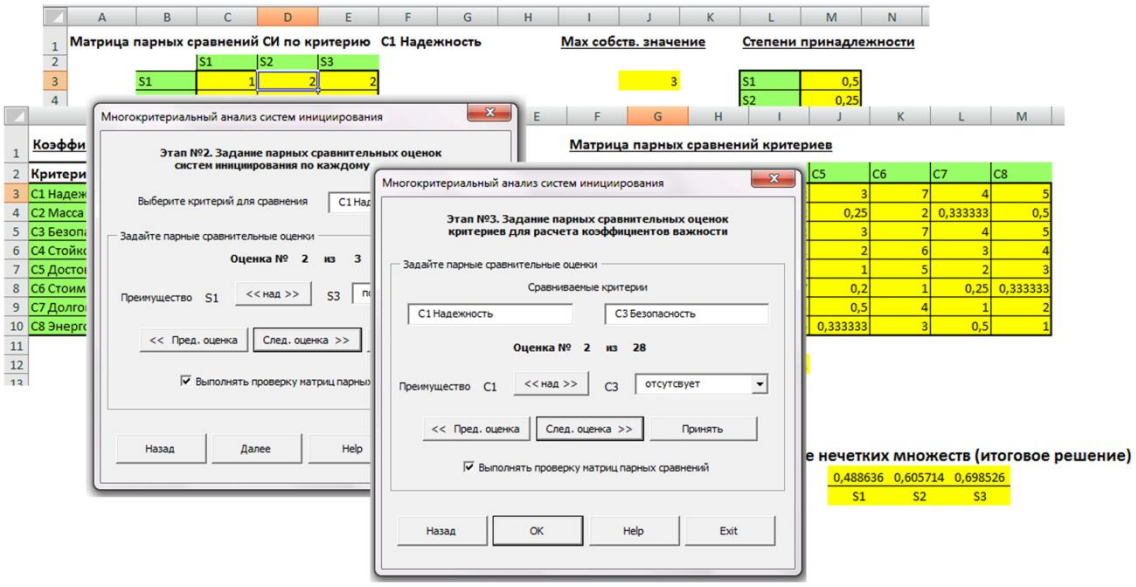


Рис. 1. Фрагменты интерфейса программы многокритериального анализа с использованием принципа Беллмана-Заде

На более поздних этапах разработки, когда выполнены детальные проработки, такие характеристики систем, как масса, габариты, надежность и т.п. имеют уже в достаточной степени достоверную количественную оценку, что необходимо учитывать в алгоритме выбора наилучшего варианта. Для этого целесообразно использовать продукционные нечеткие системы [3, 8, 9]. В данном методе входные c_i, g_i и выходная w величины описываются лингвистическими переменными, связь между которыми устанавливается системой логических правил. Нечеткие правила близки к логическим моделям и адекватно отражают знания эксперта в данной проблемной области. Сам процесс нечеткого вывода представляет собой алгоритм определения степени истинности нечетких заключений правил на основе известной

степени истинности нечетких условий. В настоящее время разработано несколько десятков алгоритмов нечеткого вывода [3, 8, 9], которые используются для решения различных типов задач. Большинство из них используют прямой метод вывода, основанный на правиле нечеткий модус поненс. Для нашей задачи принятия решения наиболее удобен алгоритм Мамдани, в котором система правил, устанавливающая взаимосвязь между множеством $\boldsymbol{V} = \{\beta_1, \beta_2, ..., \beta_n\}$ входных лингвистических переменных (оценок соответствия систем частным критериям c_i и ограничениям g_i) и выходной лингвистической переменной (обобщенным показателем качества систем) w записывается в виде

$$\begin{aligned}
&\text{IF}\left(\beta_1 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{1 j_1}\right) \text{AND}\left(\beta_2 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{2 j_1}\right) \text{AND...AND}\left(\beta_n = \tilde{\boldsymbol{B}}_{n j_1}\right)\\
&\text{OR}\left(\beta_1 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{1 j_2}\right)\text{AND}\left(\beta_2 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{2 j_2}\right) \text{AND...AND}\left(\beta_n = \tilde{\boldsymbol{B}}_{n j_2}\right)\\
&...\\
&\text{OR}\left(\beta_1 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{1 j_{k_j}}\right)\text{AND}\left(\beta_2 = \tilde{\boldsymbol{B}}_{2 j_{k_j}}\right) \text{AND...AND}\left(\beta_n = \tilde{\boldsymbol{B}}_{n j_{k_j}}\right)\\
&\text{THEN } w = \tilde{\boldsymbol{D}}_j, \quad \left(F = s_j\right), \quad i = \overline{1,n}, \quad j = \overline{1,m},
\end{aligned} \tag{4}$$

где $\tilde{\boldsymbol{B}}_{i j_p}$ – лингвистический терм, которым оценивается переменная β_i в строке с номером j_p $\left(p = \overline{1,k_j}\right)$; k_j количество строк-конъюнкций; $\tilde{\boldsymbol{D}}_j$ – лингвистический терм, которым оценивается выходная переменная w в j-ом правиле; F – коэффициент достоверности правила (вес), величина которого для j-го правила равна s_j; n – количество входных переменных; m – количество термов, используемых для лингвистической оценки выходной переменной w.

Все лингвистические термы в (4) представляют собой нечеткие множества с соответствующими функциями принадлежности на универсумах входных $\boldsymbol{X}_i$ и выходной $\boldsymbol{Y}$ переменных: $\mu_{B_{i j_p}}(x_i): \boldsymbol{X}_i \to [0,1]$, $x_i \in \boldsymbol{X}_i$ и $\mu_{D_j}(y): \boldsymbol{Y} \to [0,1]$, $y \in \boldsymbol{Y}$.

Алгоритм вывода включает следующие этапы [3, 9].

1. Фаззификация входных переменных. Так как оценки соответствия систем критериям и ограничениям имеют вид конкретных не нечетких величин $\beta_i = a_i$ $(a_i \in \boldsymbol{X}_i)$, то должна быть проведена их фаззификация (приведение к нечеткости). Для этого для каждой входной переменной с использованием функций принадлежности находится степень принадлежности $b_{i j_p}$ значения a_i переменной β_i соответствующему нечеткому терму $\tilde{\boldsymbol{B}}_{i j_p}$. Эти значения функций принадлежности:

$$b_{i\,j_p} = \mu_{B_{i\,j_p}}(a_i), \quad i = \overline{1,n} \tag{5}$$

являются результатом фаззификации подусловий $\beta_i = \tilde{\boldsymbol{B}}_{i\,j_p}$ и принимаются за степень их истинности.

2. Агрегирование представляет собой процедуру определения степени истинности условий d_j по каждому из правил системы нечеткого вывода по известной степени истинности соответствующих подусловий. При этом для определения результата нечеткой конъюнкции обычно используется операция min, а для определения результата нечеткой дизъюнкции – операция max или операция граничной суммы:

$$d_j = \max_{p=1,k_j}\left[\min_{i=1,n}\left(b_{i\,j_p}\right)\right], \quad j = \overline{1,m} \text{ или } d_j = \min\left\{\sum_{p=1}^{k_j}\left[\min_{i=1,n}\left(b_{i\,j_p}\right)\right],1\right\}, \quad j = \overline{1,m}.$$

3. Активизация представляет собой процедуру нахождения степени истинности каждого из заключений правил нечетких продукций. Для рассматриваемого формата правил она равна произведению степени истинности условия d_j на весовой коэффициент правила s_j. После чего находится функция принадлежности заключения в j-ом правиле, то есть усеченная функция принадлежности терма $\tilde{\boldsymbol{D}}_j$:

$$\mu^*_{D_j}(y) = \mathrm{imp}\left(c_i s_i, \mu_{D_j}(y)\right) = \min_{y \in \boldsymbol{Y}}\left(c_i s_i, \mu_{D_j}(y)\right), \tag{6}$$

где imp – нечеткая импликация, которая в алгоритме Мамдани реализуется операцией минимума.

4. На этапе аккумуляции происходит объединение нечетких множеств, определяемых функциями принадлежности (6), что дает функцию принадлежности выходной лингвистической переменной. В качестве операции объединения чаще всего используют операцию максимума:

$$\mu_W(y) = \max_{j=1,m}\left[\mu^*_{D_j}(y)\right]. \tag{7}$$

5. Дефаззификация позволяет, имея функцию принадлежности (7), получить конкретное не нечеткое значение выходной переменной w, соответствующей вектору значений входных переменных $\{a_1, a_2, \ldots a_n\}$. Для этого наиболее часто применяют метод центра тяжести:

$$w = \frac{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} y\mu_W(y)\,\mathrm{d}y}{\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_W(y)\,\mathrm{d}y},$$

где $y_{\min}$, $y_{\max}$ – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества w.

Выполнив по описанному алгоритму расчеты выходной характеристики для каждой системы из множества ***S***, найдем наилучшую альтернативу, как систему с наибольшей величиной показателя качества *w*.

Для практической реализации системы нечетких продукций могут использоваться программные комплексы, имеющиеся в настоящее время на рынке программных продуктов, например, расширение Fuzzy Logic Toolbox системы MATLAB или программная среда fuzzyTECH. Со своей стороны можем отметить положительный опыт применения последнего продукта, который позволяет формировать иерархические структуры базы правил и тем самым разрабатывать нечеткие модели большой размерности. В качестве примера можно привести результаты сравнительного многокритериального анализа трех типов систем инициирования пиросредств: низковольтной s_1, высоковольтной s_2 и лазерной s_3 [10]. Анализ проводился по 20 частным критериям. Результаты расчетов итогового показателя качества систем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Система инициирования пиросредств	s_1	s_2	s_3
Итоговый показатель качества *w*, %	50,9	45,3	96

На рис. 2 показана поверхность нечеткого вывода для входных переменных «Надежность» и «Безопасность при эксплуатации», оказывающих наибольшее влияние на итоговый показатель качества систем.

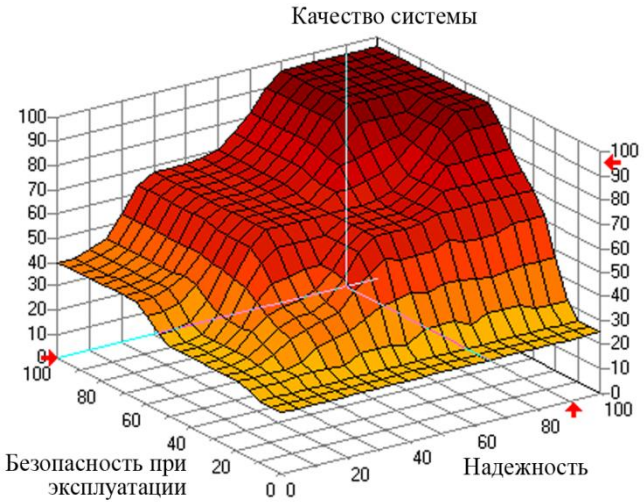


Рис. 2. Поверхность нечеткого вывода
для доминирующих входных переменных

Таким образом, на основе теоретических положений нечеткого логического вывода разработаны два типа методик многокритериального сравнительного анализа и принятия решения по выбору наилучшего варианта ис-

полнения вспомогательных систем ракетного комплекса. На начальном этапе проектирования предложено использовать принцип Беллмана-Заде в сочетании с методом иерархий Саати, а на более поздних стадиях разработки РК – нечетко-продукционные системы. Изложенный подход к выбору проектно-конструкторских решений в настоящее время находит применение в Государственном ракетном центре им. академика В.П. Макеева.

Библиографический список

1. Кофман, А. Введение в теорию нечетких множеств / А. Кофман; пер. с франц. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.

2. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде; пер с англ. – М.: Мир, 1966. – 163 с.

3. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fussyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.

4. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде / Вопросы анализа и процедура принятия решений: сб. переводов. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.

5. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей : Примеры использования / А.Н Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига.: Знание, 1990. – 184 с.

6. Саати, Т. Математические модели конфликтных ситуаций / Т. Саати; пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1977. – 304 с.

7. Yager P. Multiple objective decision-making using fussy sets // Int. J. Man-Mach. Sfud., 1979. Vol. 9. № 4. Pp. 375–382 с.

8. Ахрем, А.А. Нечеткий логический вывод в системе принятия решений / А.А. Ахрем, М.Р. Ашинянц. С.А. Петров // Труды ИСА РАН. – 2007. – Т. 29. – С. 265–275.

9. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.

10. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пиросредств ракетного комплекса: отчет о НИР / ЮУрГУ; рук. В.Г. Зезин, исполн. В.Г. Зезин, М.И. Решетников. – Миасс, 2014. – 141 с. – Инв. № 171249-ГиТ/02.

К содержанию

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068: 519.8

СИСТЕМА ПРАВИЛ НЕЧЕТКИХ ПРОДУКЦИЙ ДЛЯ ВЫБОРА ТИПА СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПИРОСРЕДСТВ РАКЕТЫ

В.Г. Зезин, М.И. Решетников

В работе рассматривается система правил нечетких продукций применительно к задаче выбора системы инициирования пиросредств ракеты на этапе детальных проектно-конструкторских разработок.

Ключевые слова: продукционная нечеткая система, система инициирования пиросредств, многокритериальный анализ.

Выбор наилучшего варианта конструктивно-схемного исполнения системы инициирования (СИ) пиросредств ракеты является нетривиальной задачей, так как при этом приходится оперировать гетерогенной информацией, когда часть параметров систем имеют в достаточной степени надежно определяемую численную оценку, например, масса, надежность, а часть – оцениваются только экспертно, например, безопасность. Кроме того, выбор этот приходится делать в условиях значительной степени неопределенности оценок по частным критериям качества систем.

Эффективным алгоритмом принятия решений в подобных условиях являются нечетко-продукционные системы [9, 3, 0]. В данном методе входные и выходные величины представляются лингвистическими переменными, связь между которыми устанавливается согласованным множеством логических правил вида

$$(i): \mathsf{A} \Rightarrow \mathsf{B}, F, \ i = \overline{1, N}, \tag{8}$$

где i – порядковый номер правила; A и B – условие и заключение правила, представляющие собой элементарные нечеткие высказывания относительно входных и выходных переменных (то есть подусловия и подзаключения соответственно), соединенные логическими связками конъюнкции и дизъюнкции; $\Rightarrow$ – знак логического следования (импликации); F – коэффициент определенности (вес) правила, N – общее количество правил в базе знаний.

При этом каждое элементарное нечеткое высказывание интерпретируется как нечеткое множество. Сам процесс нечеткого вывода представляет собой алгоритм определения степени истинности нечетких заключений на основе известной степени истинности нечетких условий и включает следующие этапы [9, 3, 0]:

1. Фаззификация – определение степени истинности $b_{j\,i}$ каждого подусловия в каждом из правил путем применения функций принадлежности входных переменных β_j к их фактическим значениям a_j.

$$b_{ji} = \mu_{B_{ji}}\left(a_j\right), \quad j = \overline{1,n}, \; i = \overline{1,N}, \tag{9}$$

где n – общее количество входных переменных; $\mu_{B_{ji}}\left(x\right)$ – функция принадлежности терма $\tilde{\boldsymbol{B}}_{ji}$, которым оценивается j-я входная переменная в i-ом правиле.

2. Агрегирование – определение степени истинности c_i условия каждого правила в целом по степени истинности подусловий. При этом конъюнкция может быть реализована операцией минимума, а дизъюнкция – граничной суммы, что позволит не «терять» влияния малозначимых факторов на результат нечеткого вывода:

$$c_i = \min\left[\sum_{p=1}^{k_i}\left(s_i \min_{j=1,n} b_{j i_p}\right), 1\right], \quad j = \overline{1,n}, \; i = \overline{1,N}, \tag{10}$$

где k_i –количество строк дизъюнкции в i-ом правиле; s_i – вес правила.

3. Активизация – определение степени истинности заключений каждого правила правил путем композиции между определенным на предыдущем этапе агрегированным значением степеней истинности условий c_i и соответствующей функцией принадлежности заключения, реализуемой чаще всего операцией минимума:

$$\mu^*_{D_i}\left(y\right) = \min_{y \in \boldsymbol{Y}}\left(c_i, \mu_{D_i}\left(y\right)\right), \tag{11}$$

где $\boldsymbol{Y}$ – универсум выходной переменной; $\mu_{D_i}\left(x\right)$ – функция принадлежности терма $\tilde{\boldsymbol{D}}_i$, которым оценивается выходная переменная в i-ом правиле.

4. Аккумулирование – определение функции принадлежности выходной лингвистической переменной с учетом всех правил, для чего может быть применена операция максимума:

$$\mu_\omega\left(y\right) = \max_{\substack{y \in \boldsymbol{Y} \\ i=\overline{1,N}}}\left[\mu^*_{D_i}\left(y\right)\right]. \tag{12}$$

5. Дефаззификация – определение четкого значения, которым оценивается выходная переменная, например, методом центра тяжести:

$$w = \frac{\int\limits_{y_{\min}}^{y_{\max}} y\mu_\omega\left(y\right)\mathrm{d}\,y}{\int\limits_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_\omega\left(y\right)\mathrm{d}\,y}, \tag{13}$$

где $y_{\min}$, $y_{\max}$ – левая и правая точки интервала носителя нечеткого множества ω соответственно.

Рассмотрим формирование базы правил, являющейся ключевым элементом системы нечеткого логического вывода.

В качестве входных лингвистических переменных нашей задачи примем следующие характеристики СИ, определяющие их показатели качества: баллистическую эффективность, стоимость, энергопотребление, надежность, гарантийный срок эксплуатации, срок службы, безопасность, диагностируемость, стойкость к внешним воздействиям. Последние три переменных оцениваются экспертно и являются комплексными параметрами, итоговая оценка которых складывается из «элементарных» оценок либо соответствующих качеств составляющих СИ, либо оценок рассматриваемых свойств системы инициирования при различных внешних условиях. Заметим, что с большей степенью достоверности могут быть сформированы экспертные оценки именно для элементарных качественных параметров СИ. Поэтому в перечень входных переменных должны включаться лингвистические переменные, соответствующие не комплексным, а «элементарным» качественным характеристикам систем. Окончательный перечень входных лингвистических переменных задачи, учитывающий данное замечание, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Входные лингвистические переменные

Наименование переменной	Идентификатор
Баллистическая эффективность СИ	LostBallisic
Надежность СИ	Reliability
Стоимость разработки СИ	Cost
Энергопотребление СИ	PowerConsumption
Гарантийный срок эксплуатации СИ	DurabilityCommon
Срок службы СИ	DurabilityQuar
Диагностируемость линий связи СИ	Lines
Диагностируемость пироузлов СИ	PiroNode
Диагностируемость блока команд СИ	CommandBlock
Стойкость СИ к внешним механическим воздействиям	ResistMechanics
Стойкость СИ к внешним электромагнитным воздействиям	ResistElectric
Стойкость СИ к другим внешним воздействиям	ResisOther
Стойкость СИ к внешним температурным воздействиям	ResistTemperatur
Стойкость СИ к внешним вибрационным воздействиям	ResistVibrations
Стойкость СИ к воздействию внешнего давления	ResistPressure
Безопасность СИ при изготовлении ракеты	SafeProduction
Безопасность СИ при транспортировке ракеты	SafeTransport
Безопасность СИ при эксплуатации ракеты	SafeExploitation
Безопасность СИ при пожаре	SafeFire
Безопасность СИ при нештатных воздействиях	SafeOtherNoNorm

В качестве выходной лингвистической переменной ω примем «Качество СИ» («SystemQuality») – обобщенный показатель качества системы инициирования, с универсумом $\boldsymbol{Y} = \{ y | \, 0\,\% \le y \le 100\,\% \}$. Кроме того предусмотрим в нашей задаче формирование дополнительных выходных лингвистических переменных «DiagnozabilityWhole», «SafetyWhole» и «ResistanceWhole» с таким же универсумом. Это позволит конструктору ракеты дополнительно проанализировать, каким образом сказывается изменение входных переменных на таких важных характеристиках, как диагностируемость, безопасность и стойкость СИ в целом.

Для практического моделирования каждую из входных и выходных лингвистических переменных достаточно задавать пятью термами: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая».

В соответствии с приведенным составом переменных, разрабатываемая нечеткая модель системы инициирования будет состоять из четырех независимых нечетких продукционных систем на вход которых поступает множество значений входных лингвистических переменных, а на выходе формируется одна выходная лингвистическая переменная (основная или дополнительные). То есть база правил будет иметь MISO структуру [9]:

$$\bigcap_{j=1}^{n} \left(\beta_j = \tilde{\boldsymbol{B}}_{ji} \right) \Rightarrow \omega_k = \tilde{\boldsymbol{D}}_{ik}, \; F = s_i, \; i = \overline{1,N}, \; k = \overline{1,4}. \qquad (14)$$

где $\tilde{\boldsymbol{D}}_{jk}$ – лингвистический терм, которым оценивается выходная переменная ω_k в *i*-ом правиле.

База правил должна обладать полнотой и непротиворечивостью [9]. Первое требование означает, что в общем случае полная база должна содержать все возможные комбинации функций принадлежности всех входных переменных и общее количество правил определится по формуле:

$$N = \sum_{i=1}^{n} K_i \,, \qquad (15)$$

где K_i – количество термов, которыми оценивается *i*-я переменная.

Следовательно полная база для нашей задачи должна состоять из $5^{20} + 5^3 + 5^5 + 5^6 \approx 9{,}53 \cdot 10^{13}$ правил, что делает практически неразрешимой задачу ее разработки. Уменьшить объем базы правил можно либо путем введения нечетких переменных с многомерными функциями принадлежности, что для нашей задачи сделать весьма затруднительно, либо сформировать иерархическую структуру базы правил [9]. В последнем случае производится декомпозиция общей нечеткой модели на модели с меньшим числом входных переменных с последующим их объединением в общую модель. При этом выход одной базы правил в такой структурированной модели является входом в другую.

Наш опыт разработки нечетких моделей СИ [10] показывает, что исходя из упрощения экспертной работы в процессе формирования базы знаний, при декомпозиции нечеткой модели следует придерживаться следующих правил.

1. Объединять в блоки целесообразно переменные, во-первых, оказывающие либо приблизительно одинаковое влияние на выходную переменную, либо существенно различающиеся по степени влияния, во-вторых – имеющих одинаковую физическую природу.

2. Входные переменные, оказывающие существенное и, в особенности, доминирующее влияние на выходную переменную следует включать в блоки правил высокого уровня, то есть ближе к выходу нечеткой модели, что позволит повысить ее чувствительность.

Непротиворечивость базы правил в нашем случае обеспечивается разрабатывающим ее экспертом.

Для практической реализации рассматриваемой нечеткой модели выбрана программная среда fuzzyTECH [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Это специализированное средство, предназначенное для и исследования разнообразных нечетких моделей, которое допускает как работу с несколькими выходными лингвистическими переменными, так и декомпозицию базы правил на отдельные блоки с формированием на выходе каждого из них промежуточной лингвистической переменной и последующим объединением блоков в иерархическую структуру.

Структура базы правил, разработанная с использованием указанного программного комплекса, приведена на рис. 1.

Разработанная модель включает 20 описанных выше входных лингвистических переменных, 15 блоков правил, на выходе 11 из которых формируются промежуточные лингвистические переменные, имеющие по 5 термов с функциями принадлежности типа fuzzy. Общее количество правил нечетких продукций в базе знаний составляет 1312.

При формировании структуры нечеткой модели входные лингвистические переменные, которые оказывают приблизительно одинаковое влияние на качество СИ, предварительно агрегировались с формированием промежуточных лингвистических переменных. Так, например, блок правил RBDiagnozability(Lines, CommandBlock, PiroNode) агрегирует входные лингвистические переменные «Lines», «CommandBlock» и «PiroNode» и формирует на выходе промежуточную лингвистическую переменную «Diagnozability», характеризующую диагностируемость СИ в целом. Аналогично сформированы блоки правил RBDurabolity(DurabilityCommon, DurabilityQuar), RBResistace1(ResistElectric, ResistOther, ResistVibration), RBResistace2(ResistMechanics, ResistPressure, ResistTemperature), RBSafety1(SafeFire, SafeOtherNoNorm, SafeProdaction), RBSafety2(SafeExplotation, SafeTransport), RBConstructive(Cost, PowerConsumption), RBExploitation(Diagnozability, Durability, Resistance, Safety1), см. рис. 1.

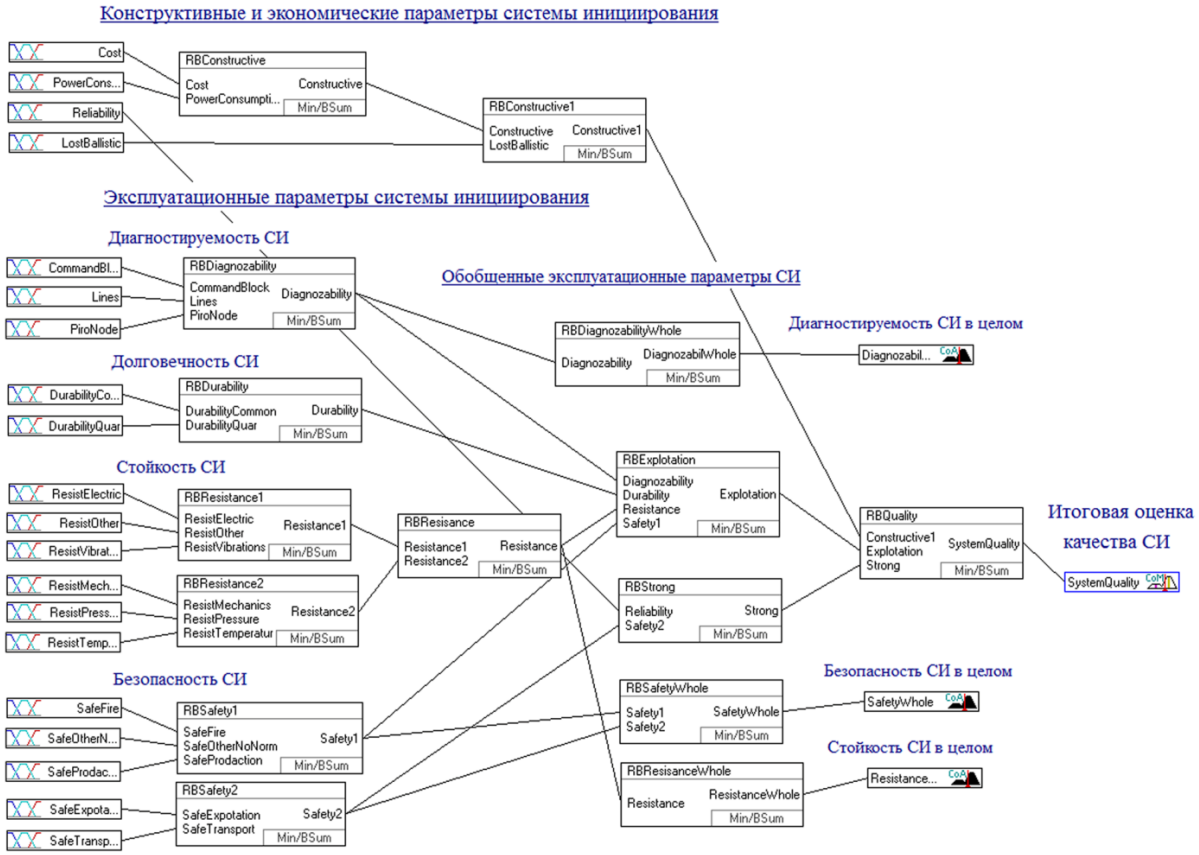


Рис. 1. Структурная схема базы правил

Также в отдельных блоках правил агрегировались переменные существенно различающиеся по степени влияния на выходную переменную. Это блоки RBConstructive1(Constractive, LostBallistic), RBResistace(Resistace1, Resistace2). Кроме того, в отдельном блоке правил RBStrong(Reliability, Safety2) агрегированы переменные, оказывающие доминирующее влияние на выходную переменную.

В блоке RBQuality(Constructive1, Exploitation, Strong) формируется основная выходная лингвистическая переменная SystemQuality. Назначение блоков правил RBDiagnozabilityWhole, RBSafetyWhole, RBResistanceWhole – превратить промежуточные переменные «Diagnozability», «Safety», «Resistance» без изменения по величине в дополнительные выходные переменные «DiagnozabilityWhole», «SafetyWhole» и «ResistanceyWhole» соответственно.

На рис. 2 показан пример поверхности нечеткого вывода для основной выходной переменной и доминирующих, а также существенных входных переменных, полученной при практическом моделировании.

В целом проведенные расчеты показали, что степень изменения выходной переменных «Качество СИ» «Диагностируемость СИ в целом», «Безопасность СИ в целом» и» «Стойкость СИ в целом» при варьировании

входных переменных соответствует ожидаемым величинам. Это свидетельствует об адекватности разработанной базы нечетких продукционных правил. Косвенным свидетельством адекватности является также отсутствие резких скачков и разрывов на графиках поверхностей нечеткого вывода, см. рис. 2.

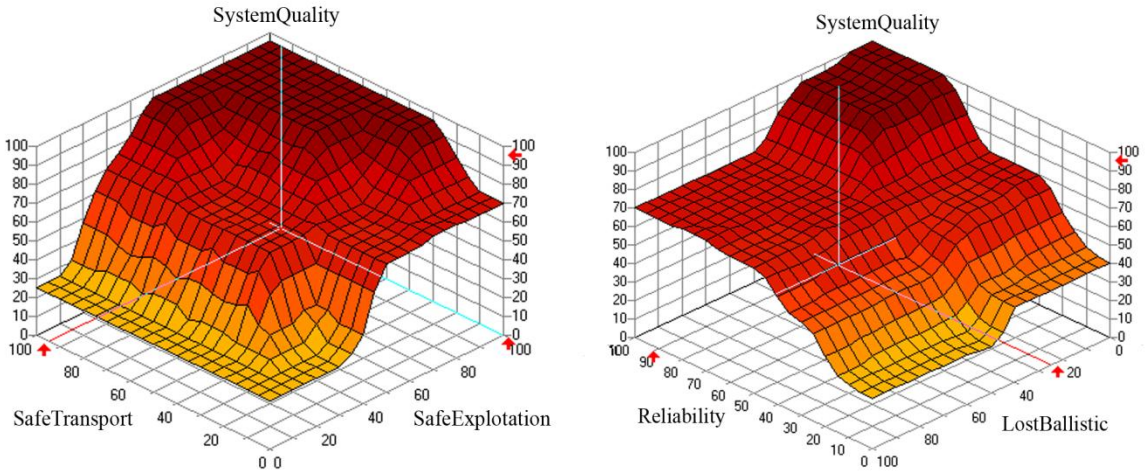


Рис. 2. Поверхности нечеткого вывода для выходной переменной «Качество СИ» и входных переменных: «Безопасность при эксплуатации», «Безопасность при транспортировке», «Надежность», «Потеря баллистической эффективности»

В общем случае структура нечеткой модели и набор правил нечетких продукций (включая задание величин весовых коэффициентов) должны разрабатываться исходя из конкретных условий, в которых выполняется многокритериальный анализ, и задач, стоящих перед исследователем. При этом в первую очередь должны быть определены перечень входных и выходных переменных и диапазон их изменения. Для формирования правил нечетких продукций необходимо также решить допускается ли компенсация недостатка одних свойств системы избытком других. Для декомпозиции и разработки структуры нечеткой модели необходимо структурировать входные переменные по степени их влияния на выходную: равнозначные, значимо различающиеся и доминирующие.

Таким образом, путем декомпозиции нечеткой модели большой размерности и формирования иерархической структуры разработана компактная система нечетко-продукционных правил адекватно отражающая влияние входных переменных на обобщенные качественные характеристики систем инициирования. Разработанная система правил нечетких продукций используется в Государственном ракетном центре имени академика В.П. Макеева в практике проектно-конструкторских работ по системам инициирования пиросредств.

Библиографический список

1. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 284 с.
2. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fussyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
3. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
4. Применение аппарата нечеткой логики к решению задачи выбора типа системы инициирования пиросредств ракетного комплекса: отчет о НИР / ЮУрГУ; рук. Зезин В.Г., исполн. Зезин В.Г., Решетников М.И. – Миасс, 2014. – 141 с. – Инв. № 171249-ГиТ/02.
5. Программный комплекс fuzzyTECH: Demo-версия [электронный ресурс]. – URL: http://www.fuzzytech.com/?lang=e.

К содержанию

УДК69.07

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РИСК-МЕНЕДЖМЕНТА СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПОВЫШЕННОГО УРОВНЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Е.А. Казакова

При решении задачи обеспечения конструкционной безопасности зданий повышенной ответственности необходимо применять технологии риск-менеджмента, которые включают: определение риска аварии, норму на его величину и прогноз ожидаемой ситуации риска аварии. Оперативность оценки величины риска аварии достигается с помощью применения автоматизированной системы.

Ключевые слова: безопасность, риск аварии, ошибки людей, надежность, система контроля риска аварии.

В России ежегодно растет число строительных аварий. Наиболее опасные из них – это аварии, связанные с обрушением несущих конструкций зданий (сооружений). По данным МЧС за 2010–2013 годы по тяжести их последствий (числу пострадавших и летальным исходам) они находятся на втором месте после чрезвычайных ситуаций, связанных с авариями транспортных средств [1]. Сложившаяся ситуация демонстрирует неспособность существующих сегодня в инвестиционно-строительной сфере РФ рыночных и административных механизмов выявлять критические с точки зрения безопасности строительных объектов процессы и взаимодействия, а также эффективно управлять ими, обеспечивая оптимизацию характеристик риска строительных аварий и требуемый уровень общественной и го-

сударственной безопасности. Большую тревогу вызывает высокий износ большого числа высокоответственных объектов, имеющих длительные сроки эксплуатации, и состояние которых определяет безопасность проживания в густонаселенных районах.

Для решения данной проблемы необходимо периодически, через определенные промежутки времени контролировать величину риска аварии зданий в форме риск-менеджмента. Основные положения риск-менеджмента (базируются на методике прогноза и оценки риска аварии А.П. Мельчакова [2]):

1. За риск аварии принято отношение фактической и теоретической вероятностей аварии:

$$R=P_{\text{ф}}/P_{\text{Т}}\ . \qquad (1)$$

2. Значение R можно определить следующим образом:

$$R = \frac{1}{\prod_{i=1}^{n} \nu}, \qquad (2)$$

где ν − надежность группы несущих конструкций (например, колонны, плиты перекрытия и т.д.).

3.Нормативную базу для приемлемых значений риска аварии можно принять в виде модели деградации, показанной на рисунке 1. При достижении пороговых значений (рис. 1) строительный объект переходит в качественно иное состояние: при значении 15 – из безопасного (работоспособного) – в ограниченно-работоспособное, при 32 – в аварийное, 83 – в ветхо-аварийное. Доказано, что пороговые риски аварии не зависят ни от конструктивного типа здания, ни от его этажности: они являются инвариантами. При этом определение вида технического состояния позволяет принять правильное управленческое решение относительно необходимости тех или иных мер по обеспечению конструкционной безопасности: текущий, капитальный ремонт или срочная эвакуация людей.

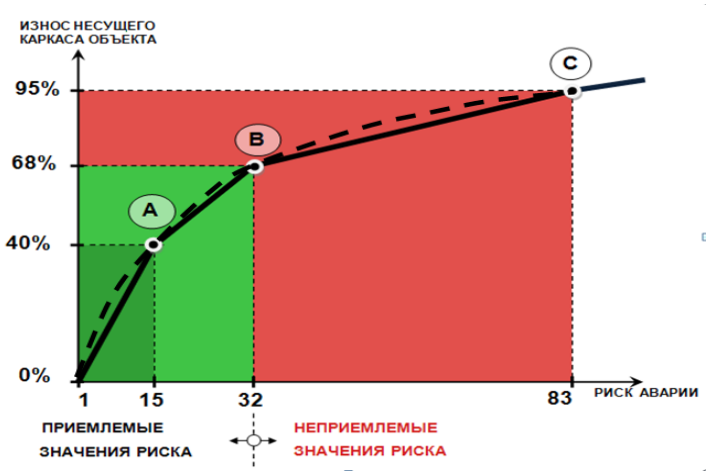


Рис. 1. Модель деградации строительного объекта:
значения 15, 32 и 83 – это пороговые риски. Причем приемлемый риск аварии для только что построенных зданий равен двум, а 32 – это предельно-допустимый риск для эксплуатируемых зданий и сооружений

4. Обязательным этапом регулирования уровня конструкционной безопасности эксплуатируемого здания является прогноз ожидаемой ситуации риска аварии. Такой прогноз даст возможность определять оптимальные промежутки времени, через которые необходимо осуществлять полные и частичные сертификационные испытания. В первую очередь с этой целью необходимо правильно рассчитывать безопасный остаточный ресурс здания ($T_{бо}$) – время, по завершении которого объект перейдет в аварийное состояние:

$$T_{бо} = T_{ф}(32 - R_{ф}) /(R_{ф}–1), \quad (3)$$

где $R_{ф}$ – риск аварии строящегося здания (сооружения) на момент времени $T_{ф}$:

$$T_{ф}=T_{стр}\cdot k_1+T_{эк}, \quad (4)$$

где $T_{стр}$ – время строительства объекта. В данном случае во время строительства $T_{стр}$ считается с начала строительства до момента сдачи в эксплуатацию. При этом время «консервации», если таковое имеется; время от момента окончания строительства до сдачи здания в эксплуатацию, а также другие факторы, увеличивающие время строительства, при которых здание подвергается проектным нагрузкам не в полном объеме, должны учитываться с поправочными коэффициентами.

$T_{эк}$ – время эксплуатации.

k_1 – коэффициент, учитывающий процесс возведения здания:

$$k_1= w/(100\cdot 12 \text{ мес.}), \quad (5)$$

где w – площадь под графиком процесса возведения несущих конструкций здания (см. рис.2).

Рис. 2. Схема процесса возведения
несущих конструкций объекта для определения w

В случае отсутствия данных по процессу возведения конкретного здания, за $T_{стр}$ принимается нормативный срок строительства для такого типа здания по СНиП 1.04.03-85* «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений». Коэффициент k_1 в таком случае принимается приближенно, исходя из конструктивной схемы здания и метода его возведения.

5. Периодическую оценку величины риска строительного объекта целесообразно осуществлять в виде сертификационных испытаний. Их оперативность достигается с помощью применения автоматизированной системы, схема которой приведена на рис. 3.

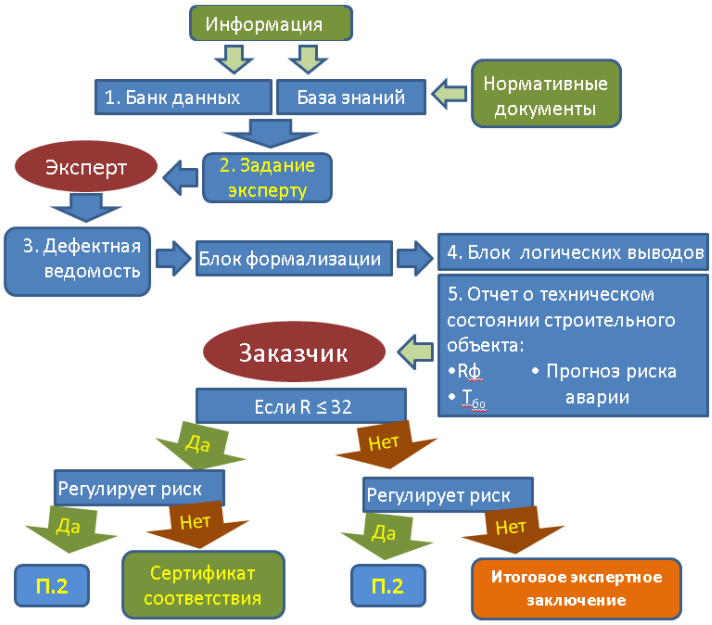


Рис. 3. Схема проведения процедуры обследования
с последующей выдачей сертификата

Основой для начала работы данной системы является информация, содержащая все данные об обследуемом объекте: проектная документация (при наличии) с указанием вида и типов конструкций, применяемых материалов, информация об участниках строительно-инвестиционного процесса и т.д. Полученная информация передается в блок базы знаний. База знаний является механизмом для представления знаний в исследуемой области и управления ими. Знания – это информация, на которую ссылаются, когда делают различные заключения и выводы на основе экспертной информации. В базу знаний включен банк данных. Банк данных – это систематизированный набор требований (СП, СНиП, ГОСТ, проект и т.д.) к качеству материалов, строительно-монтажных работ и эксплуатации. Также включает в себя перечень возможных грубых ошибок при проектировании зданий и сооружений и перечень контролируемых параметров, ответственных за качество конечной продукции.

На основании базы знаний формируется задание эксперту, т.е. составляется предварительный перечень возможных дефектов, которые повышают риск аварии конкретного здания. Обнаружение данных дефектов является задачей эксперта. Центральное место в автоматизированных системах занимают функции эксперта, предоставляющего исходную информацию для расчета риска аварии исследуемого объекта:

А. Построение для исследуемого объекта «дерева» несущего каркаса – иерархической последовательности возведения групп однотипных конструкций, в совокупности образующих каркас объекта, с обязательным включением в «дерево» грунтового основания. Для объектов, находящихся в процессе строительства, на этой же стадии определяются «промежуточные здания» – часть *n*-этажного объекта, составляющая нулевой цикл и *d*=1,2,…,n его этажей.

Б. Визуально-инструментальное обследование технического состояния групп однотипных конструкций и отыскание в каждой группе наиболее и наименее дефектных конструкций.

Формирование ведомостей дефектов: информация о дефектах в наиболее и наименее дефектных конструкциях в каждой группе конструкций заносится в программный комплекс автоматизированной системы. Здесь же указываются причины дефектов. В качестве причин дефектов несущих конструкций зданий и сооружений следует рассматривать:

– воздействие внешних факторов природного и техногенного характера;

– воздействие внутренних факторов, обусловленных технологическими процессами внутри строительного объекта и условиями эксплуатации;

– ошибки при изготовлении строительных конструкций, при инженерно-геологических изысканиях, при проектировании и возведении (монтаже) строительных объектов;

– нарушения правил эксплуатации строительного объекта.

В. Назначение по специальному правилу, основанному на методологии риска, для каждой включенной в ведомости дефектов конструкции уровня и ранга опасности, характеризующего принадлежность к одному из предельных состояний.

Функции преобразования и надлежащего представление экспертной информации осуществляет блок формализации, в который включаются правила и процедуры для этой формализации. Механизм прогнозирования, закладываемый в блок логических выводов, включает набор решающих правил, позволяющий на основании сведений базы знаний и формализованной экспертной информации сделать логические выводы по существу решаемой задачи:

– на основании сведений об уровне и ранге опасности наиболее и наименее дефектных конструкций в каждой группе конструкций по специальному правилу определяются уровни надежности этих конструкций;

– с помощью метода статистических испытаний (метода Монте-Карло) строится гистограмма распределения риска аварии. Далее рассчитывается среднее значение $R_ф$.

Если объект находится на стадии строительства, то $R_ф$ рассчитывается для каждого «промежуточного здания». Каждое построенное «промежуточное здание» должно удовлетворять условию:

$$R_ф < R^*, \quad (6)$$

где R^* − нормативный риск аварии − максимально-допустимое значение фактического риска аварии построенного промежуточного здания. Для полностью построенного здания R*=2.

Г. Используя данные $T_{стр}$ и $T_{эк}$ по формуле (4) рассчитывают $T_ф$. Далее по формуле (3) рассчитывают $T_{бо}$. На стадии строительства объекта данные расчеты не производятся.

Результаты выдаются в виде отчета о техническом состоянии. Отчет включает:

1) информацию о существующих в наиболее дефектных конструкциях критических дефектах и их причинах (см. функции эксперта п.3), указывается место расположения таких конструкций. Эти данные позволяют извлечь полную информацию о неблагополучных группах конструкций, внесших наибольший «вклад» в риск аварии исследуемого объекта;

2) значение риска аварии. Для строящихся зданий здесь же приводится карта фактических рисков аварии каждого «промежуточного здания» построенной части здания с указанием нормативных рисков для всех этапов строительства (см. рис. 4).

Такая информация является знаком для регулирования риска, если он превышает критическое (нормативное) значение.

Рис. 4. Карта нормативных и фактических рисков аварии для «промежуточных» зданий 10-этажного жилого дома

3) для достроенного или уже эксплуатируемого строительного объекта в отчете указываются также $T_ф$, $T_{бо}$ и прогнозируемый рост риска аварии на ближайшие 5 лет.

Данный отчет не является отчетом об обследовании, т.к. содержит лишь сведения, которые необходимы:

а) на стадии строительства – для принятия решения о продолжении строительства или о применении мер по снижению риска аварии;

б) при завершении строительства или в процессе эксплуатации объекта – для выдачи сертификата и страхового полиса.

Основываясь на результатах отчета, заказчику (владельцу здания) предстоит решить, исправить выявленные дефекты и тем самым снизить риск аварии и далее застраховать объект по более низкому страховому тарифу, либо оставить всё как есть. При этом следует учитывать, что сертификат соответствия выдается только при $R_{\phi} \leq 32$, т.к. в противном случае здание (сооружение) неспособно сопротивляться каким-либо непроектным воздействиям и, соответственно, появление таких воздействий в любой момент может привести к аварии.

Главным принципом регулирования риска аварии является расследование причин низкого уровня конструкционной безопасности исследуемого объекта и построение на основе этого расследования оптимальной тактики и стратегии ремонтно-восстановительных работ по снижению риска аварии.

Совокупность представленных выше основных составляющих риск-менеджмента формируют механизм обеспечения безопасности зданий повышенной ответственности на стадии строительства и эксплуатации в соответствии с требованиями Технического регламента о безопасности зданий и сооружений.

Библиографический список

1. Официальный сайт МЧС России. – URL: http://www.mchs.gov.ru/-Stats/CHrezvichajnie_situacii.

2. Мельчаков, А.П. Прогноз, оценка и регулирование риска аварии зданий и сооружений: теория, методология и инженерные приложения: монография / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 113 с.

К содержанию

УДК 656.13

БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА НА ДОРОГАХ г. МИАССА ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ

В.А. Камерлохер

Согласно статистическим данным в 2012 году на дорогах нашей страны произошло 187 098 аварий. Значительно выросло и число аварий из-за ужасных дорог. Основными мероприятиями по повышению безопасности дорожного движения является устранение неблагоприятных дорожных факторов. Разрабатывают мероприятия по совершенствованию организации дорожного движения в населенных пунктах.

Ключевые слова: аварии, автомобильные катастрофы, ДТП, показатели аварийности, автомототранспортные средства.

Согласно статистическим данным, представленным ГИБДД России, в 2012 году на дорогах нашей страны произошло 187 098 аварий, в которых пострадали люди. По сравнению со статистикой 2011 года, число погибших в автомобильных катастрофах в этом году увеличилось на 1,2 %, а число ДТП на 2,8 % [2]. Неутешительные результаты и за 2013 год (табл. 1).

Таблица 1

Относительные показатели аварийности (за 2013 г.)

Январь–ноябрь 2013 г.				
	Количество ДТП на 10 тыс. ед. ТС		Число пострадавших на 100 тыс. жителей	
	абс.	% от среднего по России	абс.	% от среднего по России
1	2	3	4	5
Российская Федерация	**38,8**	**100,0**	**181,2**	**100,0**
г. Москва	24,3	62,8	105,7	58,3
Республика Башкортостан	33,3	85,9	156,2	86,2
Приволжский округ	**43,0**	**110,8**	**189,3**	**104,5**
Курганская область	42,1	108,5	200,1	110,4
Свердловская область	26,3	67,8	144,5	79,8
Тюменская область	51,5	132,8	308,4	170,3
Челябинская область	38,3	98,7	164,8	91,0

Значительно выросло и число аварий из-за ужасных дорог (табл. 2). Именно из-за этого, например, произошло 37 882 ДТП, в которых пострадало в общей сложности 47 177, а погибло 6235 человек. Рейтинг аварийности по количеству дорожно-транспортных происшествий возглавили Воронежская область, Самарская область и Ставропольский край.

По мнению экспертов, такие неутешительные результаты в первую очередь связаны с ростом автопарка в нашей стране. Но, несмотря на это, порядка 70 % всех дорожно-транспортных происшествий случается именно по вине недисциплинированных водителей [2].

Таблица 2

ДТП и пострадавшие из-за неудовлетворительного состояния улиц и дорог (за 2013 г.)

	ДТП			Погибло		Ранено	
	абс.	± % к АППГ	Уд.вес	абс.	± % к АППГ	абс.	± % к АППГ
1	2	3	4	5	6	7	8
Российская Федерация	**47881**	**23,3**	**25,8**	**6683**	**3,8**	**60869**	**22,9**
г. Москва	1723	61,3	16,6	177	82,5	2064	66,5
Приволжский округ	**11193**	**24,3**	**27,8**	**1396**	**5,9**	**14319**	**24,9**
Курганская область	237	37,8	18,9	59	68,6	295	27,2
Свердловская область	1274	-8,9	29,5	227	-29,1	1733	-11,4
Челябинская область	1197	18,6	28,0	216	41,2	1409	17,5

В «Методических рекомендациях по назначению мероприятий для повышения безопасности движения на участках концентрации дорожно-транспортных происшествий», утвержденных Распоряжением Росавтодора от 30.03.2000 г. № 65-р в Общих положениях в п. **1.4.** к числу основных групп дорожных факторов, способствующих возникновению участков концентрации ДТП, относят следующие:

– наличие дефектов эксплуатационного состояния покрытия проезжей части и обочин, технических средств организации дорожного движения и инженерного оборудования дорог, снижающих безопасность дорожного движения;

– неудовлетворительный уровень содержания дорог;

– несоответствие параметров геометрических элементов трассы дороги состоянию покрытия и придорожной обстановке, способствующее значительному превышению безопасной скорости движения;

– отсутствие или дефекты инженерного оборудования на эксплуатируемых железнодорожных переездах, а также несоблюдение нормативных требований к расстоянию видимости приближающихся поездов;

– иные неблагоприятные факторы дорожных условий, способствующие возникновению ДТП, перечень которых представлен в «Правилах учета и анализа дорожно-транспортных происшествий на автомобильных дорогах Российской Федерации».

Указанные факторы могут приводить к возникновению участков концентрации ДТП вследствие отклонения показателей технического уровня, эксплуатационного состояния и уровня содержания дорог и дорожных сооружений от нормативных значений, допускаемых по условиям безопасности движения, особенно если воздействие этих факторов имеет длительный характер [1].

Основными мероприятиями по повышению безопасности дорожного движения на участках концентрации ДТП (табл. 3) являются назначение мероприятий, направленных на устранение неблагоприятных дорожных факторов в целях повышения безопасности движения на участках концентрации ДТП и их реализация (табл. 4) [2].

Мероприятия по совершенствованию организации дорожного движения в населенных пунктах включают в себя:

1) организация движение на перекрестках;
2) организация движения пешеходов;
3) обеспечение информацией участников движения;
4) организация движения в темное время суток;
5) организация движения в зимних условиях.

Таблица 3

Количество автомототранспортных средств и прицепов к ним, зарегистрированных в установленном порядке Государственной инспекцией безопасности дорожного движения МВД РФ по Челябинской области

Сведения о количестве транспортных средств и прицепов к ним			
за 12 месяцев 2013 года		Количество транспортных средств	
		Всего	% к АППГ
Всего транспортных средств		1 332 209	11,8
в том числе	легковых автомобилей	1 097 727	16,5
	грузовых автомобилей	74 998	-40,0
	автобусов	17 382	-31,5
	мототранспортных средств	50 237	121,8
	прицепов	83 711	36,8

Таблица 4

Сведения о состоянии аварийности
в Челябинской области за 12 месяцев 2012/2013 г.

Города, районы области	% роста, снижения	Количество ДТП		Число погибших		Число раненых	
		2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.	2012 г.	2013 г.
КОПЕЙСК	26,7	101	128	21	25	96	144
МИАСС	-8,5	211	193	41	30	236	216
Златоуст	-24,3	338	256	25	22	410	304
В. УФАЛЕЙ	-25,5	55	41	5	4	61	48
ТРОИЦК	-7,8	90	83	7	9	103	99
КАРАБАШ	-22,7	22	17	5	2	28	21
КЫШТЫМ	7,5	67	72	15	12	74	87
ЧЕЛЯБИНСК	4,4	1856	1937	90	97	2328	2466
ВСЕГО по области	-2,1	4923	4819	641	627	5903	5876
% роста снижения		-2,1		-2,2	-0,5		

Миасс – город в составе Челябинской области, России (с 1926). Территория города 111,9 км², общая протяжённость дорог – 454 км. Население – 152,5 тыс. человек (2009).

Здесь, как и во многих городах и районах Челябинской области реализуется проект «Новые дороги городов России». Городу в 2011 году на дороги было выделено 150 миллионов рублей – беспрецедентная за последние лет двадцать сумма [3].

*Эти средства предназначались на самые горячие участки дорог города. Прежде всего, Предзаводска*я площадь – там работы застопорились через месяц, в связи, с чем образовались проблемы: несогласованность в проведении работ по реконструкции контактной сети троллейбусов, переносу линий связи, трубопровода. Деньги освоили – главная задача (выполнение участка дороги для проезда без остановки на подъем транзитного грузового транспорта) – не выполнена.

От Автозавода до Машгородка велись работы по укладке покрытия. Асфальт здесь должен быть двухслойным – первый слой, черновой – 70 мм, второй, финишный – 50 мм. Подрядчик обещал, что дорога прослужит 20 лет (в районе супермаркета «Молния» дорожное полотно совсем не имеет наклона и в дождливую погоду на новом покрытии образуется заводь на протяжении 50 метров).

Если проанализировать мероприятия по совершенствованию организации дорожного движения в Миассе, то появляются дополнения к этим мероприятиям:

1) организация движение на перекрестках – необходимо больше внимания уделять перекресткам города (ул. Лихачева – ул. 8-е Июля и ул. Ак. Павлова, Предзаводская пл. – пр. Автозаводцев, ул. 8-е Марта – ул. С. Разина и ул. Уральская, пр. Октября – ул. Попова и ул. И-Тау и другие;

2) организация движения пешеходов – пешеходных переходов обустроено слишком много, через 50 метров, что приводит к ДТП с наездами на пешеходов, т. к. пешеходы практически переходят в любых местах, а водители транспорта не могут уследить за обстановкой;

3) обеспечение информацией участников движения – знаки необходимо ставить заранее для перестроения транзитных автомобилей (Предзаводская площадь, поворот на объездную от Автозавода, поворот на г. Златоуст – ул. Б. Хмельницкого и другие);

4) организация движения в темное время суток – пешеходные переходы не освещены (все переходные переходы на машгородке на объездной дороге к гаражам), светофоры переключают в мигающий режим рано, когда движение еще большое, на самом длинном перекрестке пр. Октября – ул. Попова и ул. И-Тау светофор не имеет режима мигающего зеленого света;

5) организация движения в зимних условиях – не всегда вовремя проводится чистка улиц и подсыпка (особенно заметно на перекрестках с небольшим уклоном – ул. Молодежная, ул. Попова, Предзаводская площадь.

В связи с последними известиями, о том, что на летний период 2014 года нашему городу выделяется 100 млн рублей на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог общего пользования местного значения возникают большие опасения по рациональному использованию средств.

Непонятно конечно, почему дороги каждый год приходят в такое состояние – может их неправильно делают и ремонтируют? Может нужно пригласить специалистов и перенять опыт? Может нужно ремонтировать не все и сразу, а небольшими кусочками, но КАЧЕСТВЕННО?

Библиографический список

1. Методические рекомендации по назначению мероприятий для повышения безопасности движения на участках концентрации дорожно-транспортных происшествий, Российское дорожное агентство РосАвтодор, Москва, 2000 г.

2. Сайт ГИБДД Челябинской области.

3. Сайт ГИБДД города Миасс.

К содержанию

УДК 629.114.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОГО И СИЛОВОГО РАССОГЛАСОВАНИЯ В ПРИВОДЕ ДВИЖЕТЕЛЕЙ ПРИЦЕПА И ПОЛУПРИЦЕПА

В.В. Краснокутский

В статье рассматривается использование кинематического и силового рассогласования в приводе движителей прицепа и тягача. При этом снижение затрат мощности двигателя можно направить либо на повышение производительности, либо на экономию топлива. Полученные рациональные коэффициенты кинематического и силового рассогласования позволят также снизить выброс загрязняющих веществ двигателем тягача.

Ключевые слова: активный прицеп, ведущие колеса прицепа, кинематическое и силовое рассогласование в приводе ведущих колес прицепа, повышение производительности, снижение затрат мощности на буксование.

Необходимость создания энергонасыщенных мобильных машин доказана и обоснована наукой и практикой. Наблюдается тенденция дальнейшего повышения мощности энергосредства при одновременным снижении массы, что позволяет повысить производительность, снизить металлоемкость, более широко применять принцип оптимизации. Прогрессивным направлением использования мощности двигателя является применение комбинированных тяговых агрегатов с приводом опорных колес. Для транспортного агрегата (ТА) – это активный прицеп имеющий ведущие колеса.

Создание экологически чистых энергосредств в значительной степени сдерживается их низкой приспособляемостью к непрерывно меняющимся эксплуатационным нагрузкам ДВС. Необходимая нагрузка ДВС повышает эффективность использования энергосредства на транспортных работах путем применения прицепов и полуприцепов с ведущими мостами.

Активные прицепы применяют в США, Германии, Франции и других странах. Так, в США фирмой Летурно создан ряд большегрузных активных автомобильных поездов для эксплуатации на Аляске и на лесоразработках Канады. В Германии, Швеции, Австралии значительное распространение получили сельскохозяйственные поезда, комплектуемые из колесных тракторов и одноосных активных прицепов. Во Франции фирмой Ле тор Модерн созданы активные прицепы, используемые в пустыне Сахара. Такой поезд при массе 29 т. легко преодолевает глубокий песок.

В этом случае масса прицепа и масса перевозимого груза используется в качестве сцепной, за счет чего повышается тяговые показатели агрегата в целом. При блокированном приводе активного прицепа между тягачом и

прицепом возникает циркуляция мощности, которую иногда заслуженно называют «паразитной». При блокированном приводе распределение мощности между тягачом и прицепом не учитывается давление в шинах колес и их износ, образование колеи при прямолинейном движении и при повороте, а также условия работы активных мостов (первый мост подготавливает опорную поверхность для последующих). Автором получена взаимосвязь коэффициента распределения тягового усилия между движителями тягача и активного прицепа [3; 6]. Изучением вопроса распределения мощности между ведущими мостами полноприводных агрегатов занимались многие исследователи, накоплен большой опыт. Проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению буксования движителей поноприводного ТА в различных дорожных условиях и при различном распределении мощности между тягачом и активным прицепом. Получены результаты распределения мощности между тягачом и активным прицепом, на основании которых возможно повысить производительность в зависимости от массы перевозимого груза, опорной поверхности, скорости движения, ограниченной устойчивостью прямолинейного движения.

С целью определения средних значений оценочных критериев полноприводного ТА приняли отрезок времени работы достаточно большим, равным времени смены. В этом случае массу перевозимого груза уже нельзя считать постоянной, так как она будет варьировать в пределах времени цикла. Кроме того, нельзя также считать постоянными свойства опорной поверхности (агрофона), которые будут варьироваться в зависимости от участков маршрута движения.

Экспериментальными исследованиями установлено, что буксование движителей на недеформируемых опорных поверхностях в основном происходит в результате гистерезисных потерь в шине, на деформируемых – в результате, как гистерезисных потерь, так и пластических деформаций грунта и проскальзывании шины в пятне контакта [1, 2]. Рациональные значения кинематического и силового рассогласования $К_v$ и $К_р$ в составе трактора МТЗ-82 и прицепа ПСЕ-12,5 с ведущим задним мостом по условию минимума затрат мощности на буксование на разных скоростях движения получены в пределах:

– для недеформируемой опорной поверхности $К_v$ = 0,99…1,00; $К_р$ = 0,46…0,50;

– для деформируемой опорной поверхности $К_v$ = 0,97…0,99; $К_р$ = 0,15…0,70.

В связи с изложенным среднее значение оценочных критериев, производительности и расхода топлива ТА с активным прицепом переменной массой перевозимого груза и опорной поверхности можно определить обобщенными выражениями:

$$W_a = \frac{1}{{}_1 + G_2} \int_{G_2}^{G_1} W_a\left(G_{\text{гр}}\right) \cdot dG_{\text{гр}};$$

$$q_w = \frac{1}{G_1 + G_2} \int_{G_2}^{G_1} q_w\left(G_{\text{гр}}\right) \cdot dG_{\text{гр}},$$

где G_1 − максимальное значение сцепной массы прицепа; G_2 − минимальное значение сцепной массы прицепа; W_a – производительность транспортного агрегата; q_w − удельный расход топлива.

Таким образом снижение затрат мощности на буксование от применения привода прицепа может быть направлено либо на повышение производительности, либо на снижение удельных энергетических затрат. Данные мероприятия позволят также снизить выброс загрязняющих веществ двигателем тягача, если направить снижение затрат мощности двигателя на экономию топлива [4; 5].

Снижение удельных энергетических затрат при использовании опытного прицепа по сравнению с обычным при массе перевозимого груза 60 кН составляет за счет экономии топлива (1 кг топлива = 42,7 мДж):

1) 10,58 мДЖ/ч – при движении по шоссейной дороге с асфальтобетонным покрытием со скоростью V_p = 9 м/с;

2) 346,54 мДЖ/ч – при движении по полю подготовленному под посев зерновых со скоростью V_p = 5 м/с.

Пределы рациональных значений коэффициентов кинематического и силового рассогласования на экспериментальном агрегате были определены при помощи гидромеханической трансмиссии. Установка кинематического и силового рассогласования производилась вручную гидрораспределителем трактора.

Полученные данные указывают на целесообразность применения активных прицепов. Однако, прибора для автоматического регулирования распределения потока мощности между трактором и прицепом в настоящее время не существует. Результаты же проведенных исследований позволяют на этапе проектирования определить рациональные параметры привода ходовых колес прицепа.

Задача дальнейшего исследования – изучить и определить параметры работы автоматического устройства (динамику процесса, частоту срабатывания механизма, гармонические возмущения и т.п.). Динамические свойства системы регулирования кинематического и силового рассогласований определяются переходными процессами в зависимости от агрофона, массы перевозимого груза, внешних воздействий. Технически реализовать систему автоматического регулирования силового и кинематического рассогласования в приводе прицепов и полуприцепов возможно при серьезной материальной базе. Кафедра «Автомобилестроение» ЮУрГУ в г. Миассе готова к сотрудничеству с предприятиями научными организациями в этом направлении.

Библиографический список

1. Краснокутский, В.В. Перспективное направление использования мощности двигателя тягачей с активным прицепом / В.В. Краснокутский, Б.Н. Гришай // Сборник трудов факультета «Машиностроительный» филиала ЮУрГУ в городе Миассе. Конструкции, технологии, управление в машиностроении и строительстве. – Челябинск, 2008.

2. Краснокутский, В.В. Рациональное распределение мощности двигателя между тягачом и активным прицепом / В.В. Краснокутский // Сборник трудов факультета «Машиностроительный» филиала ЮУрГУ в городе Миассе. Конструкции, технологии, управление в машиностроении и строительстве. – Челябинск, 2007.

3. Краснокутский, В.В. Повышение проходимости и снижение энергетических затрат автопоездов путем использования движителей прицепа / В.В. Краснокутский // Материалы 65-й научной конференции. Наука ЮУрГУ, секции технических наук. – Челябинск, 2013. – Т. 2.

4. Краснокутский, В.В. К вопросу экологии наземных транспортных средств / В.В. Краснокутский, М.Г. Штака // Материалы 1 Всероссийской научно-практической конференции. Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса. – Бийск: Издательство Алтайского государственного технического университета, 2013.

5. Краснокутский, В.В. Снижение концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых тягачами, путем использования движителей прицепа / В.В. Краснокутский // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Экологическая безопасность и современные технологии. Миасс, 2009. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009.

6. Краснокутский, В.В. Энергетическая оценка снижения вредного воздействия наземных транспортных средств на почву путем добавления ведущих мостов / В.В. Краснокутский, М.Г. Штыка // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. Экологическая безопасность и современные технологии. Миасс, 2009. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009.

К содержанию

УДК 582.542.11

ОЦЕНКА ВИТАЛИТЕТА ЦЕНОПОПУЛЯЦИЙ *PHRAGMITES AUSTRALIS* (CAV.) TRIN. EX STEUD. В УСЛОВИЯХ РАЗНОТИПНОГО ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

Н.Б. Куянцева, О.Е. Чащина, П.О. Андреева

Изучено жизненное состояние ценопопуляций *Ph. australis* в условиях хронического полиметаллического загрязнения. Разным морфометрическим признакам тростника южного соответствуют разные типы онтогенетических тактик. В неблагоприятных условиях происходит уменьшение размеров и дестабилизация морфологического развития вегетативных органов и стабилизация в формировании признаков генеративной сферы. Отмеченные факты выступают проявлениями стратегии жизни *Ph. australis,* направленной на выживание растений в неблагоприятных условиях и на увеличение вероятности семенного размножения и распространения.

Ключевые слова: ценопопуляции, виталитет, эколого-ценотические стратегии, онтогенетические тактики.

Характеристика популяционных аспектов толерантности ценопопуляций (ЦП) фоновых видов растений водных экосистем в условиях различного режима химического загрязнения изучена недостаточно [1, 2]. Для оценки трансформаций растительности под влиянием антропогенных факторов предлагается использовать сравнительный анализ нарушенных и эталонных для данной природной зоны фитоценозов [3].

Цель работы: дать оценку стратегий жизни ценопопуляций *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud в условиях интенсивного техногенного воздействия.

Задачи: 1) оценить накопление тяжелых металлов в вегетативной и генеративной сфере *Ph. australis* и рассчитать коэффициент суммарной токсической нагрузки для пробных площадей (ПП); 2) изучить изменчивость морфометрических показателей *Ph. australis* в градиентах стрессирующей нагрузки; 3) оценить уровень жизненности ценопопуляций (ЦП) *Ph. australis* в условиях интенсивного техногенного воздействия в сравнении с фоном; 4) изучить уровень пластичности морфометрических показателей и типы онтогенетических тактик *Ph. australis* в оптимальных и пессимальных условиях; 5) охарактеризовать тип эколого-ценотической стратегии тростника южного.

Импактные территорий Южного Урала изучены на примере г. Карабаша Челябинской области (Карабашский медеплавильный комбинат (КМК) и г. Сатки (комбинат «Магнезит»). В первом случае основной загрязняю-

щий фактор – закисление среды сернокислотными осадками, во втором – запыление магнезитовой пылью, имеющей сильную щелочную среду. Эталонные тростниковые фитоценозы расположены на территориях Ильменского государственного заповедника (ИГЗ) и НП «Зюраткуль».

В исследованиях за счетную единицу принималась особь – парциальное образование вегетативного и семенного происхождения. Концентрации металлов определяли на атомно-абсорбционных спектрометрах Aanalyst 400 (PerkinElmer) с пламенной атомизацией (Fe, Cu, Zn) и Aanalyst 300 (PerkinElmer) с графитовой печью HGA-850 (Pb, Cd). Лаборатория, в которой выполняли измерения, сертифицирована: аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.514536. Градиент ухудшения условий роста выстраивали на основе накопления 6 тяжелых металлов отдельно для вегетативной (листья и стебли) и генеративной (соцветия) сферы, и выражали через коэффициент суммарной токсической нагрузки [4].

Типы онтогенетических тактик, отражают тенденции на уровне варьирования отдельных морфогенетических параметров особей. С использованием выравнивания средних значений параметров по ЦП методом взвешивания оценивали индекс виталитета ценопопуляций (IVC) и коэффициент жизненности (Q) [5, 6]. Пластичность признаков и онтогенетические тактики оценивали по методике Ю.А. Злобина [5]; эколого-ценотические стратегии – по Раменскому-Грайму. Заложены 15 ПП, на которых отобраны по 30 модельных растений генеративного состояния. У каждого экземпляра снято по 9 показателей: высота надземного побега, длина и ширина соцветия, длина и число метамеров, число, длина и ширина листьев, длина листовых влагалищ (8400 измерений). Статистическую обработку данных проводили с использованием пакета программ «STATISTICA 6,0» и «MS EXCEL».

Phragmites australis (Cav.) Trin. ex Steud – тростник южный - земноводный длиннокорневищный травянистый многолетник; геофит и гелофит; гемикосмополитный, плюризональный; гигрофит, прибрежно-болотный, антропотолерантный.

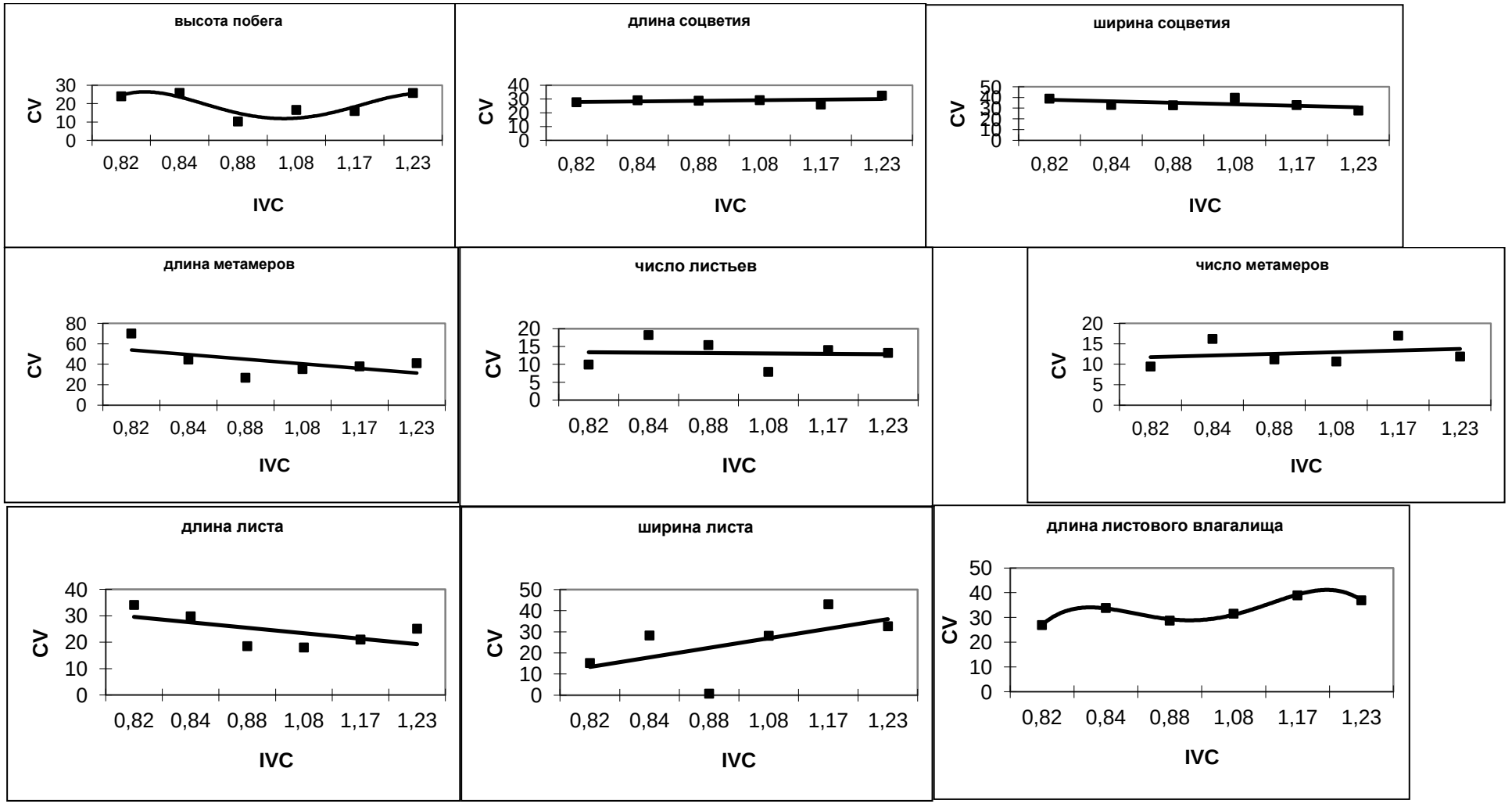
Установлено, что содержание тяжелых металлов в вегетативной сфере *Ph. australis* в несколько раз больше (от 1,2 до 7,4 раз), чем в генеративной. В связи с тем, что коэффициенты суммарной токсической нагрузки, рассчитанные отдельно для вегетативной и генеративной сфер, различаются, то и ранги ЦП тростника в рядах возрастания загрязнения при сравнении средних показателей морфометрических признаков не всегда совпадают (таблица). Самые высокие значения коэффициентов суммарной токсической нагрузки выявлены для района г. Карабаша; минимальные – для территории саткинского комбината «Магнезит». Содержание тяжелых металлов в разных частях растений убывает по мере удаления ЦП от источника эмиссии (для территории ИГЗ К изменяется в интервале от 3,41 до 1,94).

Анализ трендов изменения морфометрических признаков в ЦП *Ph. australis* (по градиенту стресса) позволил выделить ключевые показатели как для территорий импакта, так и для фона. При ранжировании ЦП по IVC общими чувствительными характеристиками выступают длина листа, ширина листа, высота побега, длина соцветия; по коэффициенту суммарной токсической нагрузки – длина листа, ширина листа, высота побега, длина листового влагалища. Наиболее высокие показатели пластичности у *Ph. australis* имеют признаки: высота побега (0,46–0,54) и ширина листа (0,68–0,87). В разных условиях морфометрическим признакам *Ph. australis* соответствуют разные типы онтогенетических тактик. В градиенте нарастания стрессирующей нагрузки большинство признаков реализует конвергентную тактику, характеризуемую снижением CV (рисунок); конвергентно-дивергентная установлена для высоты побега и длины листового влагалища; дивергентная тактика выявлена для длины листа и метамеров, ширины соцветия.

Таблица

Суммарная токсическая нагрузка на ПП, рассчитанная на основе содержания тяжелых металлов в листьях и стеблях тростника ($К_1$), в соцветиях тростника ($К_2$), индекс виталитета ценопопуляций (**IVC**), координаты ПП

ПП	**N**	**EO**	**$К_1$**	**$К_2$**	**IVC**
г. Карабаш					
Ольховский пруд	55°30'051"	60°15'392"	1,72	1,43	1,17
р. Миасс (плотина)	55°27'686"	60°17'935"	5,48	2,18	1,23
р. Сак-елга № 1 (хвостохр.)	55°26'040"	60°14'974"	8,54	2,57	0,88
р. Сак-елга (у моста)	55°26'493"	60°13'432"	15,33	6,53	0,84
р. Сак-елга № 2 (хвостохр.)	55°26'694"	60°12'395"	19,05	9,2	1,08
Рыжий ручей	55°27'048"	60°17'109"	56,13	13,28	0,82
ИГЗ					
оз. Сириткуль	55°20'154"	60°15'283"	2,53	1,3	1,1
оз. Б. Ишкуль 1	55°17'359"	60°15'413"	2,32	1,06	0,88
оз. Б. Ишкуль 2	55°17'359"	60°15'413"	3,41	1,88	0,87
оз. Б. Миассово (кордон)	55°10'422"	60°16'532"	1,94	1,1	1,02
оз. Б. Миассово (курья Зимник)	55°10'552"	60°16'250"	1	1	0,87
оз. Ильменское (кордон)	55°10'340"	60°19'200"	1,99	2,3	1,16
г. Сатка					
оз. Зюраткуль (сплавина)	54°55'240"	59°13'320"	1	1	0,99
Заливной луг (СЗЗ)	55°05'185"	59°01'431"	1,01	1,24	1,07
Б. Сатка (СЗЗ)	55°04'145"	59°01'184"	1,19	1,48	0,93



Зависимость вариабельности морфометрических показателей тростника от виталитета растений (г. Карабаш)

Примечание: по оси абсцисс – индекс виталитета ценопопуляции (IVC), по оси ординат – коэффициент вариации (CV).

В градиенте увеличения стрессирующей нагрузки большинство изученных ЦП тростника характеризуются как деградирующие (проявляют правостороннюю положительную асимметрию), причем на территориях импакта такие популяции преобладают. По мере улучшения условий обитания, в ЦП уменьшается встречаемость особей низкого класса жизненности, и возрастает коэффициент жизненности.

Ph. australis характеризуется пластичной эколого-ценотической стратегией и выступает виолентом-патиентом (CS) – конкурентом стресс-толерантом. В благоприятных условиях является доминантом – эдификатором сообществ переувлажненных местообитаний. В неблагоприятных условиях у растений уменьшаются линейные размеры вегетативных органов и перераспределяются усилия на развитие генеративной сферы, направленной на увеличение вероятности семенного размножения и распространения.

Библиографический список

1. Торохова, О.Н. Изменчивость морфометрических параметров тростника обыкновенного и рогоза узколистного в искусственных водоемах промышленной зоны г. Горловки / О.Н. Торохова, А.З. Глухова, М.А. Арешков, И.В. Агурова // Пром. ботаника. – 2009. – Вып. 9. – С. 75–83.

2. Мокин, А.А. Проявление онтогенетических тактик *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. в неблагоприятных условиях / А.А. Мокин // Вестник ОГУ. – 2009. – № 6. – С. 252–253.

3. Горчаковский, П.Л. Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование / П.Л. Горчаковский // Экология. – 1984. – № 5. – С. 3–16.

4. Безель, В.С. Экологическая токсикология: популяционный и биоценотический аспекты / В.С. Безель. – Екатеринбург: Изд-во «Гощицкий», 2006. – 277 с.

5. Злобин, Ю.А. Принципы и методы изучения ценотических популяций растений / Ю.А. Злобин. – Казань: Изд-во Казан, ун-та, 1989. – 146 с.

6. Ишбирдин, А.Р. Стратегии жизни ценопопуляции *Cephalanthera rubra* (L.) Rich, на территории Башкирского государственного заповедника / А.Р. Ишбирдин, М.М. Ишмуратова, Т.В. Жирнова // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. Серия Биология. – 2005.– Вып. 1. – С. 85–98.

К содержанию

УДК 621.774.6

СПОСОБ УСТАНОВКИ ВЕЛИЧИНЫ НАТЯГА РАСКАТКИ ПРИ ХОЛОДНОЙ ГИБКЕ ТРУБ С РАСКАТЫВАНИЕМ

Ю.Г. Миков

Предложен способ установки величины натяга раскатки при холодной гибке труб с использованием инерционного нагружателя, позволяющий сократить время гибки труб и повысить качество гиба.

Ключевые слова: труба, гибка, раскатка, натяг, нагружение, величина натяга.

Известен способ холодной гибки труб с раскатыванием [1]. Сущность способа заключается в использовании шариковой раскатки, введённой в трубу с достаточно большим натягом. При вращении раскатки в каждой точке кольцевой зоны раскатывания возникает знакопеременный изгиб, при котором изгибные напряжения в поперечном направлении кратковременно достигают предела текучести. В результате при приложении относительно небольшого изгибающего момента в продольном направлении происходит гибка, причём только в перемещающейся кольцевой зоне раскатывания.

Для реализации способа были модернизированы серийно выпускающиеся трубогибы [2]. Модернизация заключалась в установке раскатки с приводом вращения и устройства, создающего натяг. В качестве нагружателя использовался вращающийся совместно с раскаткой пневмоцилиндр.

Эксплуатация таких станков показала их высокую эффективность. На согнутых трубах полностью отсутствовали гофры, диаметры изгибаемых труб были увеличены в полтора раза по сравнению с паспортными данными станков.

Однако, используемый нагружатель (пневмоцилиндр) имел ряд недостатков. Во-первых, для него был необходим сжатый воздух, что требовало наличия компрессора или сети сжатого воздуха. Во-вторых, установка необходимой величины натяга в раскатке требовала много времени. Оно тратилось на установку раскатки на максимальный диаметр и приведения её к нужному размеру с контролем штангенциркулем. После чего раскатка разводилась и вставлялась в трубу. Причём, истинный размер трубы по внутреннему диаметру мог отличаться от установленного из-за колебаний в пределах допуска, что требовало дополнительной регулировки. Исходя из этого, был предложен инерционный нагружатель (рис.).

Нагружатель 9 установлен на шпинделе раскатки 8, вращающемся на подшипниках в корпусе 7 от шкива 6. При вращении рычаги с грузами 11

расходятся, поворачиваясь вокруг оси 15, перемещая втулку 12, которая связана со штоком раскатки 5 через регулировочную гайку 13. Шток 5 воздействует на подвижный конус раскатки 3, создавая в ней натяг. Величина усилия при этом зависит от массы рычагов, их размеров и частоты вращения шпинделя. Предельное перемещение шариков 2 раскатки и соответственно рычагов 11 ограничивается упорами 10. При проектировании узла было предусмотрено получение создаваемого усилия на штоке в 25000 Н с фиксированной частотой вращения 500 об/мин.

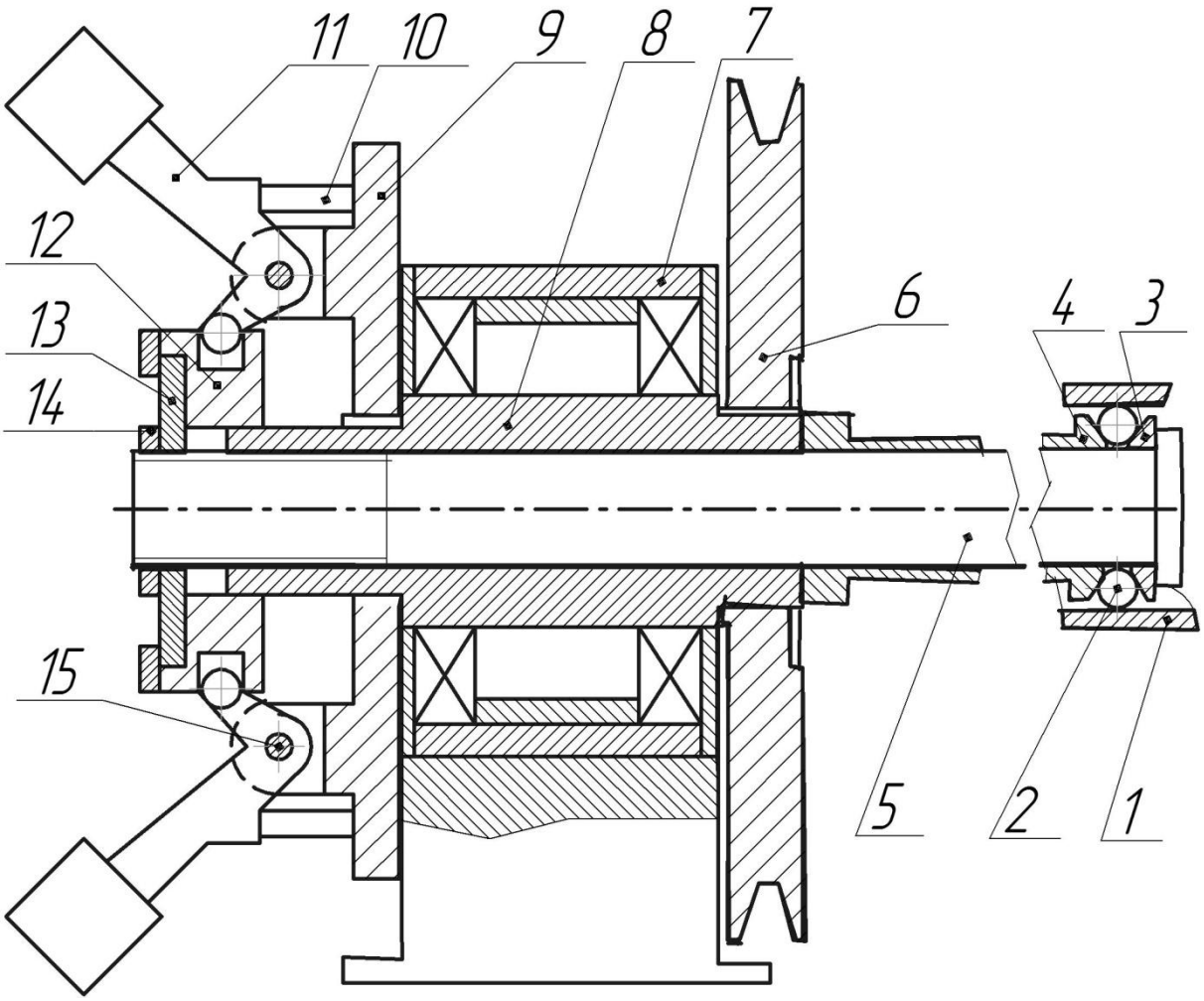


Схема инерционного нагружателя

Предложенная конструкция позволила упростить настройку раскатки для получения необходимого натяга в ней. Процесс установки начинается непосредственно в трубе 1. Раскатка вводится в исходное положение, после чего рычаги 11 разводятся в крайнее положение до упоров 10 и удерживаются там с помощью специальной распорки. Далее с помощью гайки 13 перемещается шток 5 и сводятся конуса раскатки 3 и 4 до касания шариков 2 с трубой 1. Этим фиксируется внутренний диаметр трубы. По-

сле этого рычаги 11 освобождаются и с помощью гайки 13 создаётся необходимый натяг по лимбу на её торце. Гайка 13 стопорится контргайкой 14 и станок готов к работе.

Эксплуатация инерционного нагружателя показала его надёжность, при этом сократилось время настройки и повысилось качество гибки труб.

Библиографический список

1. Лакирев, С.Г. Патент 818707(РФ). Способ гибки труб / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич. – В.И. – 1981. – № 13.

2. Лакирев, С.Г. Особенности холодной гибки труб диаметром 100–200 мм / С.Г. Лакирев, А.В. Козлов, Ю.Г. Миков, А.В. Бобылев // Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1997. – 193 с.

К содержанию

УДК504.54+621.431.73

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН РАССЕИВАНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ АВТОМОБИЛЕЙ

В.С. Петухов

Описана токсичность выхлопных газов, определено количество выбрасываемых газов автотранспортом на основных магистралях г. Миасса, рассчитаны зоны рассеивания выхлопных газов при преобладающем направлении ветра.

Ключевые слова: выхлопные газы, токсичность, зона рассеивания, диоксид азота, оксид углерода, бенз(а)пирен.

По данным ГИБДД, прирост транспорта в России составляет в среднем 5,5 % в год и насчитывает в настоящее время более 50 миллионов автомобилей. Рост автопарка приводит к увеличению загрязнения окружающей среды выхлопными газами. В связи с этим оценка уровня воздействия автомобиля на окружающую среду является актуальной [3, 5, 6, 7].

Выхлопные газы – отработавшее в двигателе рабочее тело. Они являются продуктами окисления и неполного сгорания углеводородного топлива [7].

Основными составляющими выхлопных газов являются диоксид азота, бенз(а)пирен, оксид углерода, формальдегид, диоксид серы [3, 6].

Токсическое действие диоксида азота сводится к воздействию в основном на дыхательную систему организма. Имеются данные о снижении сопротивляемости организма к заболеваниям, и усиления действия канцерогенных веществ [2].

Бенз(а)пирен – химическое соединение, представитель семейства полициклических углеводородов, вещество первого класса опасности. Является наиболее типичным химическим канцерогеном окружающей среды, он опасен для человека даже при малой концентрации, поскольку обладает свойством биоаккумуляции [8].

Действие оксида углерода основано на вытеснении кислорода из оксигемоглобина (НЬО) крови, и образовании устойчивого соединения – карбоксигемоглобин (СОНЬ). Диссоциация СОНЬ происходит в 3600 раз медленнее, чем НЬО [2].

Формальдегид представляет собой раздражающий газ, вызывает дегенеративные процессы в паренхиматозных органах, сенсибилизирует кожу. Есть указания о сильном действии на центральную нервную систему, особенно на зрительные бугры. Однако такое действие связывают не с прямым действием формальдегида, а с наличием в техническом формалине примеси метилового спирта, а также его распадом в организме на муравьиную кислоту и метиловый спирт, избирательно поражающий зрительные бугры и сетчатку глаза [1].

Общее действие диоксида серы заключается в нарушении углеводного и белкового обмена; угнетении окислительных процессов в головном мозге, печени, селезенке, мышцах; торможении окислительного дезамиирования аминокислот и окисления пировиноградной кислоты; снижении содержания витаминов В1 и С. Токсичность резко возрастает при одновременном воздействии $S0_2$ и СО [2].

Количественную оценку выделяющихся при движении автомобиля газов проводили согласно методике определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов утвержденную приказом Госкомэкологии России № 66 от 16 февраля 1999 года [4].

Выброс i-го вредного вещества автотранспортным потоком ($M_{ki}^{П}$) определяли для конкретной автомагистрали, на всей протяженности которой, структура и интенсивность автотранспортных потоков изменялась не более, чем на 20–25 % по формуле:

$$M_L = \frac{L}{3600} \sum_1^k M_{ki}^{П} G_k K_{ki} \quad (1)$$

где $M_{ki}^{П}$ (г/км) – пробеговый выброс i-го вредного вещества автомобилями k-й группы для городских условий эксплуатации;

k – количество групп автомобилей;

G_k(1/час) – фактическая наибольшая интенсивность движения, т.е. количество автомобилей каждой из К групп, проходящих через фиксированное сечение выбранного участка автомагистрали в единицу времени в обоих направлениях по всем полосам движения;

K_{ki} – поправочный коэффициент, учитывающий среднюю скорость движения транспортного потока;

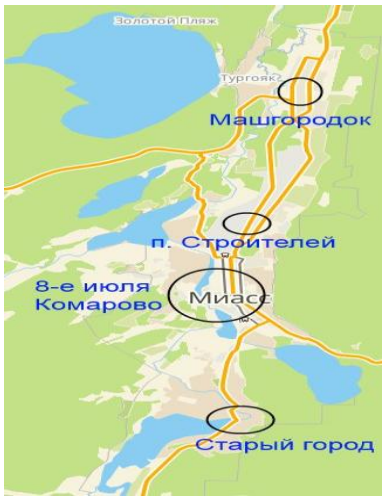
L (км) – протяженность автомагистрали (или ее участка).

Для моделирования границ участков с превышением ПДК по веществам, содержащихся в выхлопных газах, определяли длину (В):

$$B=\frac{M_{ki}^{П}92\times10^5}{ПДК\times L\times h}, \quad (2)$$

условного эллиптического цилиндра шириной (L) равной длине исследуемого участка. За высоту (h) фигуры брали среднюю высоту пятиэтажного дома для районов города с высотными застройками, и высоту двухэтажного дома, для районов с преобладанием частного сектора. Объем цилиндра рассчитывали исходя из ПДК по конкретному веществу, время выделения газов взяли равным 8 часам.

Для определения количества машин проходящих за единицу времени через фиксированную длину участка в городе было выбрано пять точек согласно рисунку.



Точки подсчета количества машин
на территории города

На основании проведенных исследований были получены следующие результаты (табл. 1). При равной длине участков в районе ул. 8-е Июля и ул. Лихачева (район Комарово), на первом участке за счет разрешенного движения грузового автотранспорта выделение составляющих выхлопных газов значительно превышает показатели второго участка. Так, оксида углерода и диоксида азота в районе ул. 8-е Июля выделяется в среднем на 44,5 % больше чем в районе Комарово, формальдегида – на 80 %, бенз(а)пирена – на 51 %.

Таблица 1

Выделение составляющих выхлопных газов в различных районах г. Миасса

Район города	Выделение, г/с				
	Оксид углерода	Диоксид азота	Диоксид серы	Формальдегид	Бенз(а)пирен, 10^{-6}
8-е Июля	1,58	0,142	0,0109	0,00143	0,148
Комарово	0,885	0,077	0,00318	0,00028	0,075
Старый город	2,44	0,172	0,00796	0,00074	0,191
Строителей	0,618	0,0472	0,00206	0,00019	0,0506
Машгородок	0,416	0,0312	0,0014	0,00013	0,0332

Наибольшее выделение составляющих выхлопных газов наблюдалось в районе Старого города, что так же вызвано большим количеством грузовых машин, проходящих по данной автомагистрали.

Значительное выделение выхлопных газов в исследуемых точках обуславливает покрытие ими большой зоны района г. Миасса с превышением ПДК (табл. 2)

Таблица 2

Зона покрытия составляющих выхлопных газов
с превышением ПДК в различных районах города

Составляющая	пдк, мг\м3	В,м				
		8-е Июля	Комарово	Старый город	Строителей	Машгородок
CO	3	309	637	2572	134	180
NO2	0,04	2054	4156	13600	767	1016
SO2	0,05	128	137	503	27	36
Формальдегид	0,003	280	201	780	41	56
Бенз(а)пирен	0,0000001	869	1626	6041	329	433

Из данных таблицы видно, что максимальная зона покрытия с превышением ПДК наблюдается в Старом городе, минимальная – в поселке строителей. На всех участках большую площадь загрязняет диоксид азота, далее в порядке уменьшения границы с превышением ПДК располагаются оксид углерода, бенз(а)пирен, формальдегид и диоксид серы.

Таким образом, результаты проведённых экспериментальных исследований показывают, что выделение составляющих выхлопных газов резко возрастает на магистралях с разрешенным движением грузового транспорта. Моделирование зон распространения газов в окружающей среде с превышением ПДК показывает, что максимальную площадь займут такие газы диоксид азота и бенз(а)пирен. Для снижения негативного воздействия на жителей города можно предложить строительство объездной дороги для грузового транспорта.

Библиографический список

1. Лазарев, Н.В. Справочник для химиков, инженеров и врачей. В 3 т. Т. 1: Вредные вещества в промышленности / Н.В. Лазарев. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: «Химия», 1976. – 571 с.

2. Лазарев, Н.В. Справочник для химиков, инженеров и врачей. В 3 т. Т. 3: Вредные вещества в промышленности / Н.В. Лазарев. – 7-е изд., перераб. и доп. – Л.: «Химия», 1976. – 593 с.

3. Лобанов, А.И. Оценка воздействия выбросов автотранспортных средств на воздушную среду города и их минимизация: автореф. дис. … канд. техн. наук / А.И. Лобанов. – Красноярск, 2004. – 19 с.

4. Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов. – URL: http://www.info-sait.ru/norma_doc/45/45343/index.html.

5. Статистические данные ГИБДД РФ. – URL: http://www.gibdd.ru/stat.

6. Сюй, Вэньин Выбросы автотранспорта и транспортный шум как факторы риска для здоровья населения мегаполисов: автореф. дис. … канд. тех. наук / Вэньин Сюй. – М., 1999. – 19 с.

7. Тишкин, С.А. Оценка влияния вредных выбросов грузового автотранспорта на экологическую обстановку в районе его действия: автореф. дис. … канд. тех. наук / С.А. Тишкин. – М., 2012. – 19 с.

8. Токсикологическая характеристика бенз(а)пирена. – URL: http://ru.wikipedia.org.

К содержанию

УДК 681.3.06
П371

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ СКВОЗНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ В ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ

А.В. Плаксин

Выполнен анализ основных направлений и стратегий использования САПР в машиностроении. Предложена концепция применения САПР в подготовке студентов технических направлений.

Ключевые слова: САПР; CAD; CAM; CAE; технология; конструирование; машиностроение.

Прогресс в развитии компьютерной техники, в конце 90-х начале 2000-х годов, открыл для предприятий машиностроения принципиально новые возможности в организации процессов проектирования изделий, подготовки и сопровождения производства. В этот период вычислительные мощности персональных компьютеров достигли уровня дорогостоящих графических станции, что позволило устанавливать на них и успешно применять прикладное программное обеспечение (ПО) позволяющее автоматизировать решение задач проектирования и подготовки производства. Если ранее, на предприятиях, в силу дороговизны, как аппаратных, так и программных средств, такими системами автоматизированного проектирования (САПР) могло воспользоваться небольшое число специалистов и решался с их помощью довольно узкий круг наиболее сложных задач, то появление доступной и мощной компьютерной техники, наряду с бурным развитием прикладного ПО привело к тому, что все инженеры предприятия получили возможность использовать САПР для решения повседневных задач на всех этапах жизненного цикла изделия. Таким образом, процесс конструкторско-технологической подготовки производства вышел на новый качественный уровень – уровень автоматизации процессов проектирования и производства, где САПР стал основным рабочим инструментом проектировщика. Для предприятий стало очевидно, что освоение данных технологий позволяет существенно ускорить выпуск новой продукции, обеспечив более высокое качество при одновременном снижении затрат на подготовку ее производства. Однако эффективность использования систем автоматизированной конструкторско-технологической подготовки производства напрямую засвистит от квалификации специалистов в области САПР, от выбора правильных стратегий их применения и организации работы предприятия. Таким образом, современный инженер-конструктор или технолог должен быть не только хорошим специалистом в своей

предметной области, но и иметь профессиональные навыки работы с компьютерной техникой и средствами автоматизированного проектирования.

В свою очередь перед учреждениями высшего профессионального образования встает задача подготовки специалистов отвечающих современным требованиям.

В настоящее время в большинстве учебных планов по подготовки специалистов и бакалавров технических направлений предусмотрены такие дисциплины как информатика, компьютерная графика, автоматизированное проектирование (для конкретной прикладной области), программы поддержки инженерных расчетов и т.п. Однако, отсутствует единая концепция в информационной подготовки студентов, сочетающая, как получение фундаментальных знаний в области САПР, так и навыков практического использования компьютерных технологий в качестве основного инструмента решения прикладных задач. Создание такой концепции требует определиться на основе какого прикладного ПО следует строить учебный процесс и какие задачи при этом необходимо решать.

На сегодняшний день существует устоявшаяся классификация машиностроительных САПР обусловленная их назначением в соответствии тем или иным этапам жизненного цикла [1, 2]. Здесь выделяют 3 типа систем. Первые из них это системы конструкторского проектирования – CAD (Computer Aided Design). Основная функция данных систем – определение геометрии конструкции (геометрическое моделирование), создание конструкторской документации. Далее идут системы технологической подготовки производства – CAM (Computer Aided Manufacturing). В узком смысле под ними понимаются системы для разработки управляющих программ для различного технологического оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), а также промышленных роботов. Однако более широкий подход требует включения в эту группу систем разработки технологических процессов механической обработки (как универсальных, так и с пользованием станков с ЧПУ), сборки, а также дополнительных модулей расширяющих базовые возможности CAD-систем для проектирования таких технологий, как штамповка, литье металлов и пластмасс, автоматизирующие конструирование соответствующей оснастки. Системы инженерного анализа или расчетов – CAM (Computer Aided Engineering). Это системы моделирования позволяющие изучить поведение продукта в процессе его эксплуатации с целью усовершенствования и оптимизации его конструкции. К данному типу следует отнести также системы моделирующие поведение изделия в процессе его изготовления – обработки давлением, термической обработки, литья и т.п.

Каждому из этих типов соответствует довольно большое число коммерчески доступного ПО. В этой ситуации, как на предприятиях, так и в учреждениях высшего профессионального образования, выбор программ-

ного продукта определяется пониманием целей использования САПР в промышленности. Соответственно целям можно выделить две основные стратегии применения автоматизированного проектирования на предприятиях, которые и закладываются в основу архитектуры соответствующего ПО при его разработке:

– облегчение и упрощение работы инженера;

– создание более совершенных изделий и технологий, повышение эффективности производства.

Первая лежит в основе «легких» и «средних» САПР, использование которых не требует пересмотра традиционных методик проектирования. Цель данных систем снабдить пользователя удобными инструментами для работы с геометрией и оформления конструкторско-технологической документации, предоставить библиотеки типовых элементов, базы знаний, автоматизировать выполнение типовых расчетов и часто повторяющихся операций. Это делает данное ПО весьма привлекательным для конечного пользователя. Однако не создает существенных предпосылок для повышения эффективности работы предприятия в целом. Как правило, это системы класса CAD, CAM, CAD/CAM и некоторые CAE-системы.

Вторая стратегия реализуется «тяжелыми» САПР класса CAD/CAM/CAE. Данные системы (их также называют системы сквозного проектирования) содержат в себе инструменты, которые в корне меняют подходы, как к проектированию изделий и технологий, так и в целом к организации конструкторско-технологической подготовки производства. В качестве таких инструментов можно выделить:

– мощные средства геометрического моделирования с поддержанием непрерывности сопряжений поверхностей по кривизне. Данный инструмент позволяет создавать сложную 3D геометрию изделий, детально прорабатывая и однозначно определяя все элементы топологии присущие будущей детали, как видовые и аэродинамические поверхности, так и элементы технологического назначения – литейные, штамповочные уклоны и скругления. А также создает возможностью изготовления изделий с высокой точностью на станках с ЧПУ или средствами 3D-печати по разработанным геометрическим моделям. Наличие таких технологий позволяет воспринимать последние как реальные физические объекты;

– сквозную параметризацию и ассоциативность. Данная технология обеспечивает взаимосвязь, как различных элементов моделей, так и в целом конструкторской и технологической частей проекта, позволяя при изменении исходных данных автоматически проводить модификацию по всей цепочке моделей;

– средства оптимизации и поиска решений (поведенческое моделирование). Это инструмент позволяющий создавать геометрические модели, автоматически удовлетворяющие заданным свойствам (таким как ми-

нимальная масса, равенство площади или объема определенному значению, расположение центра тяжести в требуемой координате и т.п.), при изменении исходных данных;

– технологию нисходящего проектирования. Применение данной технологии необходимо для эффективного проектирования механизмов и неподвижных сборных конструкций. Инструменты нисходящего проектирования позволяют распараллелить работу между несколькими исполнителями, обеспечив параметризацию и ассоциативность всех частей проекта;

– интеграцию с PLM-системой (система управления жизненным циклом изделия). Организация процесса конструкторско-технологической подготовки и сопровождение изделия под управлением PLM-системы позволяет упорядочить работу с информацией, и получить инструменты для его контроля.

Грамотное освоение систем сквозного проектирования создает серьезные предпосылки к повышению эффективности работы предприятия в целом, к выходу производства на новый технологический уровень. Но при этом требуют от пользователя существенного повышения квалификации, в плане овладения данными инструментами, пересмотра устоявшихся методик проектирования и приемов работы. Предъявляется более высокие требования к уровню ответственности и технологической дисциплине специалиста. В силу таких высоких требований предприятия испытывают серьезные затруднения при внедрении тяжелых САПР и зачастую не способны самостоятельно их освоить, делая в результате выбор в пользу легких или средних систем, что существенно сдерживает развитие машиностроительной отрасли в целом.

Учитывая выше сказанное учреждениям высшего профессионального образования можно предложить следующую концепцию информационной подготовки студентов. Данная концепция предполагает освоение трех блоков знаний (см. таблицу).

Таблица

Основные блоки знаний в информационной подготовке студентов

I. Основные инструменты	II. Дополнительный инструментарий	III. Информатика – общие вопросы
1. Система сквозного проектирования – CAD/CAM/CAE. 2. Узкоспециализированные CAD, CAM, и CAE системы. 3. Связь между системой сквозного проектирования и узкоспециализированными системами.	1. Математические пакеты. 2. Языки программирования. 3. CAD – 2D	1. Операционные системы. 2. Офисные приложения. 3. Аппаратные средства. 4. Сети, интернет.

В качестве основной, используемой в учебном процессе, САПР следует выбрать систему сквозного проектирования класса CAD/CAM/CAE. Освоение CAD модуля системы должно начаться в курсе компьютерная графика, на основе предшествующих курсов начертательной геометрии и инженерной графики. В данном курсе изучаются инструменты 3D моделирования и средства создания конструкторской документации, на основе полученных геометрических моделей. Знания, приобретенные в курсе компьютерной графики, являются основой для выполнения курсовых проектов последующих дисциплин профессионального цикла. Однако и сами эти курсы уже необходимо пересматривать, давая на практических занятиях методики проектирования с учетом рассмотренного выше инструментария тяжелых САПР. Так в курсах деталей машин и, например, оборудования (применительно к конкретному профилю подготовки) необходимо изучать технологию нисходящего проектирования, задействовать CAE-модуль для выполнения расчетов кинематики, динамики, энергетики механизма, прочности деталей его конструкции. С учетом возможностей синтеза механизмов, открываемых инструментарием тяжелых САПР, курс теории машин и механизмов вообще нуждается в кардинальном пересмотре.

Дисциплины технологической направленности, наряду с освоением соответствующих CAM-модулей, должны давать методики проектирования, обеспечивающие ассоциативную связь между деталью, технологическими переходами, инструментом (штампы, пресс-формы, литейная оснастка), приспособлениями, соответствующей конструкторско-технологической документацией.

В ряде случаев возникает необходимость использование узкоспециализированных САПР, такие как системы моделирования процессов штамповки или литья, течения жидкостей и газа. В этом случае, должны быть разработаны методики работы, обеспечивающие передачу данных между системой сквозного проектирования узкоспециализированной САПР.

Помимо основного инструмента САПР, информационная подготовка студентов должна предусматривать освоение математических пакетов, языков программирования, чертежных 2D-систем, как вспомогательного инструментария, а также изучение общих вопросов курса информатики.

Умение работать в математически пакетах и владение языками программирования расширяют возможности использования средств параметризации и поведенческого моделирования в тяжелых САПР, позволяет освоить инструментарий создания пользовательский приложений интегрированных в данные системы, что выводит процесс проектирования еще на более высокий уровень автоматизации. Освоение же 2D-систем имеет цель дать студентам простой и эффективный инструмент для выполнения простеньких чертежей, эскизов, схем, планировок зданий и создания разного рода иллюстративного материала.

Сложность реализации данной концепции связана в первую очередь с необходимостью серьезной переподготовки преподавательского состава и с их желанием творчески подойти к пересмотру читаемых ими курсов. Но тем не менее, взяв ее на вооружение, начиная с курса компьютерной графики, и вовлекая по мере готовности преподавателей технических дисциплин, вполне возможно выйти в подготовке студентов уровень отвечающий современным требованиям промышленности.

Библиографический список

1. Ли, К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.

2. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов / И.П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.:Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.

К содержанию

УДК 629.76: 519.8: 623.454.244: 621.373.8: 681.7.068: 519.8

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ИНИЦИИРОВАНИЯ ПИРОСРЕДСТВ РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА ПО МЕТОДУ БЕЛМАНА-ЗАДЕ

М.И. Решетников, В.Г. Зезин

В работе описана методика, использующая нечеткий логический вывод с применением принципа Беллмана-Заде, позволяющая осуществить многокритериальный анализ для выбора типа системы инициирования пироэнергосредств на начальном этапе проектирования.

Ключевые слова: нечеткое множество, принцип Беллмана-Заде, система инициирования пиросредств, многокритериальный анализ.

В настоящее время при выборе наилучшего варианта конструктивно-схемного исполнения вспомогательных ракетных систем все еще достаточно широко распространен традиционный подход, когда производится сравнение различных вариантов по одному – двум критериям, имеющим надежно определяемое численное выражение (например, масса, вероятность безотказной работы). Непосредственно же решение о выборе принимается конструктором, по существу, субъективно эвристически с учетом, по возможности, и других критериев, характеризуемых качественно (например, безопасность, стойкость к внешним факторам, степень отработки).

Вместе с тем постоянно возрастающие требования к качеству разработки ракетно-космической техники при ужесточении финансирования обуславливают необходимость использования многокритериального анализа с формированием единого, обобщенного показателя, характеризующего качество системы в целом с учетом всех частных критериев. Именно этого требует современная идеология системного подхода к разработке.

Рассмотрим начальную стадию проектирования ракетного комплекса, когда облик ракеты еще окончательно не сформирован и такие характеристики систем, как масса, надежность и т.п. не могут быть определены с достаточной степенью достоверности. Вследствие этого многокритериальный анализ при выборе наилучшего варианта приходится делать в условиях значительной степени неопределенности.

Методология многокритериального анализа в настоящее время достаточно хорошо разработана для решения задач в экономической и социальной сферах [1, 2, 3]. Для описания неопределенности современная теория принятия решений широко применяет аппарат теории нечетких множеств, в рамках которой, задачи, подобные рассматриваемой нами, часто решаются с использованием принципа Беллмана-Заде [4, 5]. В настоящей работе показано, каким образом указанный метод может быть применен для решения задачи выбора типа системы инициирования.

В общем случае задача многокритериального анализа заключается в следующем. Рассматривается множество альтернатив $\boldsymbol{S}=\{S_1,S_2,...S_k\}$ (в нашем случае это множество типов систем инициирования), каждая из которых должна удовлетворять множеству ограничений $\boldsymbol{G}=\{G_1,G_2,...,G_n\}$ и оценивается по критериям сравнения из множества $\boldsymbol{C}=\{C_1,C_2,...,C_m\}$. Комплексная оценка качества *j*-ой альтернативы формируется как результат некоторой свертки, переводящей вектор $\mathbf{d}_j=\{d_{j1},d_{j2},...,d_{jm}\}$ результатов оценок альтернативы по каждому критерию C_i в скаляр D_j. В итоге получается множество оценок $\boldsymbol{D}=\{D_1,D_2,...D_k\}$. Лучшей оценке из этого множества соответствует и лучшая альтернатива.

Введем параметр $\mu_{C_i}(S_j)\in[0,1],\ i=\overline{1,m},\ j=\overline{1,k}$, которым будем оценивать вариант S_j по критерию C_i. Чем больше $\mu_{C_i}(S_j)$, тем лучше вариант S_j по критерию C_i. Тогда критерий C_i можно представить нечетким множеством $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$ на универсуме $\boldsymbol{S}$:

$$\tilde{\boldsymbol{C}}_i=\left\{\frac{\mu_{C_i}(S_1)}{S_1},\frac{\mu_{C_i}(S_2)}{S_2},...,\frac{\mu_{C_i}(S_k)}{S_k}\right\},$$

где $\mu_{C_i}(S_j)$ – степень принадлежности элемента S_j универсума нечеткому множеству $\tilde{\boldsymbol{C}}_i$. Она характеризует степень соответствия альтернативы понятию, характеризуемому данным критерием.

Ограничения также могут рассматриваться, как нечеткие множества со своими функциями принадлежности:

$$\tilde{\boldsymbol{G}}_i = \left\{ \frac{\mu_{G_i}(S_1)}{S_1}, \frac{\mu_{G_i}(S_2)}{S_2}, \ldots \frac{\mu_{G_i}(S_k)}{S_k} \right\}, i = \overline{1,n}.$$

Тогда применение к множеству $\boldsymbol{S}$ определенных таким образом критериев и ограничений сформирует нечеткое множество итоговых оценок качества альтернатив (сам метод формирования итоговых оценок будет обсуждаться несколько позже):

$$\tilde{\boldsymbol{D}} = \left\{ \frac{\mu_D(S_1)}{S_1}, \frac{\mu_D(S_2)}{S_2}, \ldots \frac{\mu_D(S_k)}{S_k} \right\}.$$

Функция принадлежности $\mu_D(S_j)$ этого нечеткого множества показывает, насколько хорошо эта оценка удовлетворяет нечетким целям и нечетким ограничениям.

Согласно принципу Беллмана–Заде [4], наилучшей будет альтернатива, которая в наибольшей степени одновременно удовлетворяет всем ограничениям и критериям, а нечеткое решение представляет собой пересечение ограничений и частных критериев [4, 5]:

$$\tilde{\boldsymbol{D}} = \tilde{\boldsymbol{G}}_1 \cap \tilde{\boldsymbol{G}}_2 \cap \ldots \cap \tilde{\boldsymbol{G}}_n \cap \tilde{\boldsymbol{C}}_1 \cap \tilde{\boldsymbol{C}}_2 \cap \ldots \cap \tilde{\boldsymbol{C}}_m, \quad (16)$$

что соответствует операции конъюнкции соответствующих функций принадлежности:

$$\mu_D = \mu_{G_1} \wedge \mu_{G_2} \wedge \ldots \wedge \mu_{G_n} \wedge \mu_{C_1} \wedge \mu_{C_2} \wedge \ldots \wedge \mu_{C_m}.$$

Если критерии и ограничения имеют различную важность, то водятся коэффициенты относительной важности ограничений $\alpha_i \in (0,1)$ $i = \overline{1,m}$ и критериев $\beta_j \in (0,1)$ $j = \overline{1,n}$:

$$\sum_{i=1}^{n} \alpha_i + \sum_{j=1}^{m} \beta_j = 1.$$

В этом случае функция принадлежности решения определяется так:

$$\mu_D = \left(\mu_{G_1}\right)^{\alpha_1} \wedge \left(\mu_{G_2}\right)^{\alpha_2} \wedge \ldots \wedge \left(\mu_{G_n}\right)^{\alpha_n} \wedge \left(\mu_{C_1}\right)^{\beta_1} \wedge \left(\mu_{C_2}\right)^{\beta_2} \wedge \ldots \wedge \left(\mu_{C_m}\right)^{\beta_m}.$$

В соответствии с правилами выполнения операций над нечеткими множествами (16) эквивалентно равенству:

$$\tilde{\boldsymbol{D}} = \left\{ \frac{\min\limits_{\substack{i=\overline{1,n} \\ j=\overline{1,m}}} \left(\mu_{G_i}(S_1), \mu_{C_j}(S_1) \right)}{S_1}, \ldots, \frac{\min\limits_{\substack{i=\overline{1,n} \\ j=\overline{1,m}}} \left(\mu_{G_i}(S_k), \mu_{C_j}(S_k) \right)}{S_k} \right\}. \quad (17)$$

Полученное нечеткое множество $\tilde{\boldsymbol{D}}$ дает в качестве наилучшего варианта D тот, у которого наибольшая функция принадлежности:

$$D = \arg\max\left(\mu_D(S_1), \mu_D(S_2), \ldots, \mu_D(S_k) \right). \quad (18)$$

Если критерии имеют различную степень важности, то степень принадлежности нечеткого множества $\tilde{\boldsymbol{D}}$, в соответствии с подходом, предложенным Р. Егером [6], находится, как:

$$\mu_D(S_j) = \min_{\substack{i=\overline{1,n} \\ l=\overline{1,m}}} \left[\left(\mu_{G_i}(S_j) \right)^{\alpha_i}, \left(\mu_{C_l}(S_j) \right)^{\beta_l} \right], \quad j = \overline{1,k}, \quad (19)$$

где α_i, β_l – коэффициенты относительной важности ограничения G_i и критерия C_l соответственно. Показатели степени в (19) концентрируют нечеткое множество в соответствии с мерой важности ограничений и критериев.

На рассматриваемом этапе разработки при сравнении систем по тому или иному критерию используются экспертные оценки. Поэтому для определения функций принадлежности целесообразно применить метод парных сравнений альтернативных вариантов с помощью 9-бальной шкалы Саати [3, 7]. Для этого экспертно определяется уровень преимущества a_{ij} системы S_i над системой S_j $\left(i, j = \overline{1,k}\right)$ с использованием данных табл. 1.

Таблица 1

Уровень преимущества S_i над S_j	a_{ij}	Уровень преимущества S_i над S_j	a_{ij}
Отсутствует	1	Почти явное	6
Почти слабое	2	Явное	7
Слабое	3	Почти абсолютное	8
Почти существенное	4	Абсолютное	9
Существенное	5		

Результаты представляются в виде матрицы:

$$\mathbf{A} = \begin{array}{c} \\ S_1 \\ S_2 \\ \ldots \\ S_k \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} S_1 & S_2 & \ldots & S_k \end{array} \\ \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots & a_{1k} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots & a_{2k} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{k1} & a_{k2} & \ldots & a_{kk} \end{bmatrix} \end{array},$$

которая является диагональной $\left(a_{ii}=1,\ i=\overline{1,k}\right)$ и обратно симметричной $\left(a_{ij}=1/a_{ji},\ i,j=\overline{1,k}\right)$. Степени принадлежности принимают равными соответствующим координатам собственного вектора $\mathbf{w}=\left[w_1,w_2,...,w_n\right]^T$ матрицы парных сравнений **A**:

$$\mu\left(S_i\right)=w_i,\quad i=\overline{1,k}\,.$$

Собственный вектор находят из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases}\mathbf{Aw}=\lambda_{\max}\mathbf{w},\\ w_1+w_2+...+w_n=1,\end{cases} \tag{20}$$

где λ_{max} – максимальное собственное значение матрицы **A**.

Для определения коэффициентов относительной важности критериев и ограничений также можно применить процедуру парных сравнений по шкале Саати.

Сравним три вида проектируемых систем: низковольтная S_1, высоковольтная S_2 и лазерная S_3 с целю выбора наилучшего варианта. Сравнение систем будем проводить, например, по следующим критериям: C_1 – надежность функционирования; C_2 – габаритно-массовые характеристики; C_3 – безопасность при эксплуатации; C_4 – стойкость к внешним факторам; C_5 – диагностируемость при наземной эксплуатации; C_6 – стоимость; C_7 – параметры долговечности; C_8 – энергопотребление.

Результаты сравнительных экспертных оценок по указанным критериям, выраженные в лингвистической форме, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критерий	Преимущество системы	Критерий	Преимущество системы
C_1	S_1 над S_2 почти слабое S_1 над S_3 почти слабое S_2 над S_3 отсутствует	C_5	S_2 над S_1 слабое S_3 над S_1 абсолютное S_3 над S_2 абсолютное
C_2	S_1 над S_2 слабое S_1 над S_3 слабое S_2 над S_3 отсутствует	C_6	S_1 над S_2 почти явное S_1 над S_3 явное S_2 над S_3 почти слабое
C_3	S_2 над S_1 слабое S_3 над S_1 абсолютное S_3 над S_2 явное	C_7	S_3 над S_1 почти слабое S_3 над S_2 почти слабое S_2 над S_1 почти слабое
C_4	S_2 над S_1 слабое S_3 над S_1 явное S_3 над S_2 явное	C_8	S_3 над S_1 почти абсолютное S_3 над S_2 абсолютное S_1 над S_2 почти слабое

Матрицы парных сравнений, соответствующие данным высказываниям, имеют вид:

$$\mathbf{A}(C_1)=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix}, \mathbf{A}(C_2)=\begin{bmatrix}1 & 3 & 3\\ 1/3 & 1 & 1\\ 1/3 & 1 & 1\end{bmatrix}, \mathbf{A}(C_3)=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}(C_4)=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix}, \mathbf{A}(C_5)=\begin{bmatrix}1 & 3 & 3\\ 1/3 & 1 & 1\\ 1/3 & 1 & 1\end{bmatrix}, \mathbf{A}(C_6)=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A}(C_7)=\begin{bmatrix}1 & 2 & 2\\ 1/2 & 1 & 1\\ 1/2 & 1 & 1\end{bmatrix}, \mathbf{A}(C_8)=\begin{bmatrix}1 & 3 & 3\\ 1/3 & 1 & 1\\ 1/3 & 1 & 1\end{bmatrix}.$$

Решая систему (20), для каждой матрицы, находим степени принадлежности систем нечетким множествам критериев $\mu_{C_i}(S_j)$, величины которых приведены в табл. 3.

Таблица 3

Система	Степень принадлежности $\mu_{Ci}(S_j)$							
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
S_1	0,5	0,6	0,07	0,08	0,06	0,76	0,2	0,12
S_2	0,25	0,2	0,14	0,16	0,13	0,15	0,31	0,07
S_3	0,25	0,2	0,79	0,76	0,81	0,09	0,49	0,81

Соответствующие данным степеням принадлежности нечеткие множества критериев имеют вид:

$$\tilde{C}_1=\left\{\frac{0,50}{S_1},\frac{0,25}{S_2},\frac{0,25}{S_3}\right\};\quad \tilde{C}_2=\left\{\frac{0,60}{S_1},\frac{0,20}{S_2},\frac{0,20}{S_3}\right\};\quad \tilde{C}_3=\left\{\frac{0,07}{S_1},\frac{0,14}{S_2},\frac{0,79}{S_3}\right\};$$

$$\tilde{C}_4=\left\{\frac{0,08}{S_1},\frac{0,16}{S_2},\frac{0,76}{S_3}\right\};\quad \tilde{C}_5=\left\{\frac{0,06}{S_1},\frac{0,13}{S_2},\frac{0,81}{S_3}\right\};\quad \tilde{C}_6=\left\{\frac{0,76}{S_1},\frac{0,15}{S_2},\frac{0,09}{S_3}\right\};$$

$$\tilde{C}_7=\left\{\frac{0,20}{S_1},\frac{0,31}{S_2},\frac{0,49}{S_3}\right\};\quad \tilde{C}_8=\left\{\frac{0,12}{S_1},\frac{0,07}{S_2},\frac{0,81}{S_3}\right\}.$$

Результаты парных сравнений критериев в лингвистической форме приведены в табл. 4.

Таблица 4

Преимущество критерия	Преимущество критерия	Преимущество критерия
C_1 над C_2 существенное	C_1 над C_3 отсутствует	C_1 над C_4 почти слабое
C_1 над C_5 слабое	C_1 над C_6 явное	C_1 над C_7 почти существенное
C_1 над C_8 существенное	C_3 над C_2 почти явное	C_4 над C_2 существенное
C_5 над C_2 почти существенное	C_2 над C_6 почти слабое	C_7 над C_2 слабое
C_8 над C_2 почти слабое	C_3 над C_4 почти слабое	C_3 над C_5 слабое
C_3 над C_6 явное	C_3 над C_7 почти существенное	C_3 над C_8 существенное
C_4 над C_5 почти слабое	C_4 над C_6 почти явное	C_4 над C_7 слабое
C_4 над C_8 почти существенное	C_5 над C_6 существенное	C_5 над C_7 почти слабое
C_5 над C_8 слабое	C_7 над C_6 почти существенное	C_8 над C_6 слабое
C_7 над C_8 почти слабое		

Этим экспертным высказываниям соответствует следующая матрица парных сравнений:

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 & 2 & 3 & 7 & 4 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1/6 & 1/5 & 1/4 & 2 & 1/3 & 1/2 \\ 1 & 6 & 1 & 2 & 3 & 7 & 4 & 5 \\ 1/2 & 5 & 1/2 & 1 & 2 & 6 & 3 & 4 \\ 1/3 & 4 & 1/3 & 1/2 & 1 & 5 & 2 & 3 \\ 1/7 & 1/2 & 1/7 & 1/6 & 1/5 & 1 & 1/4 & 1/3 \\ 1/4 & 3 & 1/4 & 1/3 & 1/2 & 4 & 1 & 2 \\ 1/5 & 2 & 1/5 & 1/4 & 1/3 & 3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Решая систему (20), для данной матрицы, находим, соответствующие коэффициенты относительной важности:

$$\alpha_1 = 0,2588;\ \alpha_2 = 0,0359;\ \alpha_3 = 0,2632;\ \alpha_4 = 0,1735;\ \alpha_5 = 0,1155;$$
$$\alpha_6 = 0,0250;\ \alpha_7 = 0,0768;\ \alpha_8 = 0,0513,$$

откуда видно, что наибольшей важностью обладают критерии C_1 (надежность) и C_3 (безопасность).

Используя полученные величины коэффициентов относительной важности, по формуле (19) находим следующие нечеткие множества:

$$\tilde{C}_1^{\alpha_1} = \left\{ \frac{0,5^{0,2588}}{S_1}, \frac{0,25^{0,2588}}{S_2}, \frac{0,25^{0,2588}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,836}{S_1}, \frac{0,699}{S_2}, \frac{0,699}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_2^{\alpha_2} = \left\{ \frac{0,5^{0,0359}}{S_1}, \frac{0,25^{0,0359}}{S_2}, \frac{0,25^{0,0359}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,982}{S_1}, \frac{0,944}{S_2}, \frac{0,944}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_3^{\alpha_3} = \left\{ \frac{0,07^{0,2632}}{S_1}, \frac{0,14^{0,2632}}{S_2}, \frac{0,79^{0,2632}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,489}{S_1}, \frac{0,606}{S_2}, \frac{0,938}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_4^{\alpha_4} = \left\{ \frac{0,08^{0,1735}}{S_1}, \frac{0,16^{0,1735}}{S_2}, \frac{0,76^{0,1735}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,639}{S_1}, \frac{0,726}{S_2}, \frac{0,955}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_5^{\alpha_5} = \left\{ \frac{0,06^{0,1155}}{S_1}, \frac{0,13^{0,1155}}{S_2}, \frac{0,81^{0,1155}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,726}{S_1}, \frac{0,790}{S_2}, \frac{0,976}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_6^{\alpha_6} = \left\{ \frac{0,76^{0,0250}}{S_1}, \frac{0,15^{0,0250}}{S_2}, \frac{0,09^{0,0250}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,993}{S_1}, \frac{0,954}{S_2}, \frac{0,942}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_7^{\alpha_7} = \left\{ \frac{0,20^{0,0768}}{S_1}, \frac{0,31^{0,0768}}{S_2}, \frac{0,49^{0,0768}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,852}{S_1}, \frac{0,914}{S_2}, \frac{0,947}{S_3} \right\};$$

$$\tilde{C}_8^{\alpha_8} = \left\{ \frac{0,120^{0,0513}}{S_1}, \frac{0,07^{0,0513}}{S_2}, \frac{0,81^{0,0513}}{S_3} \right\} = \left\{ \frac{0,898}{S_1}, \frac{0,875}{S_2}, \frac{0,989}{S_3} \right\}.$$

Пересечение этих нечетких множеств дает, в соответствии с (17) следующие величины степеней принадлежности:

$$\mu_D(S_1) = \min\{0,836; 0,982; 0,489; 0,639; 0,726; 0,993; 0,852; 0,898\} = 0,489;$$

$$\mu_D(S_1) = \min\{0,699; 0,944; 0,606; 0,726; 0,790; 0,954; 0,914; 0,875\} = 0,606;$$

$$\mu_D(S_1) = \min\{0,699; 0,944; 0,938; 0,955; 0,976; 0,942; 0,947; 0,989\} = 0,699$$

и нечеткое множество итоговых оценок систем:

$$\tilde{D} = \left\{ \frac{0,489}{S_1}, \frac{0,606}{S_2}, \frac{0,699}{S_3} \right\}.$$

В соответствии с (18), применяя операцию максимума к степеням принадлежности данного нечеткого множества, находим наилучший вариант S_{opt} системы инициирования:

$$\mu_D\left(S_{\text{opt}}\right) = \max\left\{0,489,\ 0,606,\ 0,699\right\} = 0,699 = \mu_D\left(S_3\right);$$

$$D = S_3.$$

Следовательно, в рассмотренном примере лазерная система инициирования лучше других одновременно удовлетворяет всем критериям качества с учетом их важности.

Таким образом, применение аппарата нечетких множеств и нечеткологического вывода с использованием метода Беллмана-Заде и метода иерархий Саати позволяет выполнить многокритериальный анализ систем инициирования пиросредств с формированием единого критерия качества для выбора наилучшей системы на начальном этапе проектирования ракетного комплекса.

Отметим также, что описанный метод удобен при сравнении систем инициирования и по частному критерию, такому как, например, безопасность, который сам является комплексной характеристикой. Ведь при оценке безопасности рассматриваются различные аварийные ситуации: при пожаре, при падении, при грозовом разряде и пр.

Библиографический список

1. Силов, В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке / В.Б. Силов. – М.: ИНПРО-РЕС, 1995. – 228 с.

2. Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 208 с.

3. Борисов, А.Н. Принятие решений на основе нечетких моделей: Примеры использования / А.Н. Борисов, О.А. Крумберг, И.П. Федоров. – Рига: Знание, 1990. – 184 с.

4. Беллман, Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедура принятия решений: сб. переводов. – М.: Мир, 1976. – С. 172–215.

5. Ротштейн, А.П. Нечеткий многокритериальный анализ вариантов с применением парных сравнений / А.П. Ротштейн, С.Д. Штовба // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – № 3. – С. 150–154.

6. Yager R. Multiple objective decision-making using fussy sets // Int. J. Man-Mach. Sfud., 1979. Vol. 9. № 4. Pp. 375–382.

7. Саати, Т. Математические модели конфликтных ситуаций / Т. Саати; пер. с англ. – М.: Сов. Радио, 1977. – 304 с.

К содержанию

УДК378.1

ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ В НАШЕЙ СТРАНЕ

Е.Н. Слесарев

Приведен краткий обзор истории развития отечественного технического образования. Показаны его основные преимущества перед западной моделью. Обоснована необходимость скорейшего внесения изменений в современную систему отечественного высшего технического образования.

Ключевые слова: высшее образование; управление качеством; российское техническое образование; уровень качества.

Традиции государственного технического образования в России имеют богатейшую историю. Зародились они более трех веков назад – еще в начале восемнадцатого века, когда Петр I занялся реорганизацией русской армии и строительством русского флота. Для этой работы понадобились люди, имеющие инженерное образование. Первые инженерные кадры были привлечены в Россию из Европы, но вскоре стало ясно, что необходимо готовить своих специалистов, знакомых с особенностями работы в нашей стране. В 1701 году была организована Школа математических и навигационных наук, на базе которой позднее для удовлетворения потребностей в технически грамотных кадрах были созданы Морская и Артиллерийская академии.

Интересен и государственный подход того времени, выражаясь современным языком, к «менеджменту качества» технической продукции оборонного направления. Историческим документом является Указ Петра I «О качестве» от 11 января 1723 года. В нём выражено, как должно осуществлять менеджмент качества на основе мотивации с применением кнута и пряника. В оригинале это выглядит следующим образом: «…инспекторы и их помощники должны проверять, как надсмотрщики ставят штемпели на товары. В случае сомнения они имеют право осуществлять проверки по своему усмотрению. …если армия несёт потери в битвах из-за недосмотра инспекторов и их помощников, то последних следует безжалостно высечь и примерно наказать. …я повелеваю, строить дома для инспекторов и их помощников не хуже помещичьих. Если они хуже, Демидов (назначенный царским Указом директор Тульского оружейного завода) не должен обижаться, если я прикажу его казнить».

Бурное развитие металлургического производства на Урале привело к тому, что уже во второй половине XVIII века Россия заняла первое место в мире по выплавке чугуна. Увеличение объема металлургического производства и усовершенствование его технологии связаны с работами велико-

го русского ученого М.В. Ломоносова, который в 1763 году издал свою книгу «Первые основания металлургии, или рудных дел». В 1773 году для подготовки горных инженеров был организован Горный институт императрицы Екатерины II.

Но, пожалуй, самой замечательной датой русского инженерного образования можно считать 20 ноября 1809 года, когда Александр I учредил Корпус и Институт инженеров путей сообщения.

Территория нашей страны настолько огромна, что одна средняя область больше, чем целая среднеевропейская страна. И развитие столь протяженной во всех географических направлениях страны невозможно без развитой инфраструктуры путей сообщения, выполняющей для страны функции кровеносной системы.

Усилиями выпускников и сотрудников Института путей сообщения, при мощной государственной поддержке, была разработана и создана мощнейшая в мире транспортная инфраструктура шоссейных и железных дорог, которая до сих пор составляет основу развития России. Государственный подход того времени к развитию страны демонстрирует и тот факт, что с момента основания и вплоть до революции 1917 года Министерство путей сообщения получало наиболее щедрое государственное финансирование, сопоставимое лишь с военным ведомством.

Начавшееся в то время в России строительство железных дорог поставило перед молодыми инженерами множество задач. Первая железная дорога в России была построена в 1837 году между Петербургом и Царским Селом, а в 1842 году было начато строительство железной дороги между Петербургом и Москвой. Нельзя не отметить огромный вклад в это строительство Дмитрия Ивановича Журавского (1821–1891 гг.). Сразу после окончания института он был привлечен к проектированию железной дороги Петербург – Москва. В 1844 году ему было поручено спроектировать мост через реку Веребью, одного из главных сооружений на дороге. Этот особо сложный проект был успешно воплощён в решетчатой конструкции, состоящей из 9 пролетов по 54 метра каждый. Для них было найдено оптимальное отношение крайнего и среднего пролетов неразрезной фермы. Это был деревянный мост, аналогичный мостам системы Уильяма Гау, построенным ранее в Соединенных Штатах. Однако, подобные мосты ранее строились безо всякого расчета, и Журавский был первым, кто предложил метод расчета напряжений, возникающих в элементах таких мостов от подвижной нагрузки. Каждый мостовой пролёт являлся деревянной фермой с раскосами, стянутой поперечными железными стержнями (использование двух материалов в несущих конструкциях было новшеством Журавского). Металлические элементы сделали мост значительно прочнее без существенного увеличения веса всего сооружения. Он также уточнил теорию изгиба балок. Дерево очень слабо сопротивляется сдвигу вдоль воло-

кон, из чего Журавский сделал правильный вывод о том, что в деревянных балках большой высоты касательные напряжения являются важными, и что ими пренебрегать нельзя. Существовавшая на тот момент литература не содержала каких-либо сведений о вычислении этих напряжений, и поэтому Журавский решил эту проблему самостоятельно. Его метод определения касательных напряжений в балках теперь является общепринятым и представлен во всех учебниках по сопротивлению материалов. По окончании строительства моста в 1850 году Журавский опубликовал свой метод расчета ферм. Позднее за свою работу по мостам системы Гау он был за нее удостоен Демидовской премии Российской Академией наук.

В это же время русскими инженерами был построен важнейший металлический мост (Николаевский) через реку Неву, а профессор Петр Иванович Собко (1819–1870 гг.), преподававший сопротивление материалов и постройку мостов в Институте инженеров путей сообщения, опубликовал свои работы.

На основании вышесказанного можно заключить, что обучение сопротивлению материалов и строительной механике в России в середине девятнадцатого века стояло на высочайшем мировом уровне. Работы ведущих российских инженеров издавались в переводе на иностранные языки. Изучение механических свойств строительных материалов в то время в России также соответствовало высшим мировым стандартам.

Успешный опыт организации Института инженеров путей сообщения послужил образцом правительству России для дальнейшего развития русского инженерного образования. Так в 1828 году в Санкт-Петербурге был организован Технологический институт для подготовки в России инженеров-механиков и химиков. Позднее в 1868 году в Москве на базе ремесленного училища было организовано Техническое училище, получившее известность в начале двадцатого века благодаря созданию лабораторий термодинамики и теплопередачи. В этом высшем учебном заведении благодаря ученому Н.Е. Жуковскому (1847–1921 гг.) в одном из первых в мире студенты стали выполнять практические работы в аэродинамической лаборатории и изучать основы аэродинамики.

Российская промышленность в XIX веке продолжала своё бурное развитие, и для её интеллектуальной поддержки необходимо было открывать новые высшие технические учебные заведения по многим другим отраслям техники, причем не только Санкт-Петербурге и Москве, но и в других городах, например, в Харькове и Томске. Все эти учебные заведения были организованы по примеру Института инженеров путей сообщения. Программа обучения составляла пять лет, а хорошая математическая подготовка являлась обязательным условием конкурсных вступительных экзаменов. Благодаря этому, преподавание математики, механики и физики можно было начинать на довольно высоком уровне уже на первом курсе и

дать студентам достаточную подготовку по фундаментальным предметам в первые два года. Последние три года использовались для изучения инженерных дисциплин. В течение этих лет читались лекции по техническим предметам, и от студента требовалась определенная работа в аудиториях, но большую часть времени студенты проводили в чертежных кабинетах.

После Октябрьской революции довольно-таки значительная часть профессуры, преподавателей, инженеров и технических специалистов покинули родину. И начавшуюся в 1930-х годах индустриализацию молодой советской власти приходилось осуществлять при помощи ведущих зарубежных компаний и с привлечением западных технических специалистов. Выводы были сделаны незамедлительно, и Советскому Союзу, правопреемнику Российской Империи, удалось возродить лучшие традиции российского высшего технического образования в кратчайшие сроки. И уже к началу 1940-х годов ведущими инженерно-техническими работникам на предприятиях и преподавателями в высших технических учебных заведениях стали высококвалифицированные отечественные специалисты. Советская власть очень дорожила своим инженерно-техническим кадровым потенциалом. Так студентов вузов не призывали в армию даже во время Великой отечественной войны! СССР победил в этой войне во многом благодаря техническому гению советских военных конструкторов. Именно во время Великой отечественной войны Советский Союз научился проектировать и производить лучшие в мире танки, самолеты, артиллерию и системы залпового огня. Отрадно, что эти традиции пока продолжаются…

Во время «холодной войны» СССР продолжил наращивать свой научно-технический потенциал, что не могло не беспокоить Запад. В 1957 году, после запуска Советским Союзом первого искусственного спутника Земли, к нам по поручению правительства Соединенных Штатов Америки, был направлен Степан Прокофьевич Тимошенко – выдающийся российский ученый, иммигрировавший в 1922 г. в США, основатель американской школы прикладной механики. Он посетил технические вузы Киева, Харькова, Ленинграда и Москвы. Встречался с преподавателями и студентами, изучал, собирал и обобщал опыт советского технического образования. По результатам этой поездки он сделал доклад в Конгрессе США и опубликовал в1959 году книгу «Инженерное образование в России» [1]. В этой книге он просто довольно подробно описал как готовят инженеров в России от начальной школы и до академии наук. Благодаря этой работе руководству США удалось перенять передовой российский опыт в области высшего технического образования и существенно упрочить свои позиции в этой сфере. Обидно, что мы в свою очередь в последнее время отказываемся от своих лучших традиций технического образования в пользу сомнительного западного опыта.

То, что происходит с нашим техническим образованием в настоящее время, не может не вызывать серьёзных опасений за его будущее. Конкурс на технические специальности не столь велик, как на гуманитарные, поэтому на них могут поступать ребята с более слабой школьной подготовкой. Кроме того, сама школьная подготовка по базовым для технического образования предметам – математике, физике, химии также оставляет желать лучшего. В результате первые два года обучения в техническом вузе обычно тратятся не на закрепление базовых знаний по математике, физике, механике на более высоком уровне и подготовку по фундаментальным техническим предметам, а лишь на восполнение пробелов школьного образования. Кроме того, «благодаря» введению бакалавриата общий срок обучения сократился на один год. В результате мы имеем не более двух лет полноценного технического образования вместо советских пяти лет! Это, конечно же, не может не отразиться на качестве нашего высшего технического образования.

С другой стороны, для достижения хорошего уровня качества технического образования необходим высококвалифицированный и хорошо мотивированный профессорско-преподавательский состав (ППС) вуза. Талантливая молодежь, как правило, не задерживается для работы в вузах, поскольку последние не могут предоставить им достойных условий работы – нет конкурентоспособной с другими предприятиями оплаты труда, а зачастую и современного оборудования, необходимого для реализации новых технических идей. В связи с этим средний возраст большинства технических кафедр российских вузов, мягко говоря, превышает пенсионный. Таким образом, мотивация ППС в вузах практически отсутствует, а квалификация пока сохраняется на достаточно высоком уровне благодаря «старой гвардии», но по понятным причинам долго это продолжаться не сможет.

Необходимо признать, что качество отечественного образования за годы рыночных преобразований существенно ухудшилось, по мнению одного из ведущих специалистов в области качества академика Версана: «Главная причина состоит в том, что власть осознанно не хочет видеть здесь своей роли: считается, что проблему качества должен решать рынок. На мой взгляд, это стратегическая ошибка, негативные последствия которой для нашей экономики и социальной сферы с каждым годом будут только нарастать. Более того, уверен, что замедление нашей экономики, которое сегодня наблюдается, вызвано именно этим» [2].

Наука, промышленность и другие отрасли, которые трудоустраивают наших выпускников, получают квалифицированные кадры бесплатно, а значит, не могут рассматриваться, как реальные потребители. Государство же в лице руководителей Минобразования какое–либо регулирование в сфере образования проводить к сожалению не хочет, считая, что рынок сам все отрегулирует. К сожалению, уже давно все убедились, что дикий рынок

без вмешательства государства ничего отрегулировать не может. В таких условиях построить взаимовыгодные отношения между поставщиками, которыми являются образовательные учреждения, и фактическими потребителями, т.е. наукой, промышленностью и другими отраслями, невозможно.

Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Инженерное образование в России / С.П. Тимошенко; пер. с англ. В.И. Иванова-Дятлова, под ред. Н.Н. Шапошникова, предисл. В.Н. Луканина. – Люберцы: ПИК ВИНИТИ, 1997. – 84 с.

2. Версан, В. Качество – стратегический путь возрождения России / В. Версан // Стандарты и качество. – 2013. – № 8. – С. 63–66.

К содержанию

УДК 658.5.011

РЕЗЕРВ ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ РОССИИ В БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Е.Н. Слесарев, В.А. Горшков

Рассмотрены показатели производительности труда в основных секторах Российской экономики и предложены меры по их повышению на основе таких методов систем менеджмента как инструменты бережливого производства.

Ключевые слова: Система менеджмента качества, управление качеством, бережливое производство.

«В мире, должно быть, сотни людей, которые способны повысить производительность и эффективность путём увеличения объёмов производства. ... Но очень немногие руководители могут поднять производительность труда, когда объёмы производства снижаются. Даже с одним таким человеком бизнес будет гораздо более успешным. Это решающий фактор успеха или несостоятельности предприятия!»

Тайити Оно,
основатель Toyota Production System

Темпы развития российской промышленности в настоящее время, к сожалению, не отличаются высоким ростом. При этом необходимо обратить самое пристальное внимание на такие методы систем менеджмента как инструменты «бережливого производства», поскольку в условиях медленного экономического роста на первый план выходит вопрос повышения производительности труда (ПТ).

По данным, взятым из открытых интернет-источников таких как http://ru.wikipedia.org, http://newsruss.ru, и др., производительность труда в основных секторах отечественной экономики существенно отстаёт от развитых (и даже не очень развитых) стран. Так объем ВВП на одного занятого составляет у нас лишь чуть более 1/3 от уровня США (или 3/4 от аналогичного уровня Польши).

Сравним показатели российской экономики с аналогичными показателями в США: для передачи и распределения одного и того же объема электроэнергии в России требуется в 6 раз больше людей, один отечественный строитель производит в 5 раз меньше квадратных метров, а для выплавки того же объема стали в отечественной сталелитейной промышленности требуется в 3 раза больше работников.

Возможно, в некоторых отраслях российской экономики отставание не столь существенно, однако это не меняет общей картины. Рассмотрим основные секторы отечественной экономики и возможности применения таких методов управления качеством, как инструменты бережливого производства с целью повышения ПТ в них. К трем ключевым секторам экономики можно отнести: электроэнергетику, сталелитейную промышленность и жилищное строительство.

Попробуем разобраться в этих секторах отечественной экономики, чтобы понять что и как нужно в них менять для повышения ПТ. А для того, чтобы эффективность этих мер была максимальной, все необходимые изменения нужно осуществлять очень быстро!

Российский электроэнергетический сектор занимает четвертое место в мире. Общая производительность российской электроэнергетической отрасли достаточно высока (примерно 80 % от уровня США), однако, это объясняется лишь сочетанием высокой совокупной производительности и хорошим топливным обеспечением. При этом отечественное электроэнергетическое оборудование в результате отсутствия инвестиций сильно устарело и, как следствие, ПТ в этой отрасли невысока – лишь 15 % от уровня США! Так тепловые электростанции со сроком службы более 40 лет в нашем отечестве составляют более 40 %, в то время как в США таких электростанций лишь 28 %, в Японии – 12 %, а в Китае – всего 3 %! Отчасти это объясняется высокой стоимостью строительства новых генерирующих мощностей и распределительных сетей в России. Например, расходы на строительство угольной электростанции почти в 1,5 выше, чем в Европе или Соединенных Штатах, и в три с лишним раза выше, чем в Китае!

Поскольку электроэнергетический сектор экономики является стратегически приоритетным, то и какие-либо меры воздействия на него возможно и необходимо принимать на государственном уровне. Следует стимулировать строительство новых электроэнергетических мощностей и мо-

дернизацию существующих, за счет создания среды, способствующей быстрому и недорогому строительству и ремонту, а также активнее стимулировать энергосбережение и ввести минимальные стандарты эффективности нового электрооборудования. Самим же энергетическим компаниям необходимо повышать эффективность существующих мощностей и устранять «узкие места», за счет применения современного менеджмента и методов «бережливого производства».

Российская сталелитейная промышленность традиционно является одним из мировых лидеров и по-прежнему сохраняет свою конкурентоспособность на мировом рынке. При этом ПТ в отрасли составляет всего 1/3 от уровня США. А значительный рост производства в этой отрасли в последнее время объясняется лишь увеличением загрузки производственных мощностей. Кроме того, внутри самой отрасли наблюдаются значительная неравномерность основных производственных показателей. Так три ведущих сталелитейных предприятия России обладают производительностью почти в 4 раза большей, чем предприятия, не входящие в первую десятку. Это объясняется с одной стороны устаревшими технологиями производства стали, а с другой стороны неэффективной организацией труда на предприятиях.

Для повышение ПТ в этой отрасли необходимо отказаться от устаревших технологий за счет модернизации предприятий, а также реализации программы поддержки географической и межотраслевой мобильности рабочих кадров, включающей создание курсов их профессиональной подготовки, а также оптимизировать бизнес-процессы и организацию труда на предприятиях, используя методы «бережливого производства».

Российский строительный сектор занимает значительную часть в отечественной экономике, обеспечивая около 6 % ВВП, и дает 8 % официальной занятости. В тоже время ПТ в нашем жилищном строительстве составляет всего 21 % от уровня США и около 33 % от уровня Швеции. Столь низкие показатели можно объяснить с одной стороны сравнительно небольшим применением современных материалов и конструкций, а с другой – достаточно невысокой квалификацией работников и неэффективной организацией труда в строительных компаниях. Основная причина этих проблем – отсутствие у компаний стимулов к повышению их эффективности. Зачастую, на получение необходимых разрешений и согласований при строительстве в России расходуется больше времени, чем на само строительство. На согласовательные процедуры у нас тратится в шесть раз больше времени, чем в развитых странах, и примерно вдвое больше, чем даже в развивающихся! Это существенно снижает эффективность строительного бизнеса, поскольку создает неравные условия конкуренции и напрямую ведёт к коррупции. Налицо неэффективное государственное регу-

лирование в строительном секторе и отсутствие комплексного подхода к развитию территорий. Необходимо срочное повышение эффективности системы государственного регулирования, разработки и утверждения генеральных планов развития российских территорий, а также совершенствование и реформирование системы строительного образования и переподготовки строительных кадров.

Если принять все перечисленные меры, то можно надеяться на существенный рост показателей Российской экономики. Так мировой опыт внедрения методов и инструментов «бережливого производства» показывает следующие результаты:

- рост производительности труда на 35÷70 %;
- сокращение времени производственного цикла на 25÷90 %;
- сокращение брака на 58÷99 %;
- рост качества продукции на 40 %;
- увеличение времени работы оборудования в исправном состоянии до 99 %;
- высвобождение производственных площадей на 25÷50 %.

Библиографический список

1. Оно, Т. Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / Т. Оно; пер. с англ. – М.: Институт комплексных стратегических исследований, 2005. – 192 с.

К содержанию

УДК378.11

ПОСТОЯННОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – НЕ ПРИХОТЬ, А ПОТРЕБНОСТЬ НАШЕГО ВРЕМЕНИ

Е.Н. Слесарев

Приведен краткий исторический обзор и обоснована необходимость информатизации современного образования, а также дополнительного образования как в области фундаментальных, так и профессиональных знаний.

Ключевые слова: информатизация, уровень образованности; фундаментальные и профессиональные знания; дополнительное образование.

«Нужно бежать со всех ног, чтобы только оставаться на месте, а чтобы куда-то попасть, надо бежать как минимум вдвое быстрее!»

Луис Кэрол, «Алиса в стране чудес»

Целое столетие, в течение которого может быть совершено множество открытий и изобретений названо веком информации. Именно сегодня, информация стала самым необходимым и востребованным продуктом. Спрос многократно превышает предложение. Вариантов и возможностей получить любую информацию существует очень много: от обязательного школьного образования до элитных консультаций практикующих специалистов. От этого востребованность данного продукта не уменьшается.

Информация – это единственное, чем мы можем по-настоящему обладать. Квартиры, машины, материальные ценности – все может быть утеряно в одно мгновение. Настоящее богатство каждого человека – его накопленные знания и опыт. Если у Вас есть большой багаж профессиональных знаний, всегда будет возможность выгодно его продать. Неважно кому: работодателю, инвестору, массовой аудитории слушателей. Но это стоит больших денег.

Самое выгодное и надежное вложение средств и усилий – в знания и образование. Ни один другой вклад не обладает такой прибыльностью, не дает таких доходов. Делая подобные вложения, надо осознавать, что недостаточно просто заплатить за диплом и претендовать на скорое возвращение вложенных средств. Вспоминая слова неизвестного философа: «Знание только тогда знание, когда оно приобретено усилиями своей мысли, а не памятью, чтобы стать ценностью», полезно помнить известную пословицу «Повторение – мачеха учения, применение – мать учения».

Обязательное школьное образование, а затем университетские годы – только основа, на которой строится дальнейшая жизнь человека. Диплом престижного вуза – это еще не гарантия жизненного успеха и прочных позиций в бизнесе. Знаний действительно накопилось огромное количество, и

надо прилагать усилия, чтобы стать профессионалом в какой-то области. Сегодня необходим постоянный рост индивидуальных способностей и, особенно, востребованных практических навыков. Образование для современного человека превращается в образ жизни, становится постоянным процессом.

Следует различать два вида знаний: фундаментальные и профессиональные. Фундаментальными являются знания, получаемые в школах и большинстве университетов. Они, к сожалению, обычно не могут оказать большой помощи в реальной жизни, в которой ценны лишь те знания, которым человек может найти применение. Образование, развивающее способность находить и практически применять информацию, делая это быстро и качественно, всегда востребовано.

Образованный человек отличается способностью воспринимать и затем применять на практике то, что его заинтересует.

Откуда же человек получает знания? В первую очередь это индивидуальный жизненный опыт и фундаментальное образование, о котором было сказано выше. Поэтому следует уделять особое внимание при выборе университета или другого образовательного учреждения. Следующая ступень, более близкая к достижению цели – специализации знаний – это использование публичных источников информации об определенной области (книги, публикации, интернет). И, наконец, последний шаг – специальные учебные курсы и знания, полученные из личного общения с профессионалами, то, что принято называть дополнительным образованием. К последним пунктам необходимо обращаться в течение всей жизни.

Можно пройти всю эту лестницу не один раз, но вся информация сама по себе не будет обладать никакой ценностью. Необходим конкретный план того, куда эти знания направить, и как это сделать. Решили получать дополнительное образование, сначала задумайтесь, зачем вам это нужно, где пригодится, и лишь тогда можно принимать окончательное, взвешенное решение.

Для человеческого ума менее вредно совсем не учиться, чем учиться слишком рано или слишком поздно. Необходимо обладать определенными навыками, чтобы получить любые знания и положить их на «сохранение».

Мы многое упустили из обязательной программы образования. В силу несовершенства всей системы и нашей молодости, как правило, большая часть остается без внимания. Поэтому большим спросом пользуются различные образовательные мероприятия. Безусловно, это не означает, что необходимо зачитывать школьный курс арифметики или химии заново. То, чем овладевает человек, пройдя специализированное обучение, в определенной степени компенсирует упущенные ранее возможности.

Дополнительное образование заставляет проявлять больше активности, которая в свою очередь помогает человеку добиваться больших успехов. Не зря говорят, что человек, поставивший перед собой действительно масштабную жизненную цель, всегда остается студентом. Он должен черпать знания из любого доступного источника, в особенности, если эти знания имеют самое непосредственное отношение к его задаче.

Всякому из нас необходима периодическая подпитка своего разума, произвести которую можно лишь во время общения и контактов с людьми, имеющими различный опыт и образование.

Умный человек должен постоянно развивать и совершенствовать свой ум, так же как спортсмен обязан следить за своим телом и мышцами. Отсутствие деятельности приводит к угасанию и деградации процессов, не важно, умственных или физических.

Для успешного существования в бизнесе в условиях высокой конкуренции необходимо своевременно находить новые идеи и решения, появление которых можно обеспечить только высоким уровнем образования, знаний и опять же большим кругом знакомых и друзей.

Очень хорошо отражает суть вопроса классическое высказывание: «Если я дам тебе рубль, а ты, в свою очередь, тоже дашь мне рубль, мы оба ничего не выиграем. Но если я подарю тебе идею, а ты в ответ подаришь мне свою, каждый из нас обогатится вдвое».

К содержанию

УДК 621.74(07)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКОГО АЛЮМОБОРФОСФАТНОГО СВЯЗУЮЩЕГО (АБФК) ДЛЯ ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИХ СМЕСЕЙ

А.А Солодянкин, Л.И. Иванова

Перспективными в направлении обеспечения экологической безопасности процессов получения отливок с использованием стержней из холоднотвердеющих смесей (ХТС) являются ХТС на неорганических связующих материалах, например, на растворах алюмоборфосфатного концентрата (АБФК).По результатам проведенных исследований предложены состав и способ приготовления холоднотвердеющей смеси на связующем АБФК. Показана эффективность применения связующего АБФК для изготовления форм и стержней из ХТС.

Ключевые слова: неорганическое связующее; холоднотвердеющая смесь; алюмоборфосфатный концентрат; экологическая безопасность.

Для изготовления литейных стержней в России нередко применяется технология тепловой сушки, которая не предъявляет высоких требований к качеству сухих формовочных материалов, однако не может обеспечить точность стержней, вследствие их коробления в процессе нагрева. Это способствует повышению брака и энергоемкости процесса. Кроме того, данная технология отличается длительностью и не позволяет оперативно реагировать на запросы производства [1].

Технологический процесс получения стержней из холоднотвердеющих смесей (ХТС) предъявляет повышенные требования к качеству формовочных материалов, в частности, к содержанию в формовочном песке глинистой составляющей, но полностью исключает все недостатки вышеописанной технологии [2]. Для изготовления стержней из холоднотвердеющей смеси на алюмоборфосфатном связующем (АБФК) использовался кварцевый формовочный песок марки $3К_3О_203$ Кичигинского месторождения. В соответствии с сертификатом, данная марка песка допускает содержание глинистой составляющей до 2 масс %.

Повышенное содержание пылевидной фракции приводит к увеличению расхода связующего и, как следствие, удорожанию технологии.

С целью уменьшения расхода связующего применялся способ плакирования наполнителя. Для этого использовался раствор карбоксилметилцеллюлозы натриевой (КМЦН).

Высокая смачивающая способность раствора КМЦН обеспечивает обволакивание частичек пылевидной фракции. После высыхания КМЦН образует плотную водонерастворимую пленку, которая блокирует негативное действие диспергированной глины.

Стержневая смесь готовилась по составу, представленному в таблице 1.

Таблица 1

Состав разработанной стержневой смеси

№ п/п	Наименование компонента	Количество, %
1	КМЦН:вода в соотношении 1:10	1 (сверх 100%)
2	Кварцевый песок марки $3К_3О_203$	92…95
3	АБФК (ρ=1,53 г/см^3)	6…4
4	Периклаз плавленый ППЛ-95	2…1

При проведении экспериментов КМЦН смешивали с водой в соотношении 1:10 и давали настояться в течение суток. Подготовленную плакирующую смесь добавляли в кварцевый песок, тщательно перемешивали и высушивали в течение часа. Затем отмеряли необходимое количество песка, загружали в смесеприготовительные бегуны каткового типа для разрушения образовавшихся комков. В подготовленный наполнитель добавляли плавленый периклаз марки ППЛ-95 (ТУ 1527-040-7266728-2008) и перемешивали в течение пяти минут. На следующем этапе в смесь вводили АБФК (ТУ113-08-606-87) согласно рецептуре и производили миксерование еще пять минут до равномерного увлажнения.

Из полученной смеси изготавливали стандартные образцы для испытания на прочность при разрыве и остаточную прочность («восьмерка») и газопроницаемость. Также бралась навеска смеси для расчета ее влажности и текучести. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики разработанной смеси

№ п/п	Наименование характеристик	Значение характеристик	
		разработанная технология	базовая технология
1	Текучесть смеси, мм	122	143
2	Газопроницаемость смеси, ед.	212	154
3	Влажность смеси, %	1,8	1,9
3	Прочность на разрыв, МПа 1 час 3 часа 24 часа После сушки при 200 ?С	 0,32 0,47 0,85 –	 – – – 0,58
4	Остаточная прочность (осыпаемость), МПа	0,11	0,34

Остаточная прочность измерялась на тех же стандартных образцах для испытаний на растяжение после моделирования термического удара при заливке сплава АЛ9М. Для этого разогревали муфельную печь до температуры 700 °С, помещали внутрь образцы стержней и совместно остужали, затем проводили испытания. Низкая остаточная прочность обеспечивает снижение трудоемкости выбивки стержней из отливок.

По результатам проведенных исследований предложены состав и способ приготовления холоднотвердеющей смеси на связующем АБФК. Смесь для изготовления литейных форм и стержней, включающая раствор алюмоборфосфатного концентрата, периклазовый порошкообразный отвердитель и кварцевый песок, дополнительно содержит раствор карбоксиметилцеллюлозы при следующем соотношении ингредиентов, масс. %:

раствор алюмоборфосфатного концентрата……. 2…8;
периклазовый порошкообразный отвердитель…… 0,8…1,7;
раствор карбоксиметилцеллюлозы…….. 1…3;
кварцевый песок……. остальное

В разработанном способе приготовления смеси для изготовления литейных форм и стержней, включающим введение в кварцевый песок с периклазовым порошкообразным отвердителем раствора алюмоборфосфатного концентрата (АБФК), перед введением раствора АБФК его обрабатывают наносекундными электроматнитными импульсами с удельной импульсной мощностью 400…900 МВт/м^3 [3], а также осуществляют плакирование кварцевого песка предварительно подготовленной суспензией из раствора карбоксиметилцеллюлозы и периклазового порошкообразного отвердителя с последующей обработкой плакированного песка в кипящем слое теплым воздухом с температурой 50…80 °С.

Применение в качестве связующего водного раствора алюмоборфосфатного концентрата и периклазового порошкообразного отвердителя обеспечивает требуемый цикл формообразования и исключает сушку изготавливаемых форм и стержней вследствие химического затвердевания смеси.

Введение в состав смеси дополнительно карбоксиметилцеллюлозы в количестве 1…3 масс %. создает условия для плакирования и равномерного распределения периклазового порошкообразного отвердителя смеси, а также повышение прочностных характеристик стержней и форм, в особенности сразу после затвердевания смеси.

Плакирование песка суспензией из раствора карбоксиметилцеллюлозы и периклазового порошкообразного отвердителя обеспечивает равномерное распределение отвердителя в объеме смеси. При этом плакированный песок может храниться в отдельной таре неограниченное время и при необходимости использоваться для подготовки ХТС, что обеспечивает высокую технологичность заявляемого способа приготовления смеси.

Обработка плакированного песка в кипящем слое теплым воздухом с температурой 50…80 °С создает условия для ускоренной подготовки плакированного отвердителем наполнителя и улучшение физико-механических свойств ХТС и качества отливок.

Обработка наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) повышает когезионную прочность и позволяет существенно улучшить физико-механические свойства смеси за счет ее электрофизической активации.

Разработанный состав холоднотвердеющей смеси на связующем АБФК и способ ее приготовления позволяют ускорить цикл формообразования, повысить прочность форм и стержней более чем в 2 раза, практически исключить осыпаемость форм и стержней, облегчить выбиваемость отливок, значительно улучшить качество поверхности сложнопрофильных, тонкорельефных отливок из черных и цветных сплавов.

Библиографический список

1. Солодянкин, А.А. Формовочные материалы и смеси: учебное пособие к лабораторным работам / А.А. Солодянкин, Л.И. Иванова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 93 с.

2. Болдин, А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.

3. Электроимпульсная и ультразвуковая обработка материалов в точном литье: монография / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ,2010. – 259 с.

К содержанию

УДК504.54+504.3.054

ПРОБЛЕМА РТУТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Т.В Стружкова

Рассмотрено негативное влияние ртути на компоненты окружающей среды, возникающее при использовании и утилизации стоматологической амальгамы. Основной вклад в загрязнение атмосферы вносят выбросы ртути из крематориев.

Ключевые слова: ртуть; окружающая среда; загрязнение; амальгама; отходы первого класса опасности; кремация.

Ртутное загрязнение окружающей среды является одной из наиболее актуальных проблем современности. Одним из источников поступления ртути в компоненты окружающей среды является амальгама для зубных пломб.

Амальгама – это сплав ртути с одним или несколькими металлами. В стоматологической практике амальгамы (серебряную и медную) применяют в качестве пломбировочного материала с 1819 года. В настоящее время использование металлической ртути для изготовления амальгамных пломб составляет 10 % от общего мирового потребления этого металла [1].

К достоинствам амальгам можно отнести большую прочность (достигает 400 МПа через 24 часа после пломбирования), хорошую пластичность, позволяющую легко восстанавливать анатомическую форму зуба, устойчивость к влаге, длительный срок функционирования пломбы, невысокую стоимость и простоту работы [2].

Отрицательными свойствами амальгам являются: серебристый цвет, высокая теплопроводность, коррозия и потускнение пломбы со временем, возможность разрушения зуба после постановки пломбы. Основным недостатком является токсическое действие ртути на организм человека и загрязнение окружающей среды, возникающее при работе с амальгамными пломбами и их утилизации.

В 1971 году Минздравом СССР был запрещен выпуск медной амальгамы, содержащей до 65 % ртути. Токсическое действие ртути на организм человека явилось основной причиной отказа от применения медных пломб. Серебряная амальгама по-прежнему широко используется в качестве пломбировочного материала во многих странах мира [3]. Так, 78 % американцев и 90 % населения Германии имеют амальгамные пломбы, поскольку медицинская страховка покрывает расходы по постановке только металлических пломб [4].

Согласно международным стандартам амальгамный сплав должен содержать не менее 65 % серебра, максимально 29 % олова, максимально 6 % меди и 2 % цинка; присутствие серебра и олова обязательно [5]. Функции компонентов сплава следующие:

– серебро увеличивает прочность и уменьшает текучесть амальгамы, повышает коррозионную стойкость;

– олово необходимо для ускорения процесса амальгамирования;

– медь способствует расширению амальгамы, увеличивает прочность и твердость, снижает текучесть;

– цинк улучшает обрабатываемость амальгам в процессе растирания и уплотнения, увеличивает пластичность и повышает смачиваемость ртутью исходных компонентов в ходе приготовлении амальгамы.

Металлическая ртуть является обязательным компонентом амальгамы, ее окончательное содержание составляет 37–48 %.

Процесс образования амальгамы состоит в смачивании металлов ртутью, после чего они взаимно проникают друг в друга (диффундируют), образуя сплав [5]. В ходе амальгамирования компоненты вступают в химические реакции, сопровождающиеся образованием интерметаллидов, обеспечивающих твердение амальгамы. Затвердевшая амальгама состоит из нескольких фаз (табл. 1), каждая из которых имеет свои определенные свойства [6].

Таблица 1

Фазы амальгамы

Фазы	Химический состав	Формула	Свойства
Гамма	Серебро-олово	Ag_3Sn	Устойчивость, прочность
Гамма-1	Серебро-ртуть	Ag_2Hg_3	Устойчивость к коррозии
Гамма-2	Олово-ртуть	Sn_7Hg	Пониженная прочность, неустойчивость к коррозии
Эпсилон	Медь-олово	Cu_6Sn_5	Антисептические свойства, устойчивость к истиранию

Фаза гамма-2 уменьшает механическую прочность общей структуры и снижает коррозионную устойчивость амальгамы из-за высокого содержания олова. При коррозии, которая начинается в щели между зубом и амальгамной пломбой, олово фазы гамма-2 окисляется, а металлическая ртуть диффундирует в амальгаму, в результате чего в области контакта пломбы с тканями зуба происходит расширение называемое ртутным. Следствием ртутного расширения является уменьшение объема пломбы, появление щелей и отломов, что увеличивает вероятность испарения металлической ртути в ротовую полость с последующей интоксикацией пациентов.

При работе с амальгамными пломбами образуются отходы 1 класса опасности (чрезвычайно опасные), степень вредного воздействия которых на окружающую среду оценивается как очень высокая: нарушения являются необратимыми, период восстановления экологических систем отсутствует.

Чаще всего ртутьсодержащие отходы стоматологических кабинетов не утилизируются должным образом, поскольку:

а) твердые отходы (остатки пломб, экстрагированные зубы, капсулы для амальгамы) поступают в общие контейнеры с мусором, затем оказываются на свалках. По оценке [7] за один год в окружающую среду с экстрагированными зубами может поступать до 6,3 т ртути.

б) попадают в канализацию (металлическая ртуть, мелкие частицы амальгамы) и загрязняют сточные воды. Так, по данным [8] в США ежегодно в виде амальгамы используется 32 тонны ртути, из которых 27 (!) тонн сбрасывается во внутренние системы сточных вод стоматологических клиник. После отделения части ртути в соответствующих устройствах (сифоны, вакуумные фильтры, сепараторы для амальгамы) около 6 тонн ртути попадает в муниципальные системы очистки сточных вод. Если стоматологические клиники не оборудованы фильтрами, то в сточные воды в среднем выбрасывается 2 г металлической ртути на врача-стоматолога в день.

Эмиссия ртути в атмосферу

Зубная амальгама является основным фактором, определяющим выбросы ртути в воздух из крематориев. На второй сессии Межправительственного комитета по подготовке имеющего обязательную юридическую силу глобального документа по ртути было отмечено, что доля ртути, попадающей в атмосферу из стоматологической амальгамы при кремации, составляет 1 % (27 т в год) от общего объема глобальных антропогенных выбросов металлической ртути в атмосферу [9].

Практика кремации широко распространена во многих странах, однако точные статистические данные по выбросам ртути в атмосферу при сжигании человеческих тел отсутствуют. Ниже приведены результаты некоторых исследований, проведенных в рамках подготовки международного документа [10], предназначенного в помощь странам по созданию реестров выбросов ртути на национальном уровне.

Дания. Типичная амальгамная пломба содержит 0,2–0,6 г ртути. Среднее содержание металла в зубных пломбах одного покойника оценено в 4,1 г ртути на тело. Общее содержание ртути в 41 тысяче кремированных за один год тел составило 170 кг, при этом практически все 100 % ртути оказались выброшенными в атмосферу, поскольку крематории не были оснащены улавливающими устройствами.

Великобритания. Амальгамные пломбы в среднем содержат 0,6 г ртути. Установлено, что выделение ртути при кремации одного покойника постепенно увеличивалось с 0,49 г (1968 год) до 1,92 г (2003 год) из-за увеличения количества амальгамных пломб и снижения числа беззубых людей. Тенденция к росту объемов выброса ртути при кремации продолжается и даются оценки, что общие выбросы от крематориев увеличатся с 0,78 т (1999 год) до 1,3 т (2020 год).

По данным Британской Федерации специалистов по ритуальным услугам и кремации (FBCA), крематории несут ответственность за 16 % общих выбросов ртути в Великобритании.

Нидерланды. Исследования показывают, что среднее количество амальгамных пломб увеличится в 1,6 раза за период с 1995 года по 2020 год. Это значит, что выбросы ртути от кремаций в Нидерландах удвоятся, если не будут приняты меры по их сокращению.

Швеция. Население страны составляет 8,5 миллионов человек с накоплением 40–100 т металлической ртути в зубных пломбах и объемом кремации около 65 %. В обзорах, представленных учеными, выбросы ртути из шведских крематориев оцениваются величиной, равной 280 кг в год.

Учитывая, что крематории вносят серьезный вклад в загрязнение атмосферы ртутью, правительство Швеции запретило кремировать покойников с амальгамными пломбами (они подлежат обязательному удалению перед кремацией). Однако практика удаления зубов у трупов сталкивается с трудностями этического характера.

Министр культуры Швеции Лена Адельсон Лильерот заявила, что будет добиваться законодательного разрешения на внедрение нового метода захоронения, названного промессия (криогенная кремация).

Метод был разработан и запатентован шведским биологом Сюзанной Виих-Масак [11] с целью снижения выбросов ртути (и других токсинов) в окружающую среду при кремации. Технология промессии следующая: гроб с телом покойного охлаждают, затем замораживают в жидком азоте, вследствие чего труп становится хрупким как стекло: после механического дробления (или звукового удара) он рассыпается в мелкий порошок. Полученную массу высушивают в вакууме, затем с помощью магнита из нее удаляют все металлические предметы (амальгамные пломбы собирают и отправляют на утилизацию); после чего останки человека помещают в урну, изготовленную из картофельного или кукурузного крахмала. Через 6–12 месяцев после захоронения урна со всем содержимым превращаются в компост.

Данный метод признан в Швеции этичным (!), когда промессия будет окончательно легализирована, в городе Йонкопинг планируется открыть первый в мире проматорий [12].

Россия. За год в России умирает до 2 млн человек, ежегодная эмиссия ртути в атмосферу при кремации может достигать 50 кг [7].

В последнее время услуги кремации в нашей стране становятся все более популярными. По данным [13] в Екатеринбурге за последние 15 лет доля кремационных процедур составила почти 65 % от общего числа захоронений. В 2005 году в России функционировало 4 крематория (кремировалось около 7 % умерших людей), в настоящее время крематории имеются в двенадцати городах РФ, однако природоохранные правила, требующие обязательного улавливания паров ртути, как правило, не выполняются. Так, проектом строительства крематория в Челябинске (открылся в 2007 году) не были предусмотрены специальные фильтры для улавливания металлической ртути [14].

Исследования последних лет опровергли утверждения о том, что амальгама является безопасным стоматологическим материалом. В России потребление ртути для изготовления зубных пломб сократилось с 6 т до 0,8 т [9], металлические пломбы составляют 7–8 % от общего числа пломбировочных материалов. Одной из основных причин сокращения использования ртути в стоматологической практике является ужесточение санитарных требований к организации стоматологических кабинетов [15] и отсутствие достаточно безопасных условий для работы медперсонала с ртутью.

В 2011 году Всемирная Организация Здравоохранения рассмотрела вопрос отказа от применения металлических пломб, в настоящее время использование амальгамы законодательно запрещено в Скандинавских странах. UNEP (Программа ООН по окружающей среде) рекомендует правительствам государств ускорить процесс перехода к более безопасным стоматологическим материалам, чтобы сократить выбросы ртути в окружающую среду, где она может циркулировать столетиями.

Библиографический список

1. Реальная цена использования ртути для амальгамной пломбы. – URL: http://www.toxicteeth.org/pdf/Executive-Summary-in-russian.aspx.

2. Грошиков, М.И. Профилактика и лечение кариеса зубов / М.И. Грошиков. – М.: Медицина, 1980. – 192 с.

3. Гарбер, Д.А. Эстетическая реставрация боковых зубов. Вкладки и накладки / Д.А. Гарбер, Р.Э. Голдштейн; пер. с нем. – М.: МЕДпресс-информ, 2009. – 152 с.

4. Нужна ли нам амальгама? – URL: http://www.medline.uz/article/stomatology/803.htm.

5. Кортуков, Е.В. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.В Кортуков, В.С. Воеводский, Ю.К. Павлов. – М.: Высш. шк, 1988. – 215 с.

6. Терапевтическая стоматология: национальное руководство / под ред. Л.А. Дмитриевой, Ю.М. Макашовского. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2009. – 912 с.

7. Оценка поступлений ртути в окружающую среду с территории Российской Федерации / К. Лассен, Я. Мааг., Т. Ефимова. и др. – Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору РФ, Датское агентство по охране окружающей среды, 2005. – 312 с.

8. Руководство по снижению ртутных выбросов стоматологическими учреждениями. Проект «Демонстрация лучших методов и лучшей практики и способствование уменьшению медицинских отходов во избежание выбросов диоксинов и ртути в окружающую среду». – URL: http://www.lvif.gov.lv/?object_id=30358.

9. Программа ООН по окружающей среде. Доклад Межправительственного комитета для ведения переговоров по подготовке имеющего обязательную юридическую силу глобального документа по ртути о работе его второй сессии. Чиба, Япония, 2011.

10. Программа ООН по окружающей среде (подпрограмма ЮНЕП по химическим веществам). Руководство по определению и количественной оценке выбросов ртути (предварительный выпуск), Женева, Швейцария, 2005.

11. PROMESSA. – URL: http://www.promessa.se/ru/.

12. В Швеции – новый похоронный обычай. – URL: http://www.portal-credo.ru/site/?act=monitor&id=6947.

13. Услуги крематория, цены на кремацию в Екатеринбурге. – URL: http://profritual.ru/ekonom/crematorium.

14. Челябинский рабочий. – 1998. – 10 июля.

15. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – Екатеринбург, ИД «Урал Юр Издат», 2008. – 91 с.

К содержанию

УДК 621.771 (0.75.8)

ДИСКРЕТНО-ЛОКАЛЬНЫЙ МЕТОД МИНИМИЗАЦИИ НЕВЯЗОК ПРИ ПРИБЛИЖЕННОМ РЕШЕНИИ УРАВНЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Н.В. Судаков

Из результатов анализа известных вариационных принципов теории пластичности следует, что минимизация функционалов в прямых вариационных методах представляет минимизацию невязок при удовлетворении тех или иных уравнений замкнутой системы механики сплошной среды. Показана возможность минимизации невязок при удовлетворении непосредственно соответствующих уравнений взамен минимизации традиционных функционалов. Для преодоления математических проблем, предложен дискретно-локальный метод минимизации невязок.

Ключевые слова: функционал, уравнения, минимизация, невязка.

Точное решение системы дифференциальных уравнений механики сплошной среды в рамках ограничений прикладной задачи, которое бы соответствовало действительному напряженному и деформированному состоянию, достигается лишь в простейших случаях, имеющих ограниченный практический интерес. В связи с этим приоритет отдается приближенным методам, которые при необходимости позволяют уточнять решение. К таким методам относятся вариационные, в основе которых лежит ряд принципов и соответствующих вариационных уравнений, эквивалентных исходной системе уравнений механики сплошной среды. Широкую известность получили вариационные принципы Лагранжа, Журдена, Кастильяно, Маркова и, наконец, принцип виртуальных скоростей (перемещений) и напряжений В.Л. Колмогорова [1], из которого названные выше принципы вытекают как частные при упрощенной постановке задачи.

Использование прямых методов при реализации вариационных принципов позволяет уточнять решение путем добавления членов ряда последовательности координатных функций для искомых параметров. Однако при этом усугубляется проблема минимизации функционалов, обусловленная в частности их неквадратичностью.

Исследователями предлагаются различные варианты алгоритмов и нестандартные приемы, в той или иной мере позволяющие преодолеть математические трудности и получить приближенное решение. Однако пока не найдено оптимального формализованного алгоритма.

Вариационный принцип виртуальных скоростей и напряжений для одновременного определения напряженного и деформированного состояний [1] остается пока достаточно трудоемким. Принцип виртуальных скоро-

стей (перемещений) и напряжений реализуется на заданных кинематически возможных полях скоростей и статически допустимых полях напряжений, включающих неизвестные (варьируемые) параметры. При этом заданные поля скоростей и напряжений удовлетворяют статическим и кинематическим уравнениям, а также соответствующим граничным условиям. Не удовлетворенными остаются физические уравнения. Отсюда следует очевидный вывод, что функционал принципа [1] по своей сути является функционалом невязки, усредненной по объему и недифференцированной по физическим связям между конкретными компонентами тензоров напряжений и деформаций. Таким образом, поля скоростей и напряжений, определенные на основе принципа, обеспечивают точное удовлетворение статических, кинематических уравнений и соответствующих граничных условий. Физические уравнения удовлетворяются лишь на среднем интегральном уровне. Иначе говоря, обеспечивается квазидопустимое в физическом отношении состояние деформируемого тела.

Результаты анализа [2, 12 и др.] позволяют сделать общий для всех известных вариационных принципов вывод – функционалы известных вариационных принципов являются невязками при удовлетворении тех или иных уравнений из состава замкнутой системы уравнений механики сплошной среды, которые минимизируются на основе соответствующих вариационных уравнений.

Логично полагать, что аналогичные результаты могут быть получены на основе минимизации функционала невязки при удовлетворении непосредственно физических уравнений вместо минимизации базового функционала:

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \left[T(r, z, a_k) - T(r, z, \beta_k)\right]^2 dV \to \min. \qquad (1)$$

где $a_к$ – неизвестные параметры функциональных рядов для напряжений,

β_k – неизвестные параметры функциональных рядов для скоростей,

$T(r,z,a_k)$ – интенсивность касательных напряжений, определяемая на основе статически допустимых напряжений,

$T(r, z, \beta_k)$ – интенсивность касательных напряжений, определяемая на основе кинематически возможного поля скоростей и определяющего физического уравнения.

Процедура минимизации известных функционалов сопровождается интегрированием, дифференцированием и решением в общем случае не линейной относительно искомых параметров системы алгебраических уравнений. Практика решения краевых задач обработки материалов давлением показывает, что на этапе минимизации функционалов достаточно часто возникают математические трудности, сопровождающиеся значительным временем расчета, нестабильностью расчетной процедуры в случае изме-

нения исходных данных, отсутствием решения системы вариационных уравнений. Не является исключением в этом отношении и функционал (1). Тем не менее возможность выбора функционалов и алгоритмов в определенной мере позволит смягчить математические трудности. Вместе с тем кардинальное решение проблемы требует поиска неординарных подходов. Рассмотрим один из таких возможных подходов, называемый в дальнейшем дискретно-локальным методом (ДЛМ).

В настоящее время программные средства компьютерной математики обеспечивают возможность приближенного решения переопределенных систем уравнений (число уравнений больше числа неизвестных). В частности указанную возможность обеспечивает Mathcad Pro с помощью встроенной функции « mineer», минимизирующей невязки, обусловленные переопределенностью системы уравнений. В связи с этим имеется возможность замены процедуры интегрирования и минимизации функционалов решением конечного числа (превышающего число неизвестных) алгебраических уравнений, представляющих соответствующие невязки, в различных точках деформируемого тела. Для этого область деформирования разбивается координатной сеткой. Для каждого узла сетки с известными координатами записывается уравнение невязки, например, при удовлетворении определяющего физического уравнения. В результате получаем систему уравнений вида:

$$T(r_i, z_j, a_k) - T(r_i, z_j, \beta_k) = 0,$$

где r_i и z_j – координаты узловых точек.

Эффективность предлагаемого приближенного метода может быть оценена непосредственным расчетом невязок в произвольных (не совпадающих с узловыми) точках тела после нахождения неизвестных (варьируемых) коэффициентов.

В заключение важно заметить, что предлагаемый вариант дискретно-локальной минимизации невязок коренным образом решает проблемы, связанные с неквадратичностью функционалов.

Апробация ДЛМ осуществлялась на примере осадки сплошной цилиндрической заготовки в условиях прилипания на контакте с инструментом (рис. 1). Материал заготовки характеризуется не линейно вязкими свойствами.

Для реализации решения были использованы программные средства Mathcad Pro для Windows, которые численное интегрирование осуществляют на основе алгоритмов Ромберга, ускоряющих сходимость последовательности метода трапеций или метода прямоугольников к интегралу; для вычисления производных используют модифицированный метод Риддера, а для решения систем уравнений и неравенств – итерационный метод Левенберга-Маркардта, позволяющий в случае переопределенной системы уравнений получать приближенное решение путем минимизации невязок.

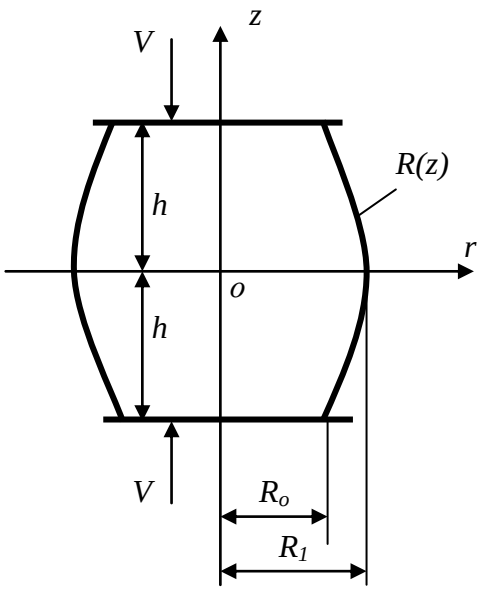


Рис. 1. Схема осадки
цилиндрической заготовки

Поле скоростей задавалось степенным полиномом 9-ой степени по независимым аргументам r и z. Часть коэффициентов полинома была определена методом неопределенных коэффициентов при удовлетворении кинематических граничных условий и условия несжимаемости. В итоге кинематически возможное поле скоростей включало пять неизвестных коэффициентов.

Из физических уравнений были определены касательные напряжений, а нормальные – из дифференциальных уравнений равновесия с точностью до функций интегрирования $f(r)$ и $f(z)$. Функция $f(z)$ находилась из условия равенства нулю нормальных напряжений на контуре $R(z)$, а функция $f(r)$ в выражении для σ_{zz} задавалась пятью четными членами степенного ряда, включающего дополнительно 5 неизвестных коэффициентов.

В итоге статически допустимое поле напряжений зависело от пяти параметров, унаследованных от поля скоростей, и от пяти параметров, содержащихся в выражении σ_{zz}. В целом задача свелась к определению 10-ти неизвестных коэффициентов.

Заметим, что согласованность девиаторных составляющих поля скоростей и поля напряжений на основе физических связей упрощает процедуру минимизации невязок при удовлетворении физических уравнений, но в целом для напряжений (с учетом шаровой составляющей) не обеспечивает удовлетворение физических уравнений.

Попытка определения коэффициентов путем минимизации известного базового функционала принципа виртуальных скоростей и напряжений программными средствами Mathcad Pro не увенчалась успехом. Ситуация достаточно типичная для задач механики сплошной среды. Выход из нее обычно предполагает упрощение задачи либо применение (разработку) других программных средств численных решений. В нашем случае решение задачи было достигнуто использованием предложенного выше дискретно-локального варианта минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы физических уравнений.

Ниже приводятся результаты расчета, полученные на основе решения 25-ти уравнений (записанных для 25 точек деформируемого объема) при 10-ти неизвестных параметрах.

Сравнение расчетных значений соответствующих компонентов определителей T1 (интенсивность касательных напряжений, рассчитанная на основе поля напряжений) и T2 (интенсивность касательных напряжений, рассчитанная на основе интенсивности скоростей деформаций сдвига и определяющей физической связи) показывает, что физические уравнения в узловых точках удовлетворяются с высокой точностью.

$$T2 = \begin{bmatrix} 13.059 & 12.339 & 10.129 & 6.046 & 0.323 \\ 12.91 & 12.225 & 10.115 & 6.25 & 2.298 \\ 12.481 & 11.908 & 10.121 & 6.937 & 4.893 \\ 11.822 & 11.469 & 10.295 & 8.307 & 8.299 \\ 10.409 & 10.442 & 10.31 & 10.228 & 13.161 \end{bmatrix} \qquad T1 = \begin{bmatrix} 13.163 & 12.322 & 9.949 & 6.029 & 0.283 \\ 12.986 & 12.215 & 10.013 & 6.332 & 2.304 \\ 12.454 & 11.887 & 10.181 & 7.17 & 4.901 \\ 11.573 & 11.329 & 10.397 & 8.403 & 8.14 \\ 10.352 & 10.541 & 10.611 & 9.909 & 12.338 \end{bmatrix}$$

Величину невязки при удовлетворении физических уравнений в произвольных точках деформируемого тела характеризуют графики на рис. 2, на котором красным цветом показано значение T1, а черным T2.

Таким образом, при определении напряженного и деформированного состояний в краевых задачах обработки металлов давлением может оказаться полезным использование не только традиционных функционалов, представляющих полную мощность деформации, но и других функционалов, минимизация которых адекватна приближенному решению замкнутой системы уравнений. К таким функционалам, например, можно отнести функционалы невязок при удовлетворении физических уравнений.

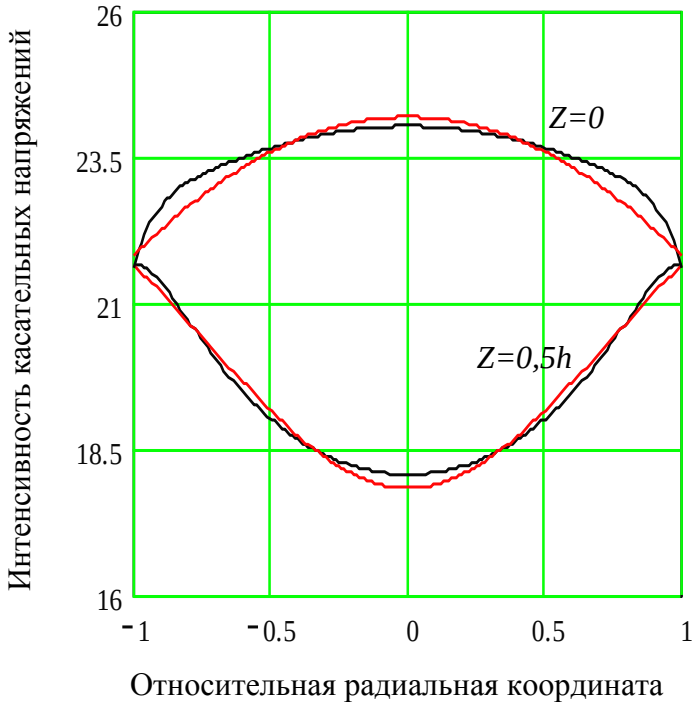


Рис. 2. К анализу минимизированной невязки
при удовлетворении физических уравнений

С целью сокращения времени расчета и повышения стабильности расчетной процедуры взамен минимизации функционалов можно рекомендовать дискретно-локальный вариант минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы соответствующих уравнений.

Библиографический список

1. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.

2. Михайлов, А.В. Замена функционала виртуальных скоростей и напряжений последовательностью квадратичных функционалов. Обработка металлов давлением. Межвузовский сборник. – Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – С. 19–23.

3. Писаренко, Г.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / Г.С. Писаренко, Н.С. Можаровский Н.С. – Киев: Наукова думка. 1981. – 496 с.

4. Морозов, Е.Н. Метод конечных элементов в механике разрушения / Е.Н. Морозов, Г.П. Никишков. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

5. Ильюшин, А.А. Метод гидродинамических приближений в журн. / А.А. Ильюшин, А.А. Поздеев и др. – 1961. – Т. 1. – Вып. 4.

6. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

7. Ворович, И.И. О методе упругих решений / И.И. Ворович, Ю.П. Красовский // ДАН СССР. – 1959. – Т. 126. – Вып.4. – С. 740–743.

8. Быков, Д.Л. О некоторых методах решения задач теории пластичности / Д.Л. Быков // Упругость и неупругость. – М.: МГУ, 1974. – Вып. 5. – С. 119–139.

9. Биргер, И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности / И.А. Биргер // ПММ. – 1951. – Т. 15. – Вып. 6. – С. 765–770.

10. Степанский, Л.Г. О приближенном решении некоторых плоскодеформированных и осесимметричных пластических задач / Л.Г. Степанский, Е.П. Унксов. – Изв. АН СССР. Механика и машиностроение. – 1961. – № 1.

11. Саккаев, Ю.Г. Оценка решения одной плоской задачи теории пластичности / Ю.Г. Саккаев // Инженерный журн. – 1962. – Т. 2. – Вып. 4.

12. Федотов, В.П. Определение напряженного состояния по деформированному при ковке. Обработка металлов давлением / В.П. Федотов, В.Н. Трубин, А.И. Голомидов // Межвузовский сборник. – Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1986. – С. 139–144.

К содержанию

УДК691.3

ПРОЗРАЧНЫЙ БЕТОН (ЛИТРАКОН)

С.И. Суховая

Прозрачный бетон активно применяется в процессе строительства производственных зданий, создания неповторимых и уникальных интерьеров, где возможность проникновения света сквозь стены помещения внутрь ценится в первую очередь. Кроме того, прозрачный бетон используется в качестве материала для перекрытий или облицовочного материала.

Ключевые слова: прозрачный бетон; прозрачные стены; новые материалы.

Строительство является таким видом деятельности, который будет вечно актуальным. Здесь каждый год появляются новые инновации и технологии. Развитие и изменения не обходят ни один материал. Совсем недавно появился совершенно новый, технологически инновационный вид строительной смеси – прозрачный бетон.

Как известно, обычный бетон начали применять в строительстве больше тысячи лет назад, еще во времена Междуречья. Окончательный свой вид он приобрел в XIX веке. И в настоящее время в ходе строительства всякого здания просто не обойтись без использования бетона. Его по праву называют основой нынешнего зодчества, поскольку это обязательный структурный компонент любого здания. Есть даже полистиролбетон и фиброцемент. Тем не менее, бетон у многих ассоциируется с безликостью и бездушностью, и редко кому придет в голову назвать его прекрасным. Однако после появления прозрачной разновидности представления о бетоне начинают сильно меняться.

Литракон – в переводе это слово означает «бетон, проводящий свет». Его разработал венгерский архитектор А. Лосонци совместно с группой ученых университета технологии и экономики (Будапешт) в 2001 году.

Литракон на 96 % состоит из бетона, а на 4 % – из оптического волокна (от 2 микрометров до 2 миллиметров в диаметре). Именно оно и определяет удивительные качества этого материала. Волокно изготавливается из стекла или прозрачного пластика и может переносить свет внутри себя, создавая внутренние отражение. Оно вступает в крепкую связь с бетоном, который тоже начинает просвечиваться. Такая связь возникает за счет микроскопического размера оптических волокон (измеряется микродолями). При этом литракон не уступает в прочности обычному бетону.

Плотность: 2100–2400кг/м³.

Прочность на сжатие: 50 Н/мм².

Прочность на разрыв: 7 Н/мм².

Класс по прочности 48.

Звукоизоляция 46дБ.

Производством литракона занимается его изобретатель Лосонци в Венгрии. Пока изготавливаются плиты небольших размеров, но ученые на этом не останавливаются. Толщина плит – 2,5–5 см. Из таких плит можно возводить стены 20-метровой высоты. Они отлично пропускают свет и имеют высокую прочность.

Его заливают в форму слой за слоем, каждый из которых выкладывают стекловолокном в виде матрицы. Армированный таким образом материал приобретает уникальные свойства – пропускать свет. Причем толщина плиты не влияет на светопроводимость. Лучи могут проникать даже через полутораметровый бетон на расстояние до 20 метров (рис. 1). Всё зависит от насыщенности блока оптоволокном.

Сфера применения прозрачного бетона. На данном этапе прозрачный бетон активно применяется в процессе строительства производственных зданий, создания неповторимых и уникальных интерьеров, а также в ландшафтном дизайне, где возможность проникновения света сквозь стены помещения внутрь ценится в первую очередь. Кроме того, прозрачный бетон используется в качестве материала для перекрытий или облицовочного материала. Даже в сфере автопроизводства этот материал нашел применение.

Рис. 1. Светопроводимость прозрачного бетона

Материалом, используемым только лишь для строительства заводов, фабричных зданий, индустриальных корпусов прозрачный бетон не является. Специалисты полагают, что полупрозрачные стены домов – практичное и очень экономичное строительное направление. Освещение улиц в этом случае не понадобится, а экономия электроэнергии днем будет происходить за счет все более активного использования солнечного света.

Впервые дизайнеры и архитекторы получили возможность работать с материалом, позволяющим достаточно эффективно использовать себя для украшения в ландшафтном дизайне, для украшения магазинов и ресторанов.

Оптимальная светопроводимость достигается прямоугольным расположении оптического волокна к поверхности плиты. Светопроводимое волокно на поверхности плит должно быть, как минимум, отшлифовано. Обработка пескоструйным аппаратом и абразивно-пластиковыми щетками придает матовую поверхность.

Обработка прозрачного бетона литракон может быть выполнена ручным и машинным способом, аналогично обработке как натурального, так и бетонного строительного камня:

– пиление;
– обработка скарпелью;
– сухая шлифовка;
– влажная шлифовка.

Сверление можно осуществлять всеми имеющимися в продаже диаметрами, сухим и влажным способами. Специальная обработка:

– вытачивание пазов, выпиливание;
– вырезание, шлифовка/полировка.

Особенности монтажа. Монтаж на несущих стенах осуществляется при помощи фасадных анкеров, установленных на стенах. Возможен монтаж с самонесущими рамными конструкциями.

В этапах выполнения прозрачного бетона огромную роль играет цель проекта, а также возможности самого заказчика.

Пока литракон не получил широкого распространения из-за своей дороговизны, однако прозрачный бетон – это удивительнейший стройматериал, уже смело можно сказать, что это строительный материал будущего, так как с каждым годом прозрачный бетон становится всё, более востребован.

Библиографический список

1. URL: http://stroitelstvo.org/interesno/prozrachnyy_beton/.
2. URL: http://monodom.ru/articles/s/vse_stati/gazobeton/prozrachniy-beton.html.
3. URL: http://mousebuild.ru/strojmaterialy/texnologiya-prozrachnogo-betona/.

К содержанию

УДК 69.05(07)

ОСНОВНЫЕ ИЗМЕНИЯ ПРАВИЛ ОБСЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕКОГО СОСТОНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В СВЯЗИ СО ВСТУПЛЕНИЕМ В СИЛУ ГОСТ 31937-2011

Д.В. Чебоксаров

В 2011 г. в РФ вышел новый ГОСТ на обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений. В статье приводится сравнительный анализ нового ГОСТ 31937-2011 и отмененного ГОСТ 53778-2010 и ряд критических замечаний к этим документам.

Ключевые слова: обследование, мониторинг, нормативные документы, ГОСТ.

Согласно приказу Росстандарта от 27.12.2012 г. номер 1984-ст взамен существующего ГОСТ Р 53778-2010 вводится в действие с 1 января 2014 года для добровольного применения ГОСТ 31937-2011. ГОСТ Р 53778-2010, который вступил в силу в 2010 г. вызвал волну критики в адрес его разработчиков.

ГОСТ Р 53778-2010 практически слово в слово повторяет МГСН 2.10-2004 «Предпроектные комплексные обследования и мониторинг зданий и сооружений для восстановления, реконструкции и капитального ремонта». То есть нормы, регламентирующие правила проведения обследования и мониторинга для всей России основаны на требованиях, разработанных для г. Москвы и Московской области. Например, какая организация из «глубинки» способна определить периоды и декременты собственных ко-

лебаний основного тона и обертонов зданий и сооружений, где взять оборудование для этих работ? А самое главное, зачем определение указанных динамических параметров при обследование, например, одно- и двухэтажных зданий с размерами 18х9 м. в плане?

Это один из многих вопросов, которые вызвал ГОСТ Р 53778-2010. Экспертное сообщество, вынужденное работать по требованиям ГОСТ, ожидало, что разработчики учтут замечания и пожелания специалистов при разработке нового ГОСТ 31937-2011, однако…

Результаты сравнения нового и старого ГОСТ приведены в таблице.

Таблица

Сравнение ГОСТ 53778-2010 и ГОСТ 31937-2011

№ разд, пункта	ГОСТ 53778-2010	ГОСТ 31937-2011
Разд. 1.	Настоящий стандарт является нормативной основой для контроля степени *конструктивной* безопасности и осуществления проектных работ по повышению степени *конструктивной* безопасности зданий (сооружений).	Настоящий стандарт является нормативной основой для контроля степени *механической* безопасности и осуществления проектных работ по повышению степени *механической* безопасности зданий и сооружений.
	Абзац отсутствует	Настоящий стандарт не устанавливает требований к проектированию мероприятий по устранению выявленных недостатков в грунтовых массивах, конструкциях, их элементах и соединениях, а также к проектированию мероприятий по восстановлению, усилению и капитальному ремонту объекта.
п. 3.2	*Конструктивная безопасность здания (сооружения):* комплексное свойство конструкций объекта (здания или сооружения) противостоять его переходу в аварийное состояние, определяемое: проектным решением и степенью его реального воплощения при строительстве; текущим остаточным ресурсом и техническим состоянием объекта; степенью изменения объекта (старение материала, перестройки, перепланировки, пристройки, реконструкции, капитальный ремонт и т.п.) и окружающей среды как природного, так и техногенного характера.	*Механическая безопасность здания (сооружения):* Состояние строительных конструкций и основания здания или сооружения, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни и здоровью животных и растений вследствие разрушения или потери устойчивости здания, сооружения или их части.

Продолжение табл.

№ разд, пункта	ГОСТ 53778-2010	ГОСТ 31937-2011
п. 3.18	*Пункт отсутствует*	**уникальное здание (сооружение):** Объект капитального строительства, в проектной документации которого предусмотрена хотя бы одна из следующих характеристик: высота более 100 м, пролеты более 100 м, наличие консоли более 20 м, заглубление подземной части (полностью или частично) ниже планировочной отметки более чем на 15 м, с пролетом более 50 м или со строительным объемом более 100 тыс. $м^3$ и с одновременным пребыванием более 500 человек.
п. 4.1 абз. 2	Требования к специализированным организациям, осуществляющим обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений, определяются *федеральным органом исполнительной власти*, уполномоченным на ведение государственного строительного надзора.	Требования к специализированным организациям, проводящим обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений, определяются *органом исполнительной власти*, уполномоченным на ведение государственного строительного надзора.
п. 4.1 абз. 3	Федеральным органом исполнительной власти, уполномоченным на ведение государственного строительного надзора, также ведется реестр специализированных организаций.	*Исключен*
п. 4.2	*Пункт отсутствует*	Обследование и мониторинг технического состояния зданий и сооружений проводят в соответствии с предварительно разработанными программами.
п. 4.5	Средства испытаний, измерений и контроля, применяемые при обследовании и мониторинге технического состояния объектов, должны быть подвергнуты своевременной поверке (калибровке) в установленном порядке и соответствовать нормативным документам и технической документации по метрологическому обеспечению.	По отношению к методикам измерений, средствам испытаний, измерений и контроля, применяемым при обследовании и мониторинге технического состояния строительных объектов, заранее планируют и своевременно выполняют мероприятия по метрологическому обеспечению, предусмотренные действующими законами и другими нормативными документами по вопросам технического регулирования, обеспечения единства измерений и т.п., с учетом назначения объектов.

Продолжение табл.

№ разд, пункта	ГОСТ 53778-2010	ГОСТ 31937-2011
п. 5.1.15 абз. 3	Детальное (инструментальное) обследование технического состояния здания или сооружения включает в себя: … – инструментальное определение параметров дефектов и повреждений	Детальное (инструментальное) обследование технического состояния здания или сооружения включает в себя: … – инструментальное определение параметров дефектов и повреждений, *в том числе динамических параметров*
п. 5.1.15 абз. 9	Детальное (инструментальное) обследование технического состояния здания или сооружения включает в себя: – поверочный расчет несущей способности конструкций по результатам обследования *(для зданий 1-го уровня ответственности в соответствии с ГОСТ 27751 поверочный расчет проводят с применением не менее двух сертифицированных вычислительных программ)*	Детальное (инструментальное) обследование технического состояния здания или сооружения включает в себя: – поверочный расчет несущей способности конструкций по результатам обследования
п. 6.1.2	При выборе системы наблюдений необходимо учитывать цель проведения мониторинга, а также скорости протекания процессов и их изменение во времени, продолжительность измерений, ошибки измерений, в том числе за счет изменения состояния окружающей среды, а также влияния помех и аномалий природно-техногенного характера. Программу проведения мониторинга согласовывают с заказчиком. В ней, наряду с перечислением видов работ, устанавливают периодичность наблюдений с учетом технического состояния объекта и общую продолжительность мониторинга.	6.1.2. Для определения задач мониторинга технического состояния конкретного здания (сооружения) согласно 4.2 разрабатывают программу проведения мониторинга, в которой наряду с перечислением видов работ устанавливают систему и периодичность наблюдений с учетом технического состояния объекта, а также общую продолжительность мониторинга. Программу проведения мониторинга согласовывают с заказчиком.

Продолжение табл.

№ разд, пункта	ГОСТ 53778-2010	ГОСТ 31937-2011
п. 6.1.2		6.1.3. При выборе системы наблюдений учитывают цель проведения мониторинга, а также скорости протекания процессов и их изменение во времени, продолжительность измерений, ошибки измерений, в том числе за счет изменения состояния окружающей среды, а также влияния помех и аномалий природно-техногенного характера.
п. 6.1.5	Используемые для наблюдений средства измерений и оборудование должны быть сертифицированы, поверены (калиброваны) и аттестованы уполномоченными органами.	*Исключен*
п. 6.1.8	В случае получения на каком-либо этапе мониторинга данных, указывающих на ухудшение технического состояния всей конструкции или ее элементов, которое может привести к обрушению здания или сооружения, организация, проводящая мониторинг, должна немедленно проинформировать об этом, в том числе в письменном виде, *собственника объекта, эксплуатирующую организацию, местные органы исполнительной власти, территориальные органы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, а на объектах, поднадзорных Ростехнадзору, – также территориальные органы Ростехнадзора.*	В случае получения на каком-либо этапе мониторинга данных, указывающих на ухудшение технического состояния всей конструкции или ее элементов, которое может привести к обрушению здания (сооружения), организация, проводящая мониторинг, должна немедленно информировать о сложившейся ситуации, в том числе в письменном виде, *собственника объекта, эксплуатирующую организацию, местные органы исполнительной власти, территориальные органы ведомства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.*
Прил. А	Роль настоящего стандарта	*Исключен*
Прил. Ц	Общие требования к проектированию и разработке автоматизированных стационарных систем мониторинга	*Исключен*

Таким образом, проанализировав изменения, внесенные авторами при разработке нового ГОСТ можно сделать следующие выводы:

1. В разделе 3

– термин конструктивная безопасность заменен на термин механическая безопасность, в котором ограничивается риск аварии в соответствии с требованиями Технического регламента «О безопасности зданий и сооружений»;

– появился термин уникальное здание, который дублирует ст. 48.1 п. 2 Градостроительного кодекса РФ, добавляя при этом в перечень уникальных объектов здания «*с пролетом более 50 м или со строительным объемом более 100 тыс. м^3 и с одновременным пребыванием более 500 человек»*.

2. В разделе 4

– теперь требования к специализированным организациям определяет не федеральный орган исполнительной власти (Ростехнадзор, который курирует выдачу допусков СРО), а просто орган исполнительной власти. То есть, судя по всему имеется ввиду региональный орган исполнительной власти т.е. Госстройнадзор, у которого законодательно нет функций определения требований к экспертным организациям;

– добавлено требование о предварительной разработке программами обследования и мониторинга;

– изменился пункт о поверке и калибровке приборов, теперь в ГОСТ применяется термин «мероприятия по метрологическому обеспечению», который, помимо требований о калибровке и поверке, включает и требования о хранении и эксплуатации приборов и оборудования.

3. В разделе 5

– добавлены требования об определении динамических характеристик зданий при детальном обследовании;

– для зданий 1-го уровня ответственности отменено требование поверочного расчета с применением не менее двух сертифицированных вычислительных программ;

4. Раздел 6

– появился пункт о разработке программы мониторинга (по аналогии с программой работ по обследованию);

– исчез пункт о необходимости поверки и калибровки приборов, используемых при мониторинге;

5. Приложения

– исчезло приложение А (справочное);

– исчезло приложении Ц (обязательное);

6. Несмотря на некоторые недостатки проанализированных нормативных документов, можно сделать вывод, что появление и развитие ГОСТ на обследование и мониторинг зданий – это необходимый шаг в направлении безопасной эксплуатации зданий. По содержанию ГОСТ 31937-2011 есть еще много вопросов, однако, надеюсь, в дальнейшей работе авторы обратят внимание на пожелания из «глубинки» и следующая его редакция станет ближе к зданиям нормального уровня ответственности.

Библиографический список

1. Технический регламент «О безопасности зданий и сооружений» Федеральный закон РФ от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ // Российская газета. – 2009. – 31 дек.
2. ГОСТ 31937-2011 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
3. ГОСТ Р 53778-2010 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».
4. МГСН 2.10-2004 «Предпроектные комплексные обследования и мониторинг зданий и сооружений для восстановления, реконструкции и капитального ремонта».

К содержанию

УДК 378.14

ОТДЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ ПРОЦЕССЕ

М.Н. Шабанов

Показана необходимость применения в образовательном процессе математических пакетов в преподавании дисциплин естественно-научного и общепрофессионального цикла технических специальностей, а также ограничения области использования виртуальных лабораторных работ и виртуальных экспериментов.

Ключевые слова: информационные технологии; математический пакет; образование.

Современный спектр информационных технологий разнообразен и предоставляет возможность широкого применения различных инструментов в образовательном процессе.

Системы автоматизированного проектирования уже получили повсеместное использование в преподавании специальных дисциплин технических специальностей. В преподавании дисциплин естесвенно-научного цикла и общепрофессиональных дисциплин использование современных информационных технологий развито пока слабо. В основном это презентации, в некоторых случаях видеолекции. Применение же математических пакетов программ в преподавании таких дисциплин как физика, теоретическая механика, сопротивление материалов и т.д. позволит избавить студентов от рутинных математических вычислений и глубже изучать сам предмет, проводить более широкий анализ задач, визуализировать полученные результаты.

В связи с этим возникает необходимость изучения различных математических пакетов на первом курсе, что в последствии позволит их широко использовать в преподавании, а студентам в самостоятельной учебной и исследовательской работе.

Представляется перспективным использование систем виртуальной реальности в подготовке специалистов в областях где требуется объемное представление сложных объектов.

Возможность использования виртуальных лабораторных работ в дисциплинах естественно-научного цикла представляется сомнительной, так как не даст обучающемуся опыта работы с реальным измерительным инструментом и лабораторным оборудованием, что вцелом снизит качество подготовки.

К содержанию

УДК 691.7

ПРИМЕНЕНИЕ ФЕРМ ПОКРЫТИЯ ИЗ КВАДРАТНЫХ ТРУБ «НА РЕБРО» В УСЛОВИЯХ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

Е.Г. Шерстобитова

По результатам проведенных сравнительных расчетов массы и коррозионной стойкости ферм с различными сечениями стержней, такими как тавровое сечение из спаренных уголков, круглые и квадратные трубы, выявлены положительные стороны применения квадратных труб «на ребро» для ферм, применяемых в условиях агрессивных сред. Установлено, что на долговечность конструкций оказывает влияние конструктивная форма элементов, позволяющая нести меньшие затраты на ремонт в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: фермы; квадратные трубы; «на ребро»; коррозионная стойкость.

Традиционные строительные фермы из парных уголков, скрепленные с узловыми фасонками болтами, начали применять в конце XIX в. Сварка заменила заклепки, но не изменила конструкцию фермы. В последние 70 лет после обстоятельного перспективного рассмотрения возможных конструкций ферм чл.корр. АН СССР, докт. техн. наук, профессором Н.С. Стрелецким в учебнике, изданном в 1940 г. [1], активно разрабатывались фермы со стержнями из других профилей. Таким профилем, в первую очередь, является стальная труба из-за большего радиуса инерции, чем у таврового сечения из двух уголков при равной площади, влияющего на затраты металла для сжатых стержней.

До 1970 г. фермы из круглых труб практически не применялись из-за чрезвычайно сложных узлов при применении фасонок. Перед 1970 г. было начато производство автоматических станков для кислородной фасонной резки концов труб, обеспечивающих бесфасоночное присоединение труб стержней решетки ферм к трубе поясов (рис. 1).

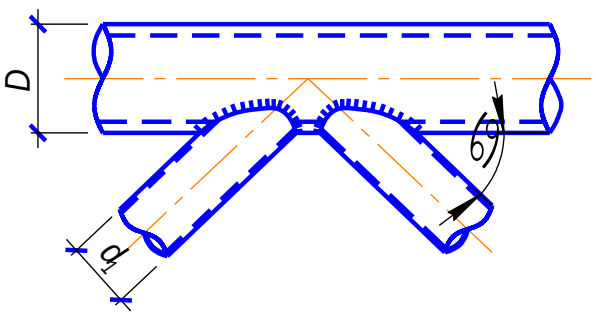


Рис. 1. Присоединение раскосов к поясу фермы из круглых труб

С этого времени были исследованы бесфасоночные фермы из круглых труб, разработаны проекты, организован цех трубчатых ферм, возведены объекты на Челябинском и Магнитогорском металлургических комбинатах [2, 3].

Из-за более высокой цены на трубы по сравнению с уголками в 1,45 раза проектирование и изготовление ферм из круглых труб были приостановлены, и больше не применялись.

Одновременно с фермами из круглых труб были разработаны фермы из прямоугольных гнутосварных труб. Для указанных труб были разработаны сортаменты, составлена инструкция по проектированию, организован специализированный завод в г.Молодечно.

Обращая внимание на положительные и отрицательныеы сторон ферм типа «Молодечно» необходимо указать на недостаточную прочность узлов из-за того, что стержни решетки за счет прямых резов торцов присоединяются только к ближайшим граням поясов. При этом возможно продавливание или вырыв металла поясов [4].

Альтернативой фермам типа «Молодечно», в которых решетка присоединяется без фасонок, являются фермы из квадратных труб «на ребро» [5, 6, 7].

Стойки и раскосы за счет косых резов кислородом присоединяются к двум ближайшим граням поясов. Это существенно удлиняет сварные швы, усилия передаются не на одну, а на две грани, включая в работу большие длины поясов, повышая прочность фермы в узлах [7].

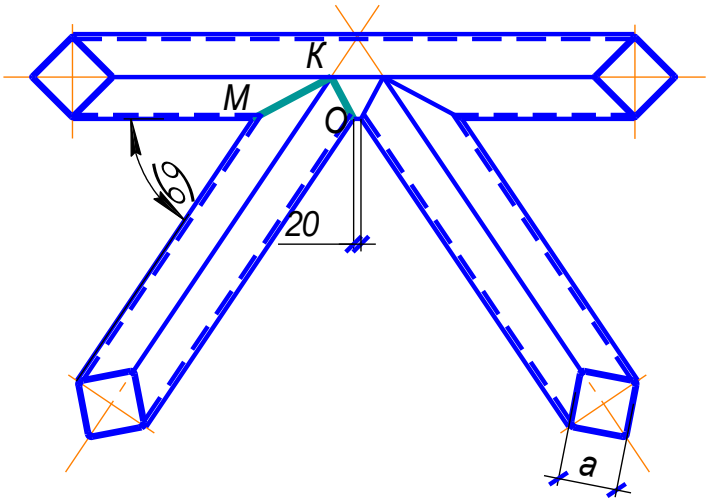


Рис. 2. Конструкция узлов ферм из квадратных труб на ребро

Рисунок 2 как бы повторяет рисунок 1. Достоинство ферм из круглых труб полностью повторяются в фермах из квадратных труб, размещенных на ребро. Исследования, выполненные в ННГАСУ [8] подтверждают работоспособность указанных ферм при воздействии нагрузок.

Технико-экономическая эффективность была изучена путем проектирования фермы под предельные узловые нагрузки. Схема фермы принята в соответствии с рекомендациями [4, 9] (рис. 3).

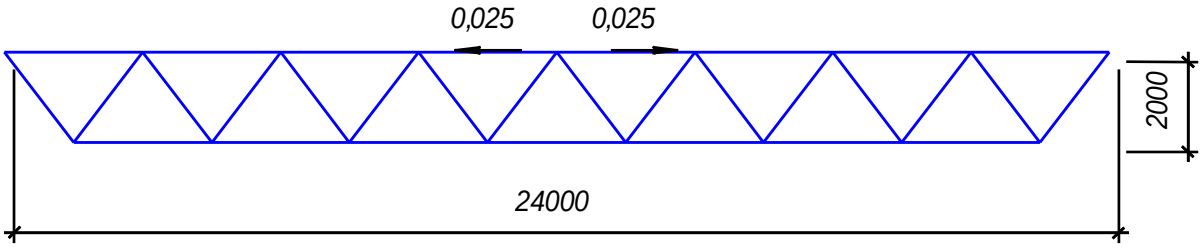


Рис. 3. Унифицированная схема фермы из гнутосварных труб

Особое значение фермы из труб имеют в случаях эксплуатации конструкций покрытий в агрессивных коррозионных средах. Снижение затрат на ремонты зданий в условиях большой коррозии конструкций представляют важную технико-экономическую задачу [10]. Наряду с решением вопроса об уменьшении массы ферм за счет применения труб чрезвычайно важным является вопрос коррозионной стойкости ферм. Открытый для коррозии тавровый профиль из парных уголков активно корродирует, особенно в средней (до 0,1 мм/год) и сильной (более 0,1 мм/год) коррозионных средах. Переход на применение труб для стержней ферм существенно повысит коррозионную стойкость из-за закрытости профиля трубы при герметичности внутреннего пространства. Коррозионная стойкость характеризуется открытостью поверхностей профилей, показателем слитности [11], выраженными формулами (1) и (2):

$$V = \frac{G}{\gamma}, \text{ м}^3, \quad (1)$$

где G – масса,т;

γ – плотность 1850 кг/м^3.

$$K_c = \frac{A_{кор}}{V}, \text{ мм}^{-1}, \quad (2)$$

где A – площадь открытых поверхностей;

V – объем металла, м^3.

Долговечность конструкций при эксплуатации в средне- и сильноагрессивных средах зависит и от конструктивной формы элементов. Совершенно нежелательны в конструкциях щели и зазоры. В источнике [12] приведена таблица коррозионного износа сечений стержней. За эталон принята круглая труба и угол наклона профиля по отношению к горизонтальной поверхности, в том числе 0°, 45° и 90°. Коэффициент коррозийно-

го износа $К_{изн}$ при наклоне 0° для круглой трубы составляет 1, для квадратной – 1,1, для таврового сечения из двух уголков – 2,0. С увеличением угла до 90° для круглой трубы $К_{изн}$=0,4, для квадратной – 0,45, для таврового сечения из двух уголков – 1,2. Коррозионостойкими профилями являются только круглые и квадратные трубы, причем замкнутые.

Для того чтобы фермы из квадратных труб «на ребро» нашли широкое применение в строительстве необходимо решение некоторых проблем: технико-экономическое сравнение данного типа ферм с другими конструктивными решениями по нескольким критериям (затраты материала, затраты труда на монтаж, затраты труда на изготовление); расчет и проектирование элементов и узлов ферм с учетом особенностей конструкции; разработка серии унифицированных конструкций для разных пролетов и нагрузок, а так же разработка технологии изготовления.

Библиографический список

1. Стрелецкий, Н.С. Курс металлических конструкций. Часть 1. Основы металлических конструкций / Н.С. Стрелецкий. – М.-Л.: Стройиздат Наркомстроя, 1940. – 844 с.

2. Балдин, В.А. Трубчатые конструкции покрытий из сталей высокой прочности / В.А. Балдин С.А. Ильясевич, Б.Н. Решетников // Промышленное строительство. – 1970. – № 6. – С. 41.

3. Абаринов, А.А. Особенности работы и расчета ферм из труб / А.А. Абаринов, Н.Б. Козьмин, А.Ф. Кузнецов // Промышленное строительство – 1970. – № 6. – С. 32.

4. Бирюлев, В.В. Проектирование металлических конструкций / В.В. Бирюлев, И.И. Кошин, И.И. Крылов, А.В. Сильвестров. – Л.: Стройиздат, 1990. – 432 с.

5. Патент на полезную модель № 116877. Фермы из квадратных труб / А.Ф. Кузнецов, В.А. Кузнецов.

6. Кузнецов, А.Ф. Фермы из квадратных труб. Особенности проектирования и изготовления / А.Ф. Кузнецов, В.А. Кузнецов // Приволжский научный журнал. – 2011. – № 4. – С. 22.

7. Байков, Д.А. Численные исследования действительной работы узлов фермы из квадратных труб, соединенных в узлах на ребро / Д.А. Байков, А.И. Колесов, Д.С. Маслов // Приволжский научный журнал. – 2012. – № 4. – С. 36.

8. Колесов, А.И. Статья об испытании фермы из труб на ребро / А.И. Колесов // Приволжский журнал. – 2012. – № 4.

9. Горев, В.В. Металлические конструкции в 3-х томах. Том 2. Конструкции зданий // под ред. В.В. Горева. – М.: Высшая школа, 1999. – 528 с.

10. Кикин, А.И. Повышение долговечности металлических конструкций промышленных зданий / А.И. Кикин, А.А. Васильев, Б.Н. Кошутин и др. – М.: Стройиздат, 1984. – 301 с.

11. Пособие по контролю состояния строительных металлических конструкций зданий и сооружений в агрессивных средах, проведению обследований и проектированию восстановления защиты конструкций от коррозии (к СНиП 2.03.11-85). – М.: ЦНИИ Проектстальконструкции им. Мельникова Госстроя СССР, 1989 г.

12. Беленя, А.И. Долговечность металлических контрукций, эксплуатирующихся в агрессивных средах / А.И. Беленя, А.С. Коряков, Л.А. Эткин // Развитие металлических конструкций. Работы школы Н.С. Стрелецкого. – М.: Стройиздат, 1987. – С. 498–505.

К содержанию

УДК 69.05(07)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РИСКА АВАРИИ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ТРЕБОВАНИЯМ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ И ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

М.С. Эпштейн

В статье описывается возможность повышения качества работы специалистов государственного строительного надзора при применении методики оценки и прогнозирования риска аварии возводимых зданий и сооружений на примере выполненных на кафедре «Строительства» научно-исследовательских работ.

Ключевые слова: безопасность, риск аварии, государственный строительный надзор, оценка качества СМР.

В соответствии с «Положением об осуществлении государственного строительного надзора в Российской Федерации», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 1 февраля 2006 г. N 54, «задачей государственного строительного надзора является предупреждение, а также выявление и пресечение допущенных застройщиком, заказчиком, лицом, осуществляющим строительство на основании договора с застройщиком или заказчиком, нарушений соответствия выполняемых в процессе строительства, реконструкции объектов капитального строительства работ требованиям технических регламентов, иных нормативных правовых актов и проектной документации».

Результатом деятельности органов государственного строительного надзора является подтверждение соответствия выполненных работ требованиям технических регламентов, проектной документации в виде заключения о соответствии.

Однозначность указанного документа не может являться качественной оценкой построенного объекта – согласно ему объект или соответствует, или не соответствует требованиям безопасной эксплуатации. В действительности же построенные объекты отличаются друг от друга степенью долговечности, сроком службы, величиной риска аварии. В процессе проектирования и возведения зданий неизбежны ошибки проектировщиков, строителей, появляются дефекты, нарушения, которые могут быть исправлены до различного уровня соответствия требованиям безопасности. При этом решающую роль играет подготовленность и требовательность как лиц, осуществляющих строительство, так и сотрудников органов надзора.

Степень соответствия выполняемых работ требованиям норм трудно определить в связи с отсутствием в настоящее время норм как таковых, к примеру, СНиП 3.03.01-87* «Несущие и ограждающие конструкции» вообще не вошел в перечень обязательных нормативных документов, утвержденный Постановлением Правительства РФ № 1047р от 21.06.2010 г. И, тем более, неспециалисту невозможно определить степень влияния на безопасность здания таких дефектов, как, к примеру, неодинаковая толщина швов каменной кладки внутренних стен, сколы бетона сборных железобетонных конструкций и изделий, большая или меньшая величина отклонений конструкции от проектного положения. Кроме всего прочего, при осуществлении надзора, очень важно правильно квалифицировать связь технических нарушений и административных правонарушений: с одной стороны, не переусердствовать в назначении административных наказаний, с другой – не допускать безнаказанности.

Для минимизации влияния человеческого фактора при оценке качества строительно-монтажных работ, определения степени влияния дефектов на безопасность объекта капитального строительства на кафедре «Строительства» Миасского филиала ЮУрГУ в 2013 г. под руководством доцента, к.т.н Чебоксарова Д.В. и начальника 3 территориального отдела управления регионального государственного строительного надзора, старшего преподавателя Эпштейна М.С. дипломниками кафедры Ивановой Н.В., Кузнецовой А.А., Облаковой Г.В. выполнена научно-исследовательская работа «Анализ влияния дефектов при контроле и оценке качества СМР» с целью разработки методики по оценке уровня конструкционной безопасности возводимых зданий и сооружений для специалистов управления регионального государственного строительного надзора.

Объектами исследования стали здания 3 типов конструктивных систем: 10-этажные крупнопанельные жилые дома 97 серии, 10-этажные кирпичные жилые дома, здания с металлическим рамно-связевым каркасом.

В ходе работы проанализированы существующие методики: ЦНИИПРОМЗДАНИЙ, ФЦНиВТ, ВСН 53-86(р) «Правила оценки физического износа жилых зданий» – предлагаемые для оценки надежности зданий и их безопасности, выявлены их достоинства и недостатки. В результате в основу работы положена методика оценки риска аварии зданий и сооружений, разработанная д.т.н., профессором ЮУрГУ Мельчаковым А.П. [4–7] состоящая в последовательности:

1) обследование объекта – несущая система представляется в виде групп однотипных конструкций – «дерева» несущего каркаса, отыскиваются наиболее и наименее дефектные конструкции в каждой группе;

2) формализация экспертной информации – назначение уровней опасности и рангов уровней для наиболее и наименее дефектных конструкций в каждой группе, назначаются показатели надежности для этих конструкций;

3) оценка риска аварии – расчет максимально допустимого риска и фактического риска аварии для каждой группы;

4) оценка технического состояния объекта – построение карты риска аварии, назначение категории технического состояния.

Данная методика применима как для эксплуатируемых, так и для строящихся зданий, на любой стадии строительства.

«Дерево» несущего каркаса здания, включающее группы однотипных конструкций, формируемое по этой методике, по сути, совпадает с этапами программ проверок, осуществляемых сотрудниками государственного строительного надзора. Оно состоит из «промежуточных зданий», к примеру: 1-ое «здание» - грунтовое основание, фундамент, стены подвала, перекрытие над подвалом; 2-ое «здание» – стены 1-го этажа, перекрытие 1-го этажа; 3-е «здание» – стены 2-го этажа, перекрытие 2-го этажа, и так далее.

При формализации экспертной информации по методу Мельчакова А.П. были использованы материалы классификатора, используемого в Госархстройнадзоре Челябинской области, согласно которому определения дефектов приняты на основе ГОСТ 15467-79 «Управление качеством продукции». При этом оказалось, что в правиле назначения уровней надежности конструкций для строящихся зданий по принятой методике Мельчакова А.П. уровни с 7 по 10: «опасный дефект», «несколько опасных дефектов», «угрожающие аварией дефекты», «предельное состояние конструкций» – не могут рассматриваться в повседневной практике государственного строительного надзора, как недопустимые в принципе. Такие дефекты, возникшие при строительстве, однозначно указывают на аварийную ситуацию на объекте капитального строительства и требуют принятия экстренных мер. Таким образом, область уровней надежности лежит в пределах от 0 до 6, а значение этих уровней – от 1,000 до 0,500.

Одновременно в работе сделана попытка установления взаимосвязи вида нарушения и ответственных за это нарушение лиц, а также степени административной ответственности этих лиц.

Обследование объектов проводилось во время проведения проверок сотрудниками государственного строительного надзора. На каждом «промежуточном здании» обследованных объектов при выявлении дефектов (нарушений) определялись значения фактического и допустимого риска аварии. Одновременно сотрудники государственного строительного надзора выдавали предписания по устранению нарушений. Устранение могло осуществляться: в виде разборки и устройстве вновь отдельных участков кладки; расчета фактических нагрузок и подтверждения несущей способности при выявлении отклонений геометрических параметров смонтированных конструкций проектными организациями; замоноличивании сколов бетона ремонтными составами и т.д.

В результате проведенной работы по всем обследованным зданиям были построены карты риска аварии.

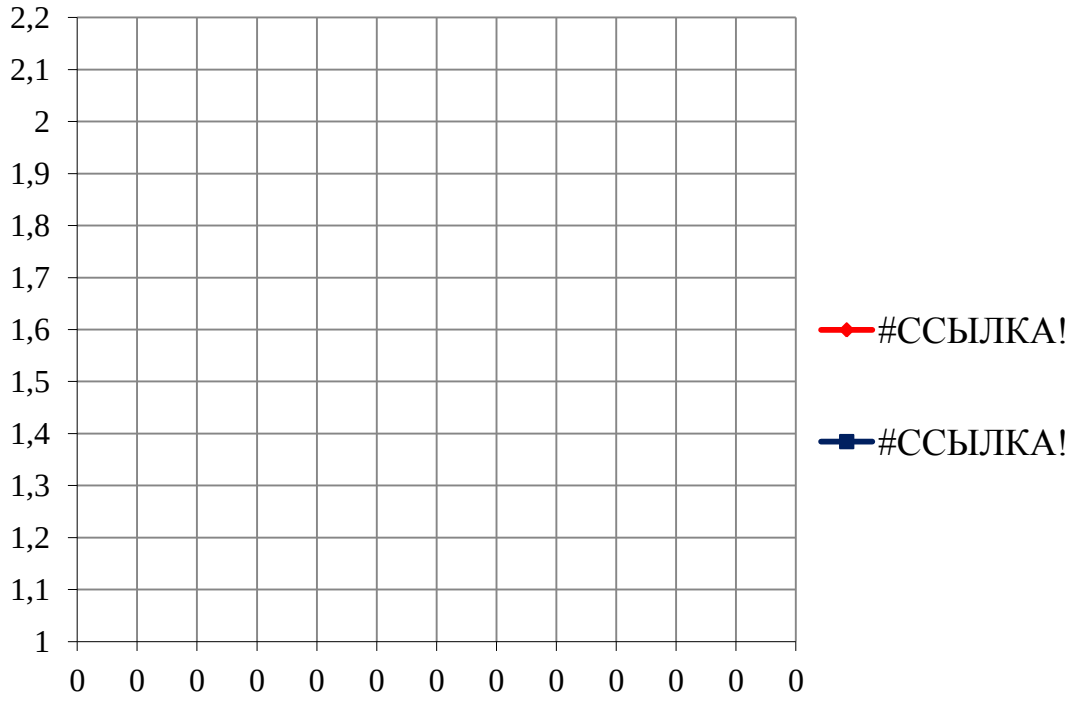


Рис. 1. Карта нормативных и фактических значений риска аварии для «промежуточных» зданий кирпичного дома

Оказалось, что на кирпичном здании, строившемся без осуществления государственного строительного надзора до 6 этажа (до 6 «промежуточного здания») линия фактического риска имеет угол наклона больший, чем линия допустимого риска аварии, и значение фактического риска превышает допустимое (рис. 1). С начала осуществления надзора, соответственно, ужесточились требования к качеству, угол резко уменьшился,

и на 11 «промежуточном здании» – устройстве кровли – значение фактического риска аварии вошло в пределы значений допустимого риска.

Аналогично, при строительстве торгового центра с каркасом из стальных конструкций также была построена карта, показывающая, насколько важны своевременные действия органов государственного строительного надзора в случае выявления нарушений проектной документации (рис. 2).

По этой карте, исходя из полученных значений фактического риска аварии, можно сделать вывод: уже на 0-ом промежуточном здании происходит скачок и увеличение наклона кривой риска, особенно это заметно на 3 промежуточном здании. Данный скачок связан с тем, что для наиболее дефектных конструкций – узла опирания колонны на фундамент – были назначены уровни опасности, равные 6. Это обосновывается грубыми нарушениями при монтаже конструкций.

По карте риск на 4 промежуточном здании составил 3,742, что почти в два раза превышает нормативный показатель.

При таком значении фактического риска, строительство объекта необходимо было бы немедленно прекратить и демонтировать возведенные конструкции до уровня фундаментов.

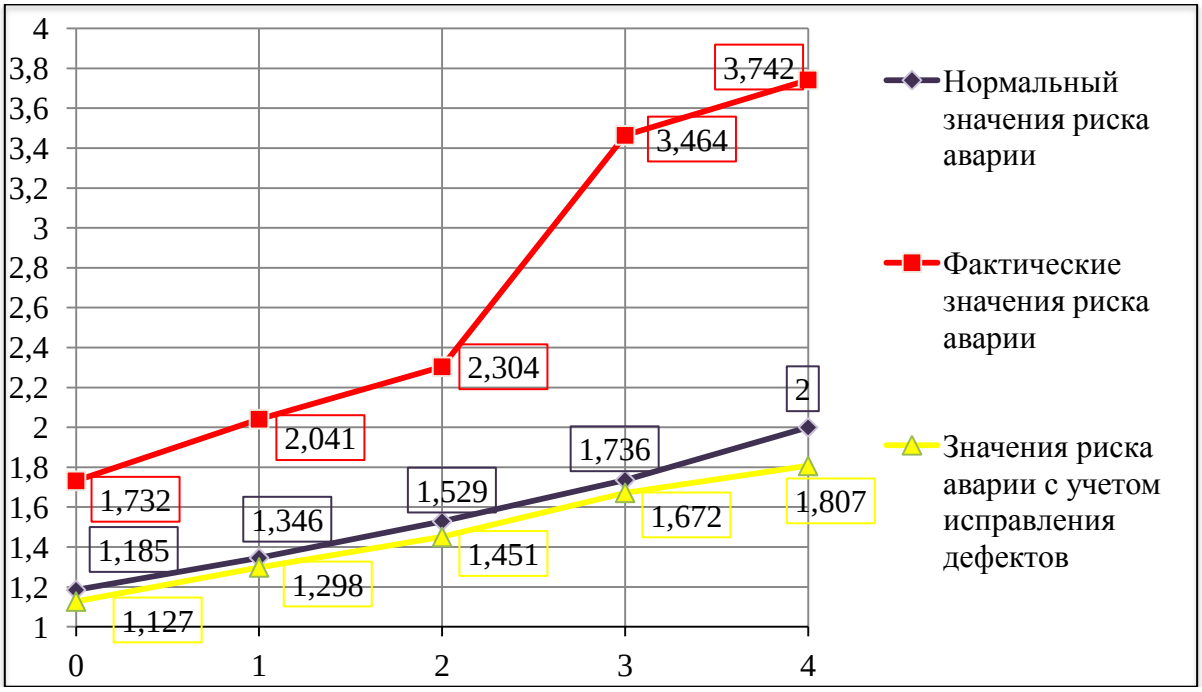


Рис. 2. Карта нормативных и фактических значений риска аварии для «промежуточных» зданий торгового центра.

Но по предписанию инженера строительного надзора, обнаруженные дефекты были устранены, опирание колонны на фундамент было усилено, а болты в узловых соединениях затянуты до усилий, рассчитанных проектной организацией. Вследствие этого, был произведен перерасчет фактического риска аварии. И как видно на карте, фактический риск аварии с учетом исправленных дефектов не превышает нормативного.

По всем объектам на картах ясно видно, как в результате устранения дефектов (нарушений) снижается фактический риск аварий, и каких величин достигает его значение, если бы нарушения не устранялись.

Конечным результатам исследовательской работы, которую планируется проводить и в дальнейшем, должна стать компьютерная матрица – программа, используя которую, и застройщик, и лицо, осуществляющее строительство, и сотрудники государственного строительного надзора могли бы получать количественные показатели при оценке качественных дефектов. Это позволило бы унифицировать подход к оценке качества строительства, минимизировать влияние человеческого фактора на оценку, исключить коррупционную составляющую при определении административной ответственности участников строительства.

Вместе с этим, по окончании строительства появится возможность классификации зданий по риску аварии, степени долговечности и безопасности, что пригодилось бы и эксплуатирующим организациям для планирования сроков обследования и видов капитального ремонта, и страховым компаниям.

Библиографический список

1. Добромыслов, А.Н Оценка надежности зданий и сооружений по внешним признакам / А.Н. Добромыслов. – М.: Изд-во АСВ, 2006 г. – 72 с.

2. Казачек, В.Г. Проблемы обеспечения надежности железобетонных конструкций при проектировании, обследовании и эксплуатации зданий и сооружений / В.Г. Казачек // Строительная наука и техника. – 2007. – № 6. – С. 28–37.

3. Мельчаков, А.П. Оценка надежности возведенных строительных конструкций на основе методов теории размытых множеств / А.П.Мельчаков // 7-е Уральские академические чтения. – Екатеринбург: Изд. УралНИпроект, 2002.

4. Мельчаков, А.П. Прогноз, оценка и регулирование риска аварии зданий и со-оружений: теория, методология и инженерные приложения: монография / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 114 с.

5. Мельчаков, А.П. Методология регулирования риска аварии зданий и сооружений на стадиях возведения и эксплуатации / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров // Строительство и образование: сборник научных трудов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С. 55–59

6. Мельчаков, А.П. О правилах по регулированию риска аварии зданий и сооружений на стадиях возведения и эксплуатации / А.П. Мельчаков, Д.В. Чебоксаров Г.А. Беззубкова, В.Г. Косогоров // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Строительство и архитектура». – 2008. – № 25 (125). – С. 4–8.

К содержанию

УДК 621.453/.457-6

ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РДТТ ПРИ ВЫБОРЕ ТОПЛИВ МАРШЕВЫХ СТУПЕНЕЙ (ЧАСТЬ 1)

С.А. Биткин

Представлена разработанная, прошедшая многолетнюю эксплуатацию, постоянно обновляющаяся система прогнозирования энергетических характеристик маршевых РДТТ баллистических ракет, обеспечивающая проектирование на начальном этапе разработки в ходе многовариантного поиска рационального облика двигателей в составе многоступенчатой ракеты, формирования требований к смесевым ракетным твердым топливам, целью которой является формирование требований технического задания на двигательные установки. В основе создания комплекса программ оперативного прогнозирования энергетических характеристик лежит междисциплинарный подход, обусловленный разнообразием взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в двигателе при его работе и длительной эксплуатации и вычислительный эксперимент, позволяющий на основе параметрических исследований процессов по полномасштабным математическим моделям сформировать упрощенные, но достаточно точные математические модели верхнего уровня иерархии.

Ключевые слова: ракетный двигатель твердого топлива, системный этап проектирования, смесевое твердое ракетное топливо, удельный импульс тяги, потери удельного импульса, профилирование сопла, двухфазное течение, пакет прикладных программ, аппроксимационные зависимости.

Структура и состав программного обеспечения

Интегрированная система прогнозирования энергетических характеристик маршевых РДТТ баллистических ракет предназначена для обеспечения проектирования на начальном этапе разработки в ходе многовариантного поиска рационального облика двигателей в составе многоступенчатой ракеты и формирования требований к смесевым ракетным твердым топливам [1, 2].

Структура и состав системы, включающей программный комплекс диалогового расчета двигателя (ДИАРАД), применяемый на этапе системного проекта при формировании требований к смесевым ракетным твердым топливам (СРТТ) и разработке технических заданий (ТЗ) на двигатели изображена на рис. 1.1.

Комплекс ДИАРАД включает в себя программные средства, как в виде пакетов прикладных программ, так и отдельных автономных модулей, объединенных управляющим модулем ФОРМИД, обеспечивающим формирование исходных данных для расчета и логических цепочек вычислений [3].

Комплекс позволяет выполнять следующий цикл расчетов:

1.1. Термодинамический расчет (пакет ТЕРМ)

- расчет термодинамического удельного импульса тяги при различных давлениях в камере сгорания и степени расширения сопла;
- расчет равновесных термодинамических и теплофизических характеристик и состава продуктов сгорания в камере, в различных сечениях по тракту сопла, на срезе сопла;
- расчет термодинамических характеристик и состава продуктов сгорания с учетом отклонений от равновесия: неравновесность кристаллизации, химическая неравновесность, неполнота сгорания, тепловые потери;
- расчет термодинамических характеристик и состава продуктов истечения с учетом дополнительного прихода массы уносимых ТЗП и ЭСМ.

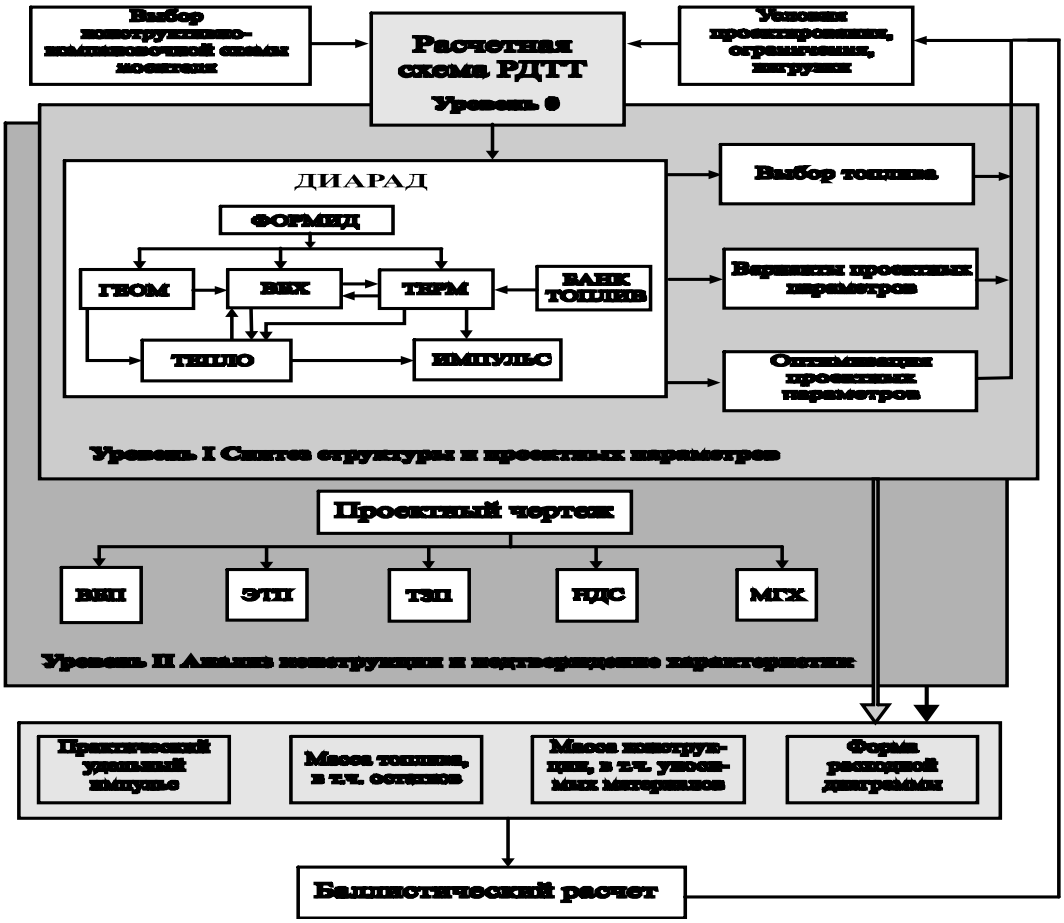


Рис. 1.1. Структура и состав программного обеспечения

Основу пакета ТЕРМ составляет программа «АСТРА-4рс» с базой данных «ИВТАНТЕРМО» [4], дополненная блоком формирования исходных данных для различных вариантов двигателей, блоком БАНК ТОПЛИВ и графическим представлением результатов расчетов. Результаты термодинамического расчета являются исходными данными для внутрибаллистических расчетов, расчетов практического удельного импульса тяги, теплового расчета, расчета параметров струи продуктов сгорания.

1.2. Расчет геометрических, массовых и массо-центровочных характеристик топливного заряда (пакет ГЕОМ)

- расчет по интерполяционному методу характеристик выгорания заряда твердого топлива с произвольной 3-х мерной геометрией поверхности;
- расчет вскрытия поверхности корпуса в процессе выгорания заряда;
- расчет проходных сечений, свободного объема камеры сгорания по времени работы;
- расчет массы заряда, координат центра масс, продольного и поперечного моментов инерции заряда;
- расчет продольного распределения массы топлива в процессе выгорания зарядов.

Основу пакета ГЕОМ составляет программа SQUARE 2 [5], дополненная блоком формирования исходных данных и документирования выходной информации. Пакет предназначен для обеспечения проектирования твердотопливных зарядов в процессе его структурного и параметрического синтеза.

Результаты расчета имеют как самостоятельное значение в части массо-центровочных и моментных (МЦМХ) характеристик заряда, определяющих МЦМХ ракеты, так и являются исходными данными для расчетов диаграмм расхода и давления в пакете расчета внутрибаллистических характеристик (ВБХ) и теплового состояния элементов конструкции.

1.3. Внутрибаллистический расчет (пакет ВБХ)

- расчет среднеинтегральных параметров двигателя на основном (установившемся) режиме и текущих параметров по времени работы: давления в камере сгорания, секундного массового расхода, коэффициента истечения, диаметра критического сечения сопла;
- расчет квазистационарного участка работы по нульмерной методике;
- расчет внутрибаллистических параметров при выходе двигателя на режим;
- расчет спада давления в камере в конце горения заряда, в том числе программированного спада тяги, импульса последствия (глубокого спада тяги);
- расчет переходных процессов в камере при различных воздействиях: вскрытии дополнительных отверстий для отсечки тяги, впрыска дополнительного компонента (например, воды для гашения заряда), изменении скорости горения либо поверхности горения заряда;

- расчет предельных отклонений внутрибаллистических характеристик: массового расхода, давления, тяги, времени работы, значений максимального давления и времени работы.

Выходные характеристики пакета являются исходными данными для теплового и энергетического расчетов.

1.4. Энергетический расчет (пакет ИМПУЛЬС)

- определение теоретического максимального удельного импульса тяги;
- расчет составляющих потерь удельного импульса;
- расчет практического пустотного удельного импульса тяги;
- расчет зависимости удельного импульса тяги от противодавления;
- расчет параметров продуктов сгорания, в том числе параметров конденсированной фазы по тракту и на срезе сопла.

1.5. Расчет контура сопла (пакет КОНТУР)

- профилирование сверхзвуковой части сопла для течения чистого газа;
- профилирование сверхзвуковой части сопла для течения двухфазных продуктов сгорания.

Основу пакета составляет программа ISLOK [6], использующая метод характеристик для построения профиля течения чистого газа по предельной или промежуточной линии тока.

В основу профилирования сопла для двухфазных продуктов сгорания положена методика и программа [7].

Параметры контура сопла используются при геометрическом проектировании РДТТ для компоновки соплового блока, его утопленной части и сверхзвуковой части, в том числе телескопических насадков, компоновки вспомогательных систем двигателя, расположенных как снаружи, так и внутри сопла (рулевой привод, вспомогательные двигатели, ПАДы запуска и разделения, системы наддува).

2. Расчет практического удельного импульса тяги

На этапе синтеза проектных параметров и выбора топлива оперативный расчет удельного импульса тяги осуществляется средствами комплекса ДИАРАД – блоки ТЕРМ и ИМПУЛЬС, на этапе анализа конструкции и подтверждения характеристик двигателей расчет подкрепляется применением пакета расчета энерготяговых параметров ЭТП [8].

Расчет практического удельного импульса проводится при следующих условиях:

- при среднеинтегральных параметрах двигателя;
- при отклонениях параметров двигателя и топлива от номинальных для определения его предельных отклонений;
- при параметрах, соответствующих работе двигателя со сложенным соплом в начале установившегося режима;
- при параметрах, соответствующих отрывному течению в сопле;

- при параметрах, соответствующих работе двигателя на участке глубокого спада;
- при других параметрах, отличных от номинальных.

Для расчета удельного импульса задаются исходные данные, которые подразделяются на следующие типы:

1. Конструктивные и геометрические параметры РДТТ
- диаметр среза сопла d_a;
- длина сверхзвуковой части сопла l_c;
- диаметр и длина сверхзвуковой части сопла в сложенном положении при наличии телескопических насадков;
- степень утопленности сопла в камеру сгорания $l_{ут}$;

1. количество складываемых телескопических насадков;
- профиль сверхзвуковой части сопла.

2. Внутрибаллистические параметры
- базовые значения давления в камере, включая давление в начале установившегося режима, среднеинтегральное давление, давление на участке глубокого спада и т.д.;
- диаметр критического сечения сопла: начальный, средний, конечный;

3. Характеристики применяемого топлива
- условная формула;
- энтальпия образования.

4. Результаты термодинамического расчета
- показатель изоэнтропы расширения;
- содержание конденсированной фазы.

5. Параметры конденсированной фазы
- распределение частиц по размерам.

6. Результаты теплового расчета
- массовая доля уносимых ТЗП и ЭСМ и их характеристики;
- величина разгара критического сечения сопла.

7. Диапазон изменения наружного противодавления.

Методика расчета практического удельного импульса тяги РДТТ базируется на определении теоретического максимального значения величины удельного импульса $\mathbf{I}_{уд.}^{тд}$ с последующим вычитанием составляющих потерь, существующих в реальных двигателях [9].

3. Потери удельного импульса тяги

Для расчета суммарных потерь удельного импульса тяги применяется подход, в соответствии с которым рассчитываются отдельные составляющие потерь по соответствующим методикам и программам. Каждый вид потерь рассчитывается независимо от других, а полные потери определяются суммой отдельных составляющих.

$$I_{уд} = \left(1 - \frac{\xi_{\Sigma}}{100}\right) \cdot I_{уд}^{тд}$$

$$\xi_{\Sigma} = \Sigma \xi_i$$

В соответствии с имеющимися представлениями о реальных физических процессах горения топлива, течения двухфазных продуктов сгорания и теплообмена в камере сгорания и по тракту сопла при определении практического удельного импульса тяги учитываются следующие основные виды потерь:

ξ_f – потери на рассеяние, обусловленные непараллельностью потока оси сопла;

$\xi_{тр}$ – потери на трение вследствие возникновения погранслоя вблизи стенки сопла, обусловленного эффектами вязкости и теплопроводности;

$\xi_{хн}$ – тепловые потери, потери из-за химической неравновесности и недогорания;

$\xi_{кр}$ – потери на отсутствие кристаллизации окиси алюминия в сопле;

$\xi_{оф}$ – потери из-за запаздывания частиц к-фазы ;

$\xi_{иск}$ – потери из-за искажения профиля сопла в закритической части;

$\xi_{комп}$ – компоновочные потери, обусловленные утопленностью сопла в камеру сгорания и наличием телескопических насадков;

$\xi_{тзп}$ – потери из-за уноса ТЗП и ЭСМ.

Прямой расчет составляющих потерь в реальном двигателе осуществляется по соответствующим методикам и программам пакета расчета энерготяговых параметров (ЭТП) [8], что, однако, не отвечает требованиям оперативности оценки при проведении проектных оценок, когда требуется рассчитать множество вариантов.

С целью проведения оперативных расчетов и определения газодинамических составляющих потерь удельного импульса разработана методика, в основе которой лежит аппроксимация результатов численных исследований с применением пакета ЭТП.

3.1. Расчет потерь на рассеяние

Методика оперативной оценки потерь на рассеяние основана на результатах численных исследований потерь на рассеяние семейства оптимальных профилей комбинированного типа. Расчеты потерь на рассеяние проведены по программе расчета до–транс-сверхзвукового осесимметричного течения невязкого и нетеплопроводного газа в соплах Лаваля.

Численные исследования проведены в диапазоне параметров, охватывающем представляющие наибольший практический интерес степени расширения (y_a) и относительные длины ($\bar{\ell}_c$) сопла:

$y_a = 3{,}5 \div 4{,}1$ *при* $l_c = 0{,}97 \div 1{,}03$ – для РДТТ I ступени

$y_a = 5 \div 10$ *при* $l_c = 0{,}94 \div 1{,}06$ –- для РДТТ верхних ступеней.

Для всех вариантов расчетов использован единый профиль дозвуковой части сопла (профиль Витошинского), достаточно близко аппроксимирующий профиль конструкции реальных двигателей. Параметры продуктов сгорания принимались характерными для современных твердых топлив: температура в камере Тк = 3850К, газовая постоянная R = 28,0 кгм/кг град, показатель изоэнтропы n = 1,14.

Профили сверхзвуковой части сопел рассчитывались по методике [10]. Угловая точка скруглялась радиусом $R = 0{,}15\ R_{кр}$ до касательного сопряжения с предельной линией тока. При этом величина смещения вдоль оси контура, соответствующая предельной линии тока, аппроксимировалась выражением:

Скругление угловой точки выполнялось как необходимое условие расчета течения по программе. Погрешность, вносимая при этом в результате расчета несущественна.

Потери на рассеяние определялись по зависимости:

где $\xi = y / Y(x)$

x, y – оси цилиндрической системы координат,

$Y(x)$ – ордината стенки сопла,

u, v – составляющие вектора скорости,

ρ – плотность,

$\beta = \frac{k+1}{2k}$,

k – показатель адиабаты,

H_0 – энтальпия торможения,

$m = \rho u, n = \rho v$ – составляющие количество движения.

Результаты расчетов представлены в таблицах 3.1, 3.2 и на рис.3.1, 3.2.

По результатам расчетов получены аппроксимационные аналитические зависимости:

для $3{,}5 \le y_a \le 4{,}1$

для $5 \le y_a \le 9$

Погрешность относительно прямого расчета составит не более $\pm 0{,}05\%$.

Таблица 3.1

y_a	ξ_f		
	$\overline{\ell}_c$		
	0,97	1,0	1,03
3,5	1,256	1,124	1,032
3,7	1,336	1,218	1,102
3,9	1,412	1,292	1,186
4,1	1,465	1,365	1,25

Таблица 3.2

y_a	$\overline{\ell}_c$					
	0,94	0,96	0,98	1,0	1,03	1,06
5	1,928	1,809	1,704	1,612	1,5	1,39
6				1,9		
7	2,475	2,362	2,239	2,146	2,027	1,947
8				2,353		
9	2,847	2,722	2,619	2,523	2,4	2,253
10				2,67		

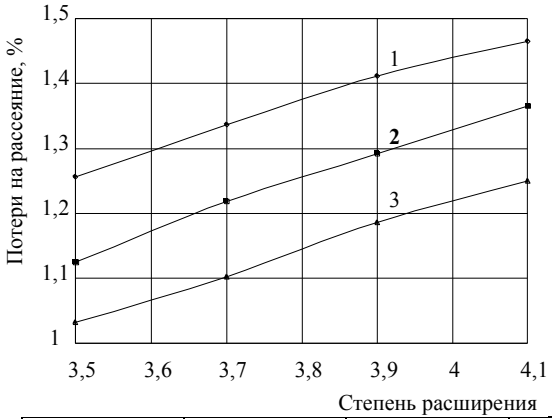


Рис. 3.1. Зависимость потерь на рассеяние от степени расширения при различных удлинениях сопла для РДТТ I ступени:

1 – l=0,97; 2 – l=1,0; 3 – l=1,03.

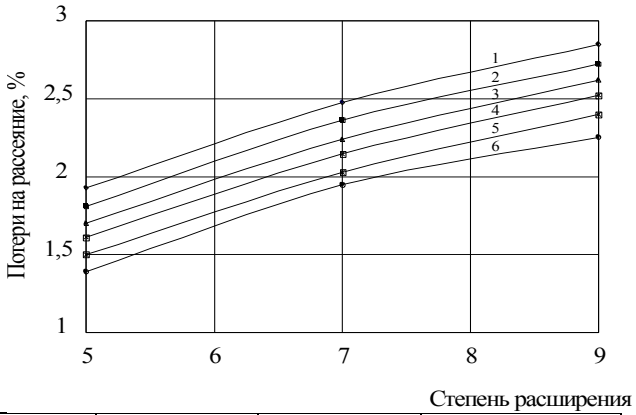


Рис.3.2. Зависимость потерь на рассеяние от степени расширения при различных удлинениях сопла для верхних ступеней:

1 – l=0,94; 2 – l= 0,96; 3 – l=0,98;
4 – l=1,0; 5 – l=1,03; 6 – l=1,06.

3.2. Особенности двухфазных течений в сопле и двухфазные потери

Значительную долю суммарных потерь удельного импульса составляют потери, обусловленные наличием металлического горючего (алюминия или гидрида алюминия) в составе смесевого ракетного твердого топлива, образующего при сгорании в камере конденсированную фазу. Содержание алюминия или гидрида алюминия в топливе составляет ~ 17–22 %, что приводит к образованию в потоке продуктов сгорания ~ 30÷40 % по массе конденсированной окиси алюминия. Двухфазность протока продуктов сгорания в камере и в сопле РДТТ приводит к значительному увеличению суммарных потерь удельного импульса тяги по сравнению с идеальным термодинамическим расчетом (доля потерь из-за двухфазности может составлять 50÷70 % суммарных потерь).

Основные составляющие потерь, связанные с двухфазностью продуктов сгорания обусловлены следующими физическими явлениями:

- незавершенностью процесса кристаллизации окиси алюминия в сопле из-за большой скорости потока и малого времени пребывания в сопле, соизмеримого с временем процесса кристаллизации;
- инерционностью частиц конденсированной фазы, приводящей к выносу их на контур сопла и требующей увеличения угла наклона контура концевой части раструба с целью сохранения работоспособности, что обуславливает увеличение потерь на рассеяние;
- неравномерностью распределения частиц по радиусу вследствие утопленности сопла в камеру и образования надсоплового «кармана», приводящей к «компоновочным» потерям удельного импульса;
- неравномерностью разгара сопла в окрестности критического сечения сопла, обусловленной взаимодействием материалов с частицами окиси алюминия, приводящей к образованию «закритической ямы»;
- температурным и скоростным запаздыванием частиц конденсированной фазы от газа при движении смеси двухфазных продуктов сгорания смесевых металлизированных твердых топлив по тракту сопла.

Исследования и разработка методов расчета неравновесного двухфазного течения в осесимметричных соплах Лаваля с учетом состава и свойств газовой и конденсированной фаз, исходной дисперсности частиц, параметров потока на входе в сопло представлены в [11, 12, 13].

На системном этапе проектирования с достаточной степенью точности оценка эффектов, связанных с неравновесными процессами в двухфазных потоках, в том числе и потери вследствие запаздывания частиц к-фазы проводится на основе параметрических исследований двухфазных течений в соплах. Расчеты двухфазных течений проведены для комбинированного профиля сопла, спрофилированного по методу характеристик с отогнутой концевой частью, обеспечивающего отсутствие выпадения частиц Результа-

ты расчетов двухфазных потерь в зависимости от диаметра критического сечения сопла и содержания конденсированной фазы представлены на рис. 3.3.

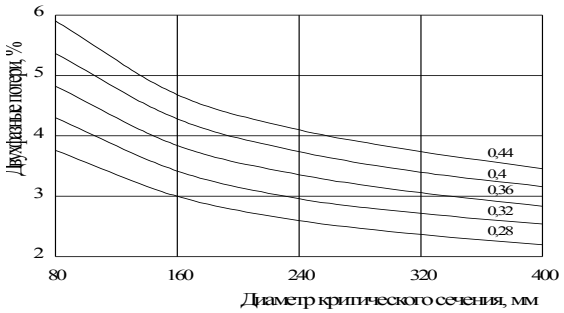


Рис. 3.3. Зависимость двухфазных потерь
от диаметра критического сечения при различном содержании
конденсированной фазы в продуктах сгорания

Расчеты составляющих потерь, таких как незавершенность кристаллизации конденсата, тепловые потери, потери на химическую неравновесность, потери вследствие присутствия в потоке уносимых теплозащитных материалов проводятся путем термодинамических расчетов с соответствующими исходными данными.

Расчеты потерь на трение проводится на основе метода Авдуевского [14] с использованием соотношений из монографии [9].

Компоновочные потери (на утопленность сопла в корпус и на разрыв контура вследствие наличия телескопических насадков) на начальном этапе принимаем по рекомендациям, основанным на экспериментальных и численных исследованиях.

4. Профилирование сверхзвуковой части сопла

Профилирование сверхзвуковой части сопел РДТТ, работающих на СРТТ с двухфазными продуктами сгорания существенно влияет на максимальную реализацию энергетических характеристик топлива и обеспечение работоспособности соплового блока.

Для решения задачи профилирования на стадии проектных исследований с целью оперативного определения характеристик профилей для двухфазных продуктов сгорания, обеспечивающих течение без заметного выноса конденсата на стенки сопла и минимальные потери удельного импульса тяги разработана методика [10].

При больших степенях расширения сопла, (~5÷9) , характерных для верхних ступеней ракет, проявляются особенности течения двухфазной среды, конденсированные частицы окиси алюминия, составляющие до 0,35–0,4 массовой доли продуктов сгорания современных твердых топлив, из-за своей инерционности при обтекании вогнутого профилированного контура сверхзвукового сопла не успевают развернуться и при некоторых условиях выпадают на стенку.

При выпадении на стенку частицы к-фазы оказывают на поверхность сопла эрозионное (механический унос), силовое (обмен импульсом), тепловое (за счет высокой температуры, кинетической энергии и теплоты кристаллизации) и химическое воздействие, что значительно ухудшает стойкость раструба сопла и увеличивает потери удельного импульса.

Для обеспечения работоспособности конструкции соплового блока необходимо исключить вынос конденсированной фазы на стенку сверхзвуковой части раструба. В отраслевом стандарте на основании теоретических и экспериментальных исследований предложено с целью исключения выпадения конденсата, профилировать сопло по предельной линии тока чистого газа, а концевой участок, начиная с точки заметного выпадения частиц конденсата с размером ≥ 1 мкм, выполнять коническим с углом полураствора, большим угла наклона траекторий частиц конденсата.

Условиям невыноса конденсата могут удовлетворять профили различных типов – комбинированные, с отогнутой концевой частью, двухрадиусные, контуры вариационного типа. Различие суммарных потерь удельного импульса для профилей указанных типов, приходящих в одну точку среза, может составлять от 0,3 до 1,5 с в зависимости от степени расширения и относительного удлинения сопла.

По результатам обобщения расчетных и экспериментальных данных предложена методика нахождения точки заметного осаждения частиц на стенку сверхзвуковой части сопла и разработаны рекомендации по профилированию сопел комбинированного типа. Методика положена в основу разработки практического руководства для проектных исследований по профилированию сопел комбинированного типа для двухфазных продуктов сгорания современных твердых топлив.

Базовыми профилями принято семейство профилей, соответствующих предельной линии тока с угловой точкой и обеспечивающих минимальные потери импульса для комбинированных сопел.

Определяющее влияние на положение точки начала интенсивного выпадения конденсата оказывают параметры сверхзвуковой части сопла, а именно начальный угол его раскрытия ($\theta_{вх.}$):

$$\theta_{вх} - \theta_S = \frac{\theta_{вх}}{f(\lambda_S)} - 1 \qquad (4.1)$$

Соотношение (4.1) определяет угол наклона контура в точке начала интенсивного выпадения частиц (θ_S) в зависимости от минимального угла раскрытия сопла:

$f(\lambda_S)$ – функция, учитывающая изменения плотности частиц, температуры газа, сжимаемость и зависящая от скорости газа.

Функция $f(\lambda_S)$ аппроксимируется выражением:

$$f(\lambda_S) = \frac{\lambda_S + 1}{2{,}3 - 0{,}3\lambda_S},$$

где λ_S – приведенная скорость в точке выпадения.

Приведенная скорость в точке выпадения находится из зависимости:

$$y_a = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{1}{n-1}}\left(1-\frac{n-1}{n+1}x_s^2\right)^{\frac{1}{n-1}}}}$$

где n – показатель изоэнтропы;

k – коэффициент, учитывающий влияние дозвуковой части, k≥1.

За счет оптимизации формы до – трансзвуковой части сопла и организации равномерного потока на входе в сопло k может быть доведен до величины k=1,15.

Расчет базового семейства профилей, соответствующих предельным линиям тока течения чистого газа с равномерной характеристикой на выходе для заданных значений M_0 проведен по программе ISLOK [6]. Определены координаты базовых профилей y=$f(x)$ и изменение угла наклона контура $\theta=f(x)$. Расчеты проведены для показателя изоэнтропы n=1,16 в диапазоне чисел Маха $M_0=3{,}5\div5{,}0$.

В рассчитанном семействе профилей выбран ряд опорных профилей, для которых определены координаты точки начала заметного осаждения конденсата. Для этого находилось изменение функции угла наклона контура по длине опорного профиля $\theta=f(x)$ и функции (4.1), соответствующей по $\theta_{вх.}$ – максимальному углу наклона контура рассматриваемого опорного профиля. В окрестности предполагаемого пересечения, функция $\theta_S=f(\lambda_S)$ переводилась, с использованием табулированной зависимости для λ_S и зависимости $y=f(x)$ рассматриваемого опорного профиля в функцию вида $\theta=f(x)$. При $\theta=\theta_S$ определились координаты точки начала осаждения.

Значение k в функции (4.1) принималось равным 1, т.е. сечение осаждения конденсата определилось для наихудших расчетных условий, т.е. определяемые профили будут иметь некоторый запас по выносу конденсата.

Результаты расчетов координат начала осаждения частиц представлены на рис. 4.1. Результаты аппроксимируются зависимостью:

$$x_S = 0{,}4 - 0{,}6\lambda_0^{1{,}75}$$

с погрешностью не более $\Delta x = \pm 0{,}00$

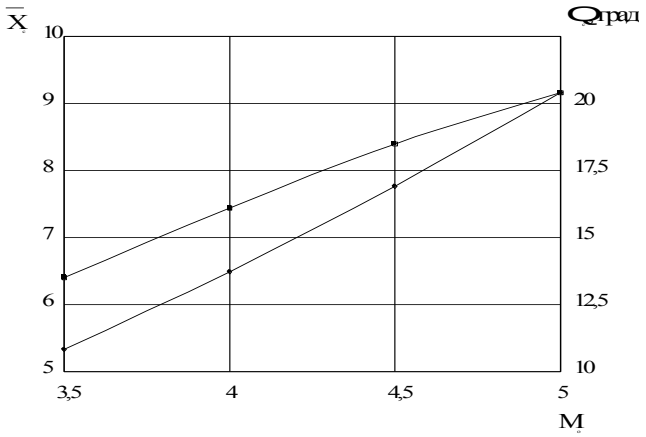


Рис. 4.1. Зависимость абсциссы и угла наклона
в зоне начала осаждения, от числа Маха

Профиль концевого участка сопла за сечением начала осаждения частиц так же должен удовлетворять соотношению (4.1). Угол наклона концевой части растет от величины θ_s до θ_a, определяемой из (1) при $\lambda = \lambda_a$. Концевой участок лежит между конусами с углами θ_s и θ_a. На этапе проектных оценок достаточно воспользоваться упрощенной, конической формой концевой части с учетом наклона, равным θ_a (λ_c). Для этого к опорному профилю в точке $\{x_s, y_s\}$ пристыковывается конический участок с углом θ_a (λ_c) и определяется длина сопла заданной снятием расширения.

По результатам расчетов получены аппроксимационные зависимости, позволяющие выбрать базовый профиль с числом Маха M_o для заданной степени расширения y_a при различных удлинениях $\bar{l}_c$:

$$M_o = \frac{3{,}1\,(1 \cdot 3{,}1)^{0{,}2}}{\bar{l}_c^{0{,}1} \cdot \bar{l}_c^{0{,}9}}, \text{ при } 3{,}5 \le y_a \le 4{,}2; \qquad (4.2)$$

$$M_o = \frac{3{,}6\,(2 \cdot 4{,}2)^{0{,}1}}{\bar{l}_c^{0{,}05} \cdot \bar{l}_c^{0{,}21}}, \text{ при } 5 \le y_a \le 10 \qquad (4.3)$$

Зависимости (4.2, 4.3) достаточно точно позволяют определить параметры комбинированного профиля сопла на базе предельной линии тока и конической концевой части при заданных степенях расширения и относительном удлинении сопла в диапазоне Mo = 3,5 ÷5,0; $\bar{l}_c$ = 0,9 ÷1,1 (рис. 4.2, 4.3).

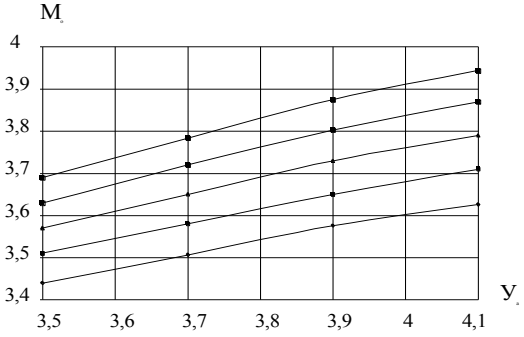


Рис. 4.2. Зависимость числа Маха Мо отстепени расширения при различных удлинениях сопла для РДТТ первой ступени:
1 - lc=0,9; 2 - lc=0,95;
3 - lc=1,0; 4 - lc=1,05; 5 - lc=1,1.

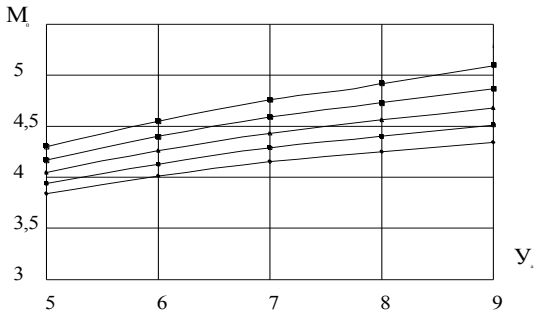


Рис. 4.3. Зависимость числа Маха Мо от степенирасширения при различных удлинениях сопладля РДТТ верхних ступеней:
1 - lc=0,9; 2 - lc=0,95; 3 - lc=1,0;
4 - lc=1,05;5 - lc=1,1.

При подготовке рукописи к печати вышла монография [15], в которой обобщены обширные теоретические и экспериментальные исследования потерь удельного импульса тяги в РДТТ различной конструкции. На дальнейшем этапе планируется сопоставить представленные в монографии результаты исследований с применяемыми методиками и внести уточняющие коррективы в метод расчета практического удельного импульса разрабатываемых изделий с РДТТ.

Библиографический список

1. Биткин, С.А. Высокоэнергетические твердые топлива – основа конструктивного совершенства и баллистической эффективности РДТТ БРПЛ / С.А. Биткин, С.В. Козлов, С.А. Рязанов, Н.А. Обухов // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Бийск: ФНПЦ «Алтай», 2003.

2. Биткин, С.А. О методологии формирования требований к топливам маршевых РДТТ БРПЛ на этапе системного проекта / С.А. Биткин // Шестая всероссийская конференция по внутрикамерным процессам и горению в установках на твердом топливе и ствольных системах ОСОС’2008. Тезисы докладов. – Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2008.

3. Васенин, И.М. Программный комплекс расчета основных параметров РДТТ ДИАРАД. Руководство пользователя / И.М. Васенин, А.А. Глазунов, Н.А. Обухов, С.А. Биткин и др. – Миасс: КБМ, 1985.

4. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (АСТРА.4/рс). Описание применения. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995.

5. Расчет площади поверхности и инерционных характеристик энергоузлов изделий Т «SQUARE-2». Руководство пользователя. – Миасс: КБМ, 1982.

6. Васенин, И.М. Программа расчета сверхзвуковой части осесимметричных сопел методом характеристик «ISLOK». Описание применения / И.М. Васенин, В.Г. Бутов, В.М. Галкин. – Томск, 1984.

7. Комплекс программ расчета двухфазного течения в осесимметричных соплах Лаваля с учетом процессов коагуляции, дробления и вращения частиц «К2» / Е.А. Козлов, А.А. Глазунов, Н.Г. Кувшинов. – Томск. 2000.

8. Васенин, И.М. Программный комплекс расчета энерго-тяговых параметров РДТТ ЭТП. Руководство пользователя / И.М. Васенин, А.А. Глазунов, Н.А. Обухов, С.А. Биткин и др. – Миасс: КБМ, 1985.

9. Губертов, А.М. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива / А.М. Губертов, В.В. Миронов, Д.М. Борисов и др.; под ред. А.С. Коротеева. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.

10. Обухов, Н.А. Методика проектного расчета контура и основных параметров соплового блока СОПОТ. НИР «Аметист-2», ГОНТИ-11.1987 / Н.А. Обухов, С.А. Биткин, Ю.П. Ковардаков, А.Л. Карташев.

11. Васенин, И.М. Газовая динамика двухфазных течений в соплах / И.М. Васенин и др. – Томск: Изд-во Томского университета, 1986. – 264 с.

12. Стернин, Л.Е. Двухфазные моно- и полидесперсные течения газа с частицами / Л.Е. Стернин, Б.Н. Маслов, А.А. Шрайбер, А.Н. Подвысоцкий. – М.: Машиностроение, 1980. – 172 с.

13. Тишин, А.П. Особенности течения двухфазных продуктов в сопле / А.П. Тишин // Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 1. / под ред. В.П. Глушко. – М.: ВИНИТИ, 1971.

14. Авдуевский, В.С. Основы теплопередачи в авиационной и ракетной технике / В.С. Авдуевский, Ю.И. Данилов, В.К. Кошкин и др. – М.: Оборонгиз, 1960. – 389 с.

15. Милёхин, Ю.М. Энергетика ракетных двигателей на твердом топливе / Ю.М. Милёхин, А.Н. Ключников, Г.В. Бурский, Г.С. Лавров. – М.: Наука, 2013. – 207 с.

К содержанию

УДК 620.9.004.18(470) + 620.9:662.6

АНАЛИЗ ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

А.И. Гуськова, Е.А. Морозова

В топливно-энергетическом комплексе Российской Федерации за последнее время обозначился круг проблем, требующих решения: высокая степень износа основных средств энергетики, снижение надежности, истощение запасов, дефицит мощностей. Для обеспечения комплексного подхода к решению этих и сопутствующих задач необходимо обеспечение последовательности действий закрепленных законодательно. Проведенный сравнительный анализ законодательства в области энергоэффективности Российской Федерации и ряда стран Западной Европы выявил сильные и слабые стороны энергохозяйства Российской Федерации. Учитывая большое значение и потенциал возобновляемых энергоисточников и необходимость создания инновационного энергетического пространства, предстоит интенсифицировать их использование.

Ключевые слова: централизованное энергосбережение, энергоэффективность, возобновляемые ресурсы, территориальное планирование, стимулирующая политика.

Удельные затраты энергоресурсов в Российской Федерации на производство в 2–3 раза и более превышают показатели в Западной Европе и других странах. Частично данные различия носят объективный характер из-за природно-климатических и экономико-географических особенностей России (в первую очередь самую холодную и продолжительную зиму, а также значительные территории). Но эти факторы могут увеличить удельные энергозатраты на 20–50 процентов (но не на существующие 200–300 и более процентов). [5]

Анализ законодательства и правоприменительной практики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности указывает на ряд недостатков, требующих устранения в целях обеспечения реализации государственной политики и мер во исполнение уже принятых основополагающих решений. Сдерживающими факторами повышения энергетической эффективности экономики страны являются:

– несовершенство соответствующей нормативно-правовой базы;

– неэффективное управление энергосбережением;

– отсутствие экономических механизмов, стимулирующих создание и использование энергосберегающих технологий;

– отсутствие учета экологических факторов;

– недостаточная информационная поддержка;

– несистемность территориального планирования по размещению объектов энергетической инфраструктуры;

– отсутствие системы поощрения предприятий, применяющих энергосберегающие технологии.

В Указе Президента РФ от 4 июня 2008 года № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» была поставлена задача снижения к 2020 году энергоемкости валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40 % по сравнению с 2007 годом. Поставленная задача получила свое отражение в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года, а также в Энергетической стратегии России на период до 2030 года.

Указом Президента РФ также предусмотрена подготовка проектов федеральных законов, предусматривающих экономические механизмы, стимулирующие хозяйствующих субъектов, применяющих энергосберегающие и экологически чистые технологии.

Во исполнение указанных поручений были подготовлены проекты федеральных законов: «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (от 23 ноября 2009г. № 261-ФЗ) и «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации (в части совершенствования нормирования в области охраны окружающей среды и введения мер экономического стимулирования хозяйствующих субъектов для внедрения наилучших технологий).

Также, в соответствии с Перечнем поручений президента по итогам расширенного заседания президиума Государственного совета Российской Федерации (от 2 июля 2009 г. Пр-1802ГС) разработан и внесен в Правительство РФ на утверждение проект Государственной программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности на период до 2020 года.

Федеральный закон № 261-ФЗ от 23 ноября 2009 года установил новые правовые, экономические и организационные основы развития данного направления. Указанный Закон закрепил важнейшие показатели, включая требования по установлению класса энергетической эффективности для отдельных товаров, а также зданий, строений и сооружений; установил требования по учету используемых энергетических ресурсов, к энергетическому паспорту, к программам энергосбережения и повышения энергетической эффективности на всех уровнях. В развитие положений данного Закона приняты и готовятся нормативные правовые акты Правительства Российской Федерации и уполномоченных федеральных органов исполнительной власти, в том числе утверждены:

– требования к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергоэффективности, включающие перечень целевых показателей и мероприятий в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности;

– план мероприятий по энергосбережению и повышению энергетической эффективности;

– правила установления требований энергоэффективности товаров, работ и услуг, размещение заказов на которые осуществляется для государственных или муниципальных нужд;

– другие нормативные правовые акты.

В действующей нормативно-правовой базе в области регулирования энергосбережения выявлено наличие пробелов в законодательстве и несоответствие содержания норм различных правовых актов, регламентирующих как технические и процедурные направления, так и вопросы управления данной сферой.

Нормы Федерального закона № 261-ФЗ, по повышению энергоэффективности деятельности хозяйствующих субъектов, нуждаются в конкретизации и принятии соответствующих нормативных правовых актов Правительства Российской Федерации по вопросам:

– установления специального порядка утилизации ламп накаливания в связи с переходом к повсеместному использованию энергосберегающих ламп;

– уточнения требований к характеристикам приборов учета используемых энергетических ресурсов, разработки механизма сбора и анализа данных по результатам предписанного проведения энергетического обследования;

– установления механизма отбора энергоэффективной продукции при заключении энергосервисных контрактов для государственных и муниципальных нужд;

– ужесточения требований к использованию высокоэнергоемких приборов, механизмов, агрегатов и технологий с целью сокращения их производства, оборота, использования и введения мер экономического поощрения продукции с лучшими энергетическими характеристиками [4].

Эффективным способом энергоэкономии в быту и на производстве могут стать такие меры, как дифференциация тарифов на использование энергоресурсов в зависимости от объемов потребления, установка автоматических включателей освещения.

На федеральном уровне должен быть разработан комплекс мер по сокращению использования горючих полезных ископаемых с выбросами продуктов горения в окружающую среду, по эффективному использованию попутного нефтяного газа, сжигание которого является примером неэффективного использования энергоресурсов.

Наряду с решением технических и технологических задач, отдельного внимания требуют проблемы управления, в частности, проведения согласованной политики различных ведомств. Из постановления Правительства Российской Федерации от 20 февраля 2010 № 67 «О внесении изменений в акты Правительства Российской Федерации по вопросам определения полномочий федеральных органов исполнительной власти в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» следует, что функции в области энергосбережения находятся в юрисдикции нескольких министерств, а единый орган по выработке государственной политики в области энергосбережения отсутствует. В частности, «организация участие в разработке и реализации программ, проектов и мероприятий в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе федеральных целевых и ведомственных программ» относится к сфере юрисдикции как Министерства регионального развития, так и Минэнерго России, и Минэкономразвития России. Контрольные полномочия разделены между Федеральной антимонопольной службой и Ростехнадзором. На Министерство энергетики РФ возложена задача создания Государственной информационной системы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности и условий ее функционирования, однако отсутствует механизм предоставления информации от других министерств и ведомств [4].

Перечнем поручений Президента РФ от 2 июля 2009 г. № Пр-1802ГС рекомендовано органам государственной власти субъектов РФ разработать и принять:

– комплексные программы по повышению энергетической эффективности региональной экономики и по сокращению энергетических издержек в бюджетном секторе;

– комплекс мер по снижению энергетических издержек предприятий малого и среднего бизнеса.

В то же время существует ряд проблем, связанных с распределением полномочий и источников финансирования для их реализации. Решение этих проблем невозможно без государственной поддержки правового и организационного характера.

В бюджетном законодательстве необходимо предусмотреть механизмы компенсации затрат регионов и муниципалитетов на данные цели, привести в соответствие нормы Федерального закона № 261-ФЗ, и Федерального закона № 131-ФЗ, устанавливающего крайне узкие рамки полномочий органов местного самоуправления.

При включении в состав показателей оценки эффективности деятельности органов местного самоуправления (Указ Президента РФ от 28 апреля 2008 г. № 607) показателей энергосбережения и повышения энергетической эффективности необходимо закрепить экологические критерии их деятельности, путем введения ряда норм по повышению экологической безопасности.

Одним из приоритетов политики энергосбережения должно стать совершенствование системы территориального планирования размещения промышленных энергетических объектов. Комплексный подход к управлению, основанный на анализе особенностей отдельных территорий, в т.ч. подлежащих особой экологической защите или характеризующихся сложными климатическими условиями, позволит подойти к решению стратегических задач с большей эффективностью и степенью энергосбережения, а также обеспечить выполнение природоохранных мер по сохранению природоресурсного потенциала и окружающей среды.

В настоящее время недостаточное внимание уделяется использованию альтернативных источников энергии, в том числе: солнечной энергии, энергии ветра, энергии воды (малых рек, морских водных потоков, приливов и отливов), вторичных энергетических ресурсов (отходов), геотермальной энергии.

Альтернативные источники энергии помимо сбережения невозобновляемых горючих полезных ископаемых для будущих поколений, позволяют сохранить тепловой баланс планеты.

Учитывая большое значение и потенциал возобновляемых энергоисточников и необходимость создания инновационного энергетического пространства, реализации социальных задач, предстоит интенсифицировать их использование.

Полностью избежать загрязнения окружающей среды невозможно, однако каждый шаг к отказу от дополнительного источника загрязнения или нейтрализации его негативного воздействия играет большую роль в стабилизации экологического баланса, сохранении природного потенциала, охраны здоровья людей [2].

Развитие возобновляемых энергоисточников в России находится на ранних этапах. В 2012 году их доля в общем объеме производства составила 0,9 % с установленной мощностью в 2,1ГВт. К 2020 году, согласно планам правительства, она должна возрасти до 4,5 % с установленной мощностью в 25ГВт [1, 5].

Несмотря на серьезные проблемы, ограничивающие рост использования возобновляемых энергоисточников в России, существуют весомые предпосылки для их активного развития (Таблица 1), отмечают исследователи.

В России возобновляемые энергоисточники играют важную роль в развитии распределенной энергетики, которая является одной из экономически выгодных сфер использования возобновляемых энергоисточников.

Потенциальные масштабы возможного эффективного использования возобновляемых энергоисточников в сфере распределенной генерации измеряются гигаваттами. Наряду с законодательной и финансовой поддержкой развития возобновляемых энергоисточников в централизован-

ной энергетике, государственная политика должна учитывать и стимулировать развитие возобновляемых энергоисточников в регионах с распределенной энергетикой.

Таблица 1

Проблемы	Предпосылки
Запасы ископаемого сырья	Необходимость обеспечения энергией удаленных регионов
Низкий уровень внимания к проблемам экологии и их предупреждению	Высокая стоимость создания новых электросетей и транспортировки ископаемого топлива
Низкий уровень развития-научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в сфере ВИЭ	Необходимость модернизации единой энергетической системы, требующая значительных инвестиций
Отсутствие/ограниченность инновационных компаний в сфере ВИЭ	Высокие тарифы, преимущественно за счет сетевой составляющей
	Разработка комбинированных источников энергии

Мировая практика показывает, что объекты возобновляемой энергетики (солнечные фотоэлектрические элементы, малые ветровые турбины и т.д.) показали себя экономически более эффективными, чем традиционные электростанции, и в некоторых секторах промышленного производства: морская и речная навигация, катодная защита трубопроводов и устьев скважин, энергоснабжение морских газовых и нефтяных платформ, энергоснабжение телекоммуникационных устройств и т.д. Область применения возобновляемой энергетики в мировой промышленности постоянно расширяется, затрагивая все новые направления. Помимо выработки электричества при относительно более низких затратах в специфических условиях, промышленное использование возобновляемых энергоисточников способствует созданию нового рынка возобновляемой энергетики, что стимулирует ускоренное развитие инновационных технологий для нестандартной области применения.

Для стимулирования развития возобновляемой энергетики необходимо законодательная поддержка государства. Приведем пример законодательно закрепленных мер Европейских государств по поддержанию и внедрению возобновляемых энергоресурсов:

- прямое финансирование модернизаций, связанных с энергопотреблением в зависимости от величины инвестиций, степени энергоэффективности с обязательным последующим контролем;

- прямые субсидии на системы устойчивой энергии: тепловые насосы, мини-ТЭЦ, термальные солнечные коллекторы;
- финансовая поддержка малоимущих домохозяйств;
- индивидуальная система налоговых вычетов при внутреннем найме сотрудников поставщиком услуг;
- снижение НДС на стоимость рабочей силы и (или) материалов. Правительство принимает более низкие ставки НДС на материалы и услуги в секторе устойчивой энергии (теплоизоляции, систем обогрева и систем солнечной энергии);
- зеленые/льготные ссуды. Банки и (или) государственные организации выдают ссуды с выгодными процентными ставками для финансирования проектов по устойчивой энергии или проекты по реконструкции объектов и снижению энергопотребления;
- меры по индексации арендной платы против конфликтов интересов. Владелец недвижимости, проводящий модернизацию и повышающий энергоэффективность объекта, зачастую не получает от этого выгоды, в то время как арендатор оплачивает меньшие счета за электроэнергию. Таким образом, в некоторых странах или регионах максимальный размер арендной платы, которую определяет владелец дома, будет зависеть от класса энергоэффективности;
- «стимулирующие» тарифы. В некоторых странах поставщики электроэнергии перекупают по привлекательным ставкам излишек электроэнергии, образующийся в результате использования возобновляемых источников энергии;
- стороннее финансирование. Организации, осуществляющие стороннее финансирование энергетических проектов, называются энергосервисными компаниями, или ЭСК. ЭСК осуществляют проектирование, сооружение, монтаж, финансирование и обслуживание проектов, имеющих своей целью снабжать объекты энергией через ее производство и (или) снижать потребность в ней. При этом город или сообщество вкладывает часть средств для энергетической модернизации зданий. Эта сумма используется в качестве инвестиции, а возврат средств осуществляется в форме энергосбережения. Затем прибыль от инвестиций снова вкладывается в последующие этапы модернизации по энергосбережению;
- налоги на выбросы CO2. Эти налоги представляют собой не способ стимулирования, а метод сдерживания, оказывающий влияние на ряд отраслей на государственном уровне, а в некоторых странах – и на местном. Более того, финансовые поступления от подобных налогов (как и от продажи разрешений на выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду) зачастую вкладываются в реализацию планов экологически чистой энергии [5, 6].

Особенности энергетической обстановки в России накладывают специфические требования к формированию программ освоения возобновляемых источников энергии. Наряду с развитием технологий использования возобновляемых источников энергии в составе систем централизованного энергоснабжения, необходимо в первую очередь обратить внимание на разработку и создание систем автономного электро- и теплоснабжения потребителей, развитие малой распределенной энергетики. Именно в этой сфере энергоустановки на ВИЭ уже сегодня в ряде случаев оказываются конкурентоспособными и могут обеспечить положительный экономический, социальный и экологический эффекты. Вместе с тем и в этой области также требуется проведение стимулирующей государственной политики, формирование которой в России пока еще находится в зачаточной стадии. Очевидно, что развитие автономной и распределенной энергетики с использованием возобновляемых источников энергии во многом будет определяться инициативой региональных и местных властей, а также частного бизнеса. Большое значение имеет и готовность научных и проектных организаций предложить эффективные технические решения по практическому использованию возобновляемых источников энергии в различных секторах экономики [2, 3, 4].

Библиографический список

1. Renewables 2013. Global status report. Renewable Energy Policy Network for the 21st Centure. – URL: www.ren21.net.

2. Государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». – URL: http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/afc/.

3. Постановление от 28 мая 2013 г. N 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

4. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

5. Первый Международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» (REENFOR-2013). – URL: www.reenfor.org/.

6. Третий Невский международный экологический конгресс «Энергоэффективность и экологический прогресс». – URL: www.reenfor.org/.

К содержанию

УДК 533.6.011

ОЦЕНКА ВАРИАЦИЙ ПОЛОЖЕНИЯ ЦЕНТРА ДАВЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ МАЛОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ ЗАТУПЛЕННЫХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ИХ ГИПРЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Ю.А. Мокин, В.И. Киселев

Физическая задача оценки максимально возможных величин вариаций центра давления при заданном ограничении величин вариаций поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА), имеющих форму тела вращения, путем линеаризации сведена к математической задаче определения нормы линейного оператора-функционала. Получено интегральное выражение линейного функционала, определяющего изменение положения центра давления для заданного изменения формы тела. Получено интегральное выражение нормы указанного оператора-функционала для заданной ограничительной функции вариаций поверхности. Изложенная методика пригодна для оценки масштаба возможных величин изменений положения центра давления ГЛА при малых вариациях поверхности.

Ключевые слова: гиперзвуковой летательный аппарат, тело вращения, малые углы атаки, слабые вариации поверхности, центр давления.

1. Введение. Определение положения центра давления осесимметричных летательных аппаратов (ЛА) при их движении со сверхзвуковыми скоростями является одной из стандартных задач аэродинамики [1, 2, 3]. Расчет коэффициента центра давления тела заданной геометрии для заданных условий обтекания может быть выполнен с достаточно высокой точностью с использованием известных методов и комплексов программ [1, 2]. Будем называть подобный процесс на основе численного решений невязких уравнений Эйлера или осредненных уравнений Навье-Стокса решением прямой задачи аэродинамики.

Однако в ряде случаев может возникнуть необходимость решения в некотором смысле обратной задачи. Например, при некоторых ограничениях на допустимое изменение исходной формы ЛА или при оценке максимально возможных вариаций положения центра давления в условиях дефицита информации о возможном изменении формы ЛА в процессе абляции теплозащиты. На практике такие «обратные» задачи можно решить, как правило, путем многократного итерационного решения прямой задачи, с помощью проведения многофакторного параметрического анализа. Такой способ, очевидно, не является оптимальным в смысле трудоемкости и не гарантирует получение точного в математическом смысле решения. До настоящего времени авторам не встречались работы, в которых были бы сделаны по-

пытки прямого, математически строгого, решения подобной «обратной» задачи применительно к оценке изменения положения центра давления, совпадающего для тел вращения с положением фокуса x_f по углу атаки.

Сложность аналитической оценки коэффициента центра давления обусловлена наряду с другими обстоятельствами еще и тем, что при малых углах атаки он представим как частное производных по углу атаки коэффициентов момента тангажа и нормальной силы ($\bar{x}_f = m_z^\alpha / c_y^\alpha$), каждый из которых определяется сложным интегральным выражением и также завит от изменения формы тела.

В настоящей работе описана постановка и приведено «математически строгое» решение такой обратной задачи – задачи оценки максимально возможных вариаций коэффициента центра давления при заданных ограничениях на величины изменения геометрии (формы) затупленных тел вращения при их гиперзвуковом обтекании под малыми углами атаки. Постановка и решение указанной задачи основаны на использовании ДГЛ–метода решения задач гиперзвуковой аэродинамики [4]. Суть этого метода заключается в дифференциальной форме представления обобщенной гипотезы локальности, применительно к расчету давления на поверхности тела, с использованием результатов точных численных расчетов и их аппроксимации полиномом Тейлора.

2. Постановка задачи. Рассмотрим сверхзвуковое обтекание затупленного тела вращения с малыми вариациями поверхности под малым углом атаки. Уравнение, описывающее поверхность тела в цилиндрической системе координат (СК) (x, r, φ), продольная ось Ox направлена от носка к торцу, запишем в виде:

$$r(x,\varphi) = y(x) + \varepsilon_r \cdot \delta y(x); \quad \{0 \le x \le L;\ 0 \le \varphi \le 2\pi\}, \qquad (1)$$

где $y(x)$ – уравнение образующей исходного контура тела; L – полная длина тела; ε_r – параметр малости; $\delta y(x)$ – слабая вариация образующей. Совместно с цилиндрической будем использовать декартову СК с общим началом, расположенным в передней точке тела, и продольной осью Ox:

$$(y = r \cdot \cos\varphi,\ z = r \cdot \sin\varphi).$$

При $\alpha = 0$ вектор скорости набегающего потока $\vec{V}_\infty$ определен компонентами $V_x > 0,\ V_y = 0,\ V_z = 0$. При $\alpha > 0$ плоскость угла атаки совпадает с плоскостью Oxy, компонента $V_y > 0$, а угол $\varphi = 0$ соответствует подветренному меридиану.

Исходный контур тела предполагается гладким: функция $y(x)$ – дважды кусочно-непрерывно дифференцируемой с производной $y'(x) \ge 0$; $y(0) = 0$; $y(L) = R_м$, где $R_м$ – радиус миделевого сечения. Слабость ва-

риации $\delta y(x)$ предполагает малость не только ее самой, но и производной $\delta y'(x)$, за исключением, возможно, особой передней критической точки, в которой $y'(0) = +\infty$.

С помощью произвольно выбранной кусочно-непрерывной ограничительно-нормирующей функции $0 \le \psi(x) \le \varepsilon_n \sqrt{1 + y'^2(x)}$, $x \in (0, L]$ с носителем $\Psi \subset (0, L]$ на множестве вариаций $\delta y(x)$, равных нулю при $x \notin \Psi$, определим норму:

$$\left\| \delta y(x) \right\|_{\psi} = \sup_{x \in \Psi} \left| \delta y(x) / \psi(x) \right| \qquad (2)$$

Множество вариаций $\delta y(x)$ с нормой (2) образуют линейное нормированное пространство Δ, в котором условие $\left\| \delta y(x) \right\|_{\psi} \le 1$ тождественно ограничению величины вариации неравенством:

$$\left| \delta y(x) \right| \le \psi(x). \qquad (3)$$

Произвол выбора $\psi(x)$ и ее носителя Ψ можно, наряду с другими возможностями, использовать, например, в следующих целях:

а) при $\psi_1(x) = 1$ – равномерно ограничиваются величины радиальных вариаций поверхности (в цилиндрической СК);

б) при $\psi_2(x) = \sqrt{1 + y'^2(x)}$ – реализуется равномерное ограничение величин вариаций по нормали к поверхности;

в) при $\psi_3(x) = y'(x)$ – равномерно ограничивается величина вариаций поверхности в продольном направлении по оси *Ox*.

В общем случае выбор ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ целесообразно проводить с учетом конкретных особенностей рассматриваемой задачи, с учетом наличия или отсутствия априорной информации о возможных или допустимых вариациях поверхности ЛА. На промежутках или в точках $x \notin \Psi$, где $\psi(x) = 0$, поверхность тела не варьируется.

Предполагается наличие инструмента (метода и программы расчета, например, в рамках невязких уравнений Эйлера для моделей совершенного газа или равновесно диссоциированного воздуха) для численного решения прямой задачи аэродинамики в указанном выше смысле. С помощью прямого расчета обтекания тела с исходной образующей $y(x)$ под малым углом атаки α могут (должны) быть получены исходные значения всех его стационарных аэродинамических коэффициентов, в том числе – производной коэффициента нормальной силы по углу атаки $c_{y_0}^{\alpha}$, производной коэффициента момента тангажа $m_{z_0}^{\alpha}$ и коэффициента центра давления $\bar{x}_{f_0} = m_{z_0}^{\alpha} / c_{y_0}^{\alpha} = x_{f_0} / L$.

Физическую суть рассматриваемой задачи можно сформулировать так: на множестве вариаций образующей $\delta y(x) \in \Delta$, удовлетворяющих ограничению (3), требуется получить оценку максимально возможного изменения положения центра давления – приращения $\Delta x_f = x_f - x_{f_0}$, где x_f – координата центра давления тела с образующей $[\, y(x) + \delta y(x)\,]$.

Простота физического смысла рассматриваемой задачи не соответствует сложностям ее строгой математической формулировки. Заметим, что при сделанных предположениях без дополнительного ограничения типа (3) величины $\delta y'(x)$ задача отыскания конкретной вариации $\delta y^*(x) \in \Delta$, реализующей $\max\left|\Delta x_f\right|$, является математически некорректной. Во избежание нерационального усложнения постановки задачи, при сохранении ее физической сути, математической строгости и корректности в смысле существования решения, используем метод линеаризации по малому параметру ε_r.

Выделив в приращениях $\Delta c_y^\alpha[\varepsilon_r \cdot \delta y(x)]$, $\Delta m_z^\alpha[\varepsilon_r \cdot \delta y(x)]$ и соответственно в приращении $\Delta x_f[\varepsilon_r \cdot \delta y(x)]$ главные линейные части по ε_r, первые вариации δc_y^α, δm_z^α, δx_f, можно трактовать величину δx_f в качестве линейного оператора-функционала на линейном пространстве Δ функций $\delta y(x)$ с нормой (2).

При этом физическую задачу оценки максимально возможного изменения коэффициента центра давления на множестве вариаций образующей Δ, удовлетворяющих ограничению (3), можно отождествить с математической задачей нахождения нормы указанного оператора-функционала:

$$\left\|\delta x_f\right\|_\psi \overset{def}{=} \sup_{\delta y(x)\in\Delta} \frac{\left|\delta x_f\right|}{\left\|\delta y(x)\right\|_\psi}. \qquad (4)$$

Именно такая общая постановка задачи использована в настоящей работе. Далее изложена техническая часть решения этой задачи.

3. Решение задачи. Решение рассматриваемой задачи проведено в предположении существования, возможно даже – потенциального, инструмента (программы, метода, методики…) для решения прямой задачи аэродинамики. В ряде случаев в качестве такого инструмента в первом приближении удобно использовать теорию Ньютона, метод местных сфер или другие приближенные методы.

На первом этапе решения задачи с использованием выбранного инструмента производится расчет обтекания тела с исходной образующей $y(x)$ при нулевом ($\alpha = 0$) и малом ($\alpha \approx 1^\circ$) углах атаки при заданных параметрах набегающего потока ($V_\infty, \rho_\infty, p_\infty$).

На основе этих расчетов, в части интегральных стационарных аэродинамических характеристик и распределения давления по поверхности ЛА, могут (должны) быть получены: $c_{y_0}^{\alpha}$ – производная коэффициента нормальной силы по углу атаки; $m_{z_0}^{\alpha}$ – производная коэффициента момента тангажа по углу атаки; $\bar{x}_{f_0}$ – коэффициент центра давления тела исходной геометрии при малых углах атаки; $\Phi_0(x), \Phi_t(x), \Phi_{tt}(x)$ – коэффициенты–функции формулы Тейлора, определяющей величины коэффициента давления на поверхности тела при малых вариациях и самой поверхности и угла атаки.

Указанная формула Тейлора второго порядка имеет вид [4]:

$$\Phi(x,t) \approx \Phi_0(x) + \Phi_t(x)\cdot\Delta t + \frac{1}{2}\Phi_{tt}(x)\cdot\Delta t^2, \qquad (5)$$

где $0 \le x \le L$ – продольная координата точки поверхности; $t = \tan(\alpha_м)$ – тангенс местного угла атаки в точке; $\Phi(x,t) = 2(p - p_\infty)/\rho_\infty \cdot V_\infty^2$ – коэффициент давления в рассматриваемой точке; $\Phi_0(x)$ – коэффициент давления по длине исходного тела для нулевого угла атаки α; $\Phi_t(x)$, $\Phi_{tt}(x)$ – производные функции давления по t, вычисленные с использованием величин давления на наветренной и подветренной образующих исходного тела при малом угле атаки; $\Delta t = t(x,\varphi) - t_0(x)$ – приращение тангенса местного угла атаки ($t_0(x) = y'(x)$).

Величины коэффициентов c_y, m_z тел вращения в общем случае определяются интегральными выражениями [4]:

$$c_y = -\frac{1}{S_м}\int_0^L\int_0^{2\pi}\Phi(x,\varphi)\cdot r(x)\cdot\cos\varphi\, d\varphi\, dx, \qquad (6)$$

$$m_z = -\frac{1}{S\cdot L}\int_0^L\int_0^{2\pi}\Phi(x,\varphi)\cdot[x\cdot r(x) + r^2(x)\cdot p(x)]\cdot\cos\varphi\, d\varphi\, dx, \qquad (7)$$

где $\Phi(x,\varphi)$ – коэффициент давления на поверхности тела; $r(x) = y(x)$; $p(x) = r_x'(x) = y'(x)$; $S = \pi\cdot R_м^2$ – площадь миделевого сечения тела, L – длина тела, характерная длина.

В рамках ДГЛ-метода функция $\Phi(x,\varphi)$ для тел вращения является сложной функцией пяти аргументов:

$$\Phi(x,\varphi) \Rightarrow \Phi(x,t(x,\varphi)) \Rightarrow \Phi(x,t(x,\varphi,r,p,\alpha)) \Rightarrow \Phi(x,\varphi,r,p,\alpha). \qquad (8)$$

Правила вычисления частных производных до третьего порядка включительно по всем аргументам сложной функции $\Phi(x,\varphi,r,p,\alpha)$ и их связь с функциями $\Phi_0(x),\Phi_t(x),\Phi_{tt}(x)$ описаны в [4].

Будем использовать далее технологию метода ДГЛ. Заменяя в интегральных выражениях (6), (7) функцию давления общего вида $\Phi(x,\varphi)$ на функцию $\Phi(x,\varphi,r,p,\alpha)$, и вычисляя их производные по углу атаки α в точке $\alpha_0=0$, получаем интегральные выражения производных c_y^α, m_z^α для исходной геометрии тела:

$$c_y^\alpha=\frac{1}{S}\int_0^L\int_0^{2\pi}\Phi_t(x)\cdot(1+p^2(x))\cdot r(x)\cdot\cos^2\varphi\,d\varphi\,dx, \tag{9}$$

$$m_z^\alpha=\frac{1}{S\cdot L}\int_0^L\int_0^{2\pi}\Phi_t(x)\cdot(1+p^2(x))\cdot r(x)\cdot(x+r(x)\cdot p(x))\cos^2\varphi\,d\varphi\,dx. \tag{10}$$

Опуская явное указание аргумента x, $\Phi_t=\Phi_t(x)$, $p=p(x)$, $r=r(x)$, и, интегрируя (9) и (10) по φ, с учетом равенства $S=\pi\cdot R_м^2$, получаем компактные выражения:

$$\begin{aligned} c_y^\alpha&=\frac{I_1}{R_м^2}, \quad I_1=\int_0^L\Phi_t\cdot(1+p^2)\cdot r\,dx,\\ m_z^\alpha&=\frac{I_2}{R_м^2\cdot L}, \quad I_2=\int_0^L\Phi_t\cdot(1+p^2)\cdot r\cdot(x+r\cdot p)\,dx \end{aligned} \tag{11}$$

Таким образом, координата x_f центра давления при обтекании под малыми углами атаки тела исходной геометрии определяется выражением:

$$x_f=\frac{m_z^\alpha}{c_y^\alpha}L=\frac{I_2}{I_1}. \tag{12}$$

Для тела близкой геометрии с уравнением поверхности (1) первая вариация x_f определяется выражением:

$$\delta x_f=\frac{I_1\cdot\delta I_2-I_2\cdot\delta I_1}{I_1^2}=\frac{\delta I_2-x_f\cdot\delta I_1}{I_1}. \tag{13}$$

Вычислив вариации $\delta I_1,\delta I_2$ интегралов (11) с неизменными пределами интегрирования числитель выражения (13) можно представить в виде:

$$\delta I_2 - \delta I_1 \cdot x_f = \int_0^L \{\Phi_t \cdot (1+p^2)\cdot(x - x_f + 2r\cdot p)\cdot \delta r +$$

$$[\Phi_{tt}\cdot(1+p^2)\cdot r\cdot(x-x_f+r\cdot p) + 2\Phi_t \cdot p\cdot r\cdot(x-x_f+r\cdot p) + \quad (14)$$

$$\Phi_t\cdot(1+p^2)\cdot r^2]\delta p\}dx.$$

Интегрируя по частям второе слагаемое в подынтегральном выражении (14) после ряда преобразований получаем выражение первой вариации продольной координаты центра давления (13) в виде:

$$\delta x_f = \frac{1}{I_1}\left\{-\int_0^L F(x)\cdot\delta r(x)dx + G(L)\cdot\delta r(L)\right\}, \quad (15)$$

где:

$$G(x) = \Phi_{tt}(1+p^2)(x-x_f+pr)r + 2\Phi_t p(x-x_f+pr)r + \Phi_t\cdot(1+p^2)r^2, \quad (16)$$

$$F(x) = \Phi_{ttx}\cdot(1+p^2)\cdot r\cdot(x-x_f+r\cdot p) +$$

$$\Phi_{tt}\cdot[p\cdot(x-x_f+r\cdot p)\cdot(1+p^2+2r\cdot y'') + r\cdot(1+p^2)\cdot(1+p^2+r\cdot y'')] +$$

$$\Phi_{tx}\cdot[2r\cdot p\cdot(x-x_f+r\cdot p)\cdot p + r^2\cdot(1+p^2)] +$$

$$\Phi_t\cdot[2r\cdot y''\cdot(x-x_f+3r\cdot p) + 2r\cdot p\cdot(1+2p^2) - (1-p^2)\cdot(x-x_f)]. \quad (17)$$

В выражениях (15), (16), (17): $\Phi_t(x), \Phi_{tt}(x)$ – коэффициенты-функции формулы Тейлора (5); $\Phi_{tx}(x), \Phi_{ttx}(x)$ – их производные по аргументу x. Выражение (15) представляет собой искомый линейный оператор-функционал, отображающий элементы линейного нормированного пространства $\delta y(x) \in \Delta$ на числовую прямую.

Норма линейного оператора-функционала (15) для заданной ограничительно-нормирующей функции $\psi(x)$ определяется выражением:

$$\left\|\delta x_f\right\|_\psi = \frac{1}{I_1}\left\{\int_0^L |F(x)|\cdot\psi(x)dx + |G(L)|\cdot\psi(L)\right\}. \quad (18)$$

С точки зрения практического использования полученного результата отметим его эквивалентность утверждению, что малая вариация поверхности вида:

$$\delta y(x) \cong \begin{cases} -\psi(x)\cdot \operatorname{sign} F(x), & \text{при } 0 < x < \mathrm{L}; \\ \psi(x)\cdot \operatorname{sign} G(x), & \text{при } x = \mathrm{L}, \end{cases}$$

со сглаженными точками разрыва первого рода, для соблюдения требования ее слабости при изменении знака $\delta y(x)$, обеспечивает близкое максимально возможному, предельному при ограничении (3), приращение продольной координаты центра давления δx_f положительного знака.

Выражения (15)–(18) полностью определяют математически точное решение поставленной задачи.

4. Замечания. Принимая во внимание условный математический смысл самого понятия *центра давления*, из двух альтернативных возможностей: оценка вариаций безразмерной величины *коэффициента центра давления* или его размерной *продольной координаты*, авторы предпочли вторую не только по соображениям большей наглядности, но и во избежание неопределенностей и нюансов, связанных с изменением длины тела при вариациях его поверхности в районе критической точки. Также авторы исключили рассмотрение и вопроса оценки возможного влияния на положение центра давления продольной вариации δL кормового среза, длины тела.

Верификация полученного общего решения может (должна) быть основана на конкретных оценках для ЛА различной формы. Предполагается численное приближенное вычисление интегралов (15), (18). Однако для тел простой формы (конус, сфера, эллипсоид) с использованием теории Ньютона или метода местных сфер В.В. Лунева [5] возможно получение и аналитических результатов.

Возможны различные пути верификации: тестовый и перекрестный. При тестовой верификации с использованием разработанной методики решается специально выбранная задача с заранее известным «ответом». Под перекрестной верификацией мы подразумеваем прямую проверку конкретной оценки, полученной на основе использования одного инструмента (метода, программного комплекса) с помощью другого инструмента путем решения прямой задачи аэродинамики или проведения эксперимента. Изложение имеющихся результатов верификации изложенной методики выходит за рамки настоящей работы.

Относительно вопроса точности полученного решения отметим следующее. Не учет влияния сил трения и сил давления в донной области, с учетом определяющего влияния сил давления на притуплении и боковой поверхности на положение центра давления для ГЛА типичных форм, может привести лишь к незначительным погрешностям. Однако влияние изменения формы притупления на распределение давления на боковой поверхности, например, затупленных конусов относительно большого удлинения, то есть эффекта интерференции, может привести к существенно большему изменению положения центра давления, чем непосредственное малое влияние изменения формы притупления [1].

Таким образом, полученное в настоящей работе решение, методика получения оценок положения центра давления, априори имеют высокую точность только для относительно коротких сильно затупленных ЛА, или более удлиненных с неизменной формой притупления. В других случаях изложенная методика пригодна для оценки масштаба возможных величин изменения положения центра давления.

Библиографический список

1. Липницкий, Ю.М. Нестационарная аэродинамика баллистического полета / Ю.М. Липницкий, А.В. Красильников, А.Н. Покровский, В.Н. Шманенков. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.

2. Пахомов, Ф.М. Аэродинамика длинных тонких конусов с асимметричной формой затупления / Ф.М. Пахомов, М.Г. Булыгин, В.Д. Гольдин, Ю.А. Мокин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2009. – № 4(9). – С. 85–92.

3. Краснов, Н.Ф. Аэродинамика. Ч. I. Учебник для втузов / Н.Ф. Краснов. – М.: «Высш. школа», 1976. – 384 с.

4. Мокин, Ю.А. О возможностях решения задач гиперзвуковой аэродинамики на основе дифференциальной формы представления обобщенной гипотезы локальности и ее композиции с точными численными методами / Ю.А. Мокин // Космонавтика и ракетостроение. – 2008. – Вып. 2(51). – С. 136–145.

5. Лунев, В.В. Гиперзвуковая аэродинамика / В.В. Лунев. – М.: Машиностроение, 1975. – 328 с.

К содержанию

УДК 629.764 + 533.6.013

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

В.И. Пегов, В.И. Киселев

Получены аналитические формулы вычислений аэродинамических характеристик (АДХ) ракет-носителей (РН) сложной пространственной конфигурации. С целью сокращения времени расчета характеристик выполнено предварительное аналитическое преобразование исходных данных к виду с минимальным числом арифметических операций.

Ключевые слова: аэродинамический блок, баллистическая ступень, ракета-носитель, коэффициент осевой силы, коэффициент кинематической вязкости, коэффициент донного сопротивления.

Введение

При разработке и реализации крупных технических проектов, в том числе и при создании принципиально новых летательных аппаратов (ЛА), приходится прорабатывать огромное количество возможных (альтернативных) вариантов. Несмотря на высокое быстродействие современных компьютеров и наличие суперкомпьютеров, применение прямых численных методов, например метода контрольного объема, при аэродинамическом расчете РН, может привести к неоправданно большим временным и материальным затратам и потере контроля исследователем за процессом. В связи с этим возрождается интерес к приближенным аналитическим методам исследования и методам сокращения времени вычислений на основе предварительной аналитической обработки исходной информации.

В практике проектирования возникает необходимость иметь корпус, составленный из цилиндров разных диаметров, соединенных коническим переходом. Геометрическая форма любого блока РН предполагается состоящей последовательно из носовой части (шаровой сегмент и усеченный конус), и комбинации конических и цилиндрических участков. Шаровой сегмент задается радиусом сферы, любой из усеченных конусов или цилиндров соответственно задается диаметром нижнего основания, высотой. В одном случае применяются моноблочные схемы при последовательном соединении ступеней, а в другом – многоблочные схемы при параллельном соединении ступеней (так называемые пакетные схемы, рис. 1).

Целью настоящей статьи является разработка приближенного метода расчета АДХ РН по заданным геометрическим характеристикам ступеней и её блоков.

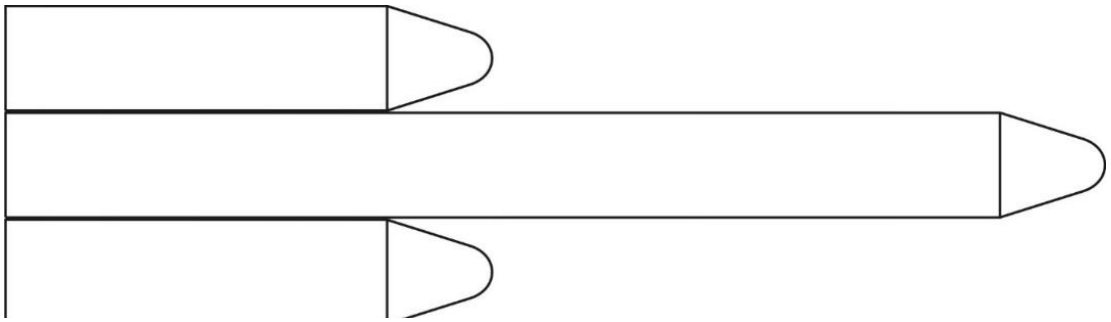


Рис. 1. Аэродинамическая компоновка РН (пакетная схема)

Методы расчета аэродинамических характеристик РН

Для достаточно точного и быстрого определения АДХ уже на первой стадии проектирования возникла необходимость систематизации имеющихся экспериментальных данных и создания приближенных методов расчета.

Разрабатываемая методика основывается на определении АДХ отдельных составных элементов корпуса РН (шарового сегмента, усеченных конусов, цилиндров, кормового среза) с последующим их суммированием с учетом интерференции между элементами при последовательном или параллельном расположении блоков.

В целом по диапазону скоростей полета (или чисел Маха M) можно выделить движение РН при дозвуковых ($M < M_{кр}$, где $M_{кр}$ – критическое число Маха, при котором на поверхности ЛА появляются области со сверхзвуковыми скоростями потока), трансзвуковых $(M_{кр} \le M \le 1{,}2)$, сверхзвуковых $(1{,}2 < M \le 5)$ и гиперзвуковых $(M > 5)$ скоростях.

В целях достижения максимальной весовой отдачи конструкции РН, допуская необходимые осевые перегрузки, исключают наличие поперечных (изгибающих) нагрузок. Поэтому весь участок выведения РН совершается при небольших углах атаки, и наиболее важными, особенно на первом этапе проектирования, являются коэффициенты осевой силы сопротивления c_x, нормальной силы c_y и боковой силы c_z, которые определяются в связанной системе координат и относятся к скоростному напору $\rho V^2/2$ и площади миделя S_M.

Расчет коэффициента осевой силы сопротивления c_x

Расчет полного коэффициента осевой силы c_x проводится всоответствии с формулой [1]:

$$c_x = c_{xp} + c_{xдон} + c_{xf}\,, \qquad (1)$$

в которой c_{xp} , $c_{xдон}$, c_{xf} – соответственно составляющие коэффициенты осевой силы давления (или волнового сопротивления), донной осевой силы тела и осевой силы трения.

Сопротивление силы давления острого конуса $c_{xk\ остр.}$

Для дозвуковых скоростей ($M < M_{кр}$) на основании анализа результатов испытаний острых конусов [2] получена аппроксимирующая зависимость:

$$c_{xk\ остр.} = \frac{1{,}5\sin\theta_s}{\sqrt{1-M^2}}(1-0{,}85\cos\theta_s), \qquad (2)$$

где θ_s – угол полураствора конуса.

При трансзвуковом обтекании ($M_{кр} \le M \le 1{,}1$) коэффициент сопротивления острого конуса может быть определен по интерполяционной формуле, полученной на основе экспериментальных данных [2]:

$$c_{xk\ остр.} = \frac{M^2-1}{(\kappa+1)\ M^2} + \frac{1+\kappa M^2}{M^2}\left(1-\frac{2}{3}\cos\theta_s\right)\ \sin\theta_s . \qquad (3)$$

Для $M = 1{,}25$ справедлива оценка:

$$c_{xk\ остр.} = 0.5/\lambda + 0.014\ \lambda ,$$

где $\lambda = 1/(2\ tg\,\theta_s)$.

На основании анализа имеющихся экспериментальных данных [2] и данных З. Копала [1] для расчета коэффициента сопротивления силы давления острого конуса при сверхзвуковых скоростях предлагается следующая эмпирическая формула:

$$c_{xk\ остр.} = 1{,}8\ \bar{\theta}_s^{\frac{\pi}{2}}\ M^{-3{,}3\sqrt{\bar{\theta}_s}} + \left(2{,}04 + 0{,}126\ \bar{\theta}_s\right)\sin^2\theta_s , \qquad (4)$$

где угол полураствора конуса $\bar{\theta}_s$ задается в радианах. По формуле (4) получается хорошее совпадение с данными З. Копала (ошибка < 5%) во всем широком диапазоне чисел M и углов θ_s, рассчитанных З. Копалом ($2 \le M \le 7$; $5^\circ \le \theta_s \le 40^\circ$). Сравнение результатов расчета по формулам (2)–(4), экспериментов [2] приведено на рис. 2. Формула (4) позволяет также оценивать значение $C_{xk\ остр.}$ в диапазоне от M = 1,5 до M = 2, для которого З. Копал не дает решения (пунктирные кривые на рис. 2).

При $M \ge 3$ можно воспользоваться более простой формулой:

$$c_{xk\ остр.} = 2\sin^2\theta_s \left(1{,}04 + \frac{0{,}2}{M^{1,5}\ \bar{\theta}_s^{1,37}}\right). \qquad (5)$$

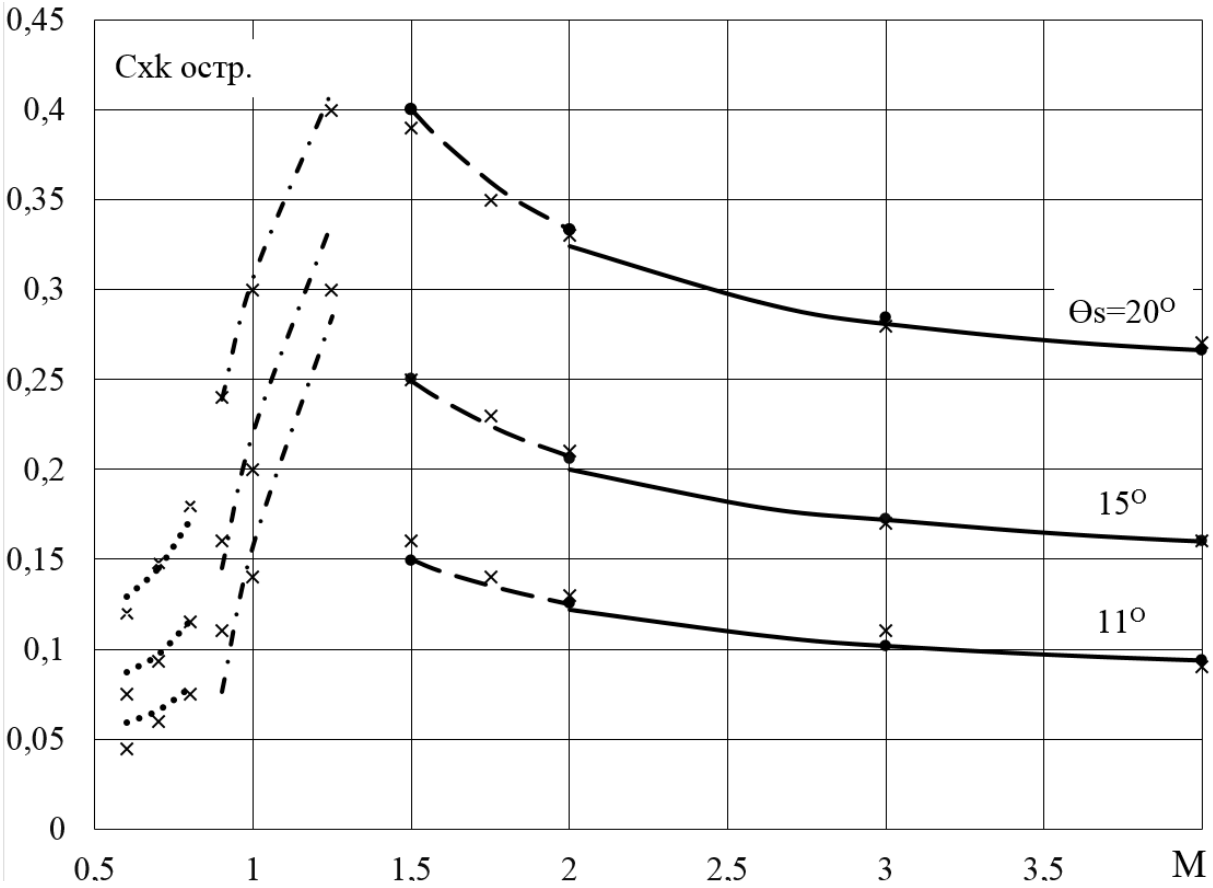


Рис. 2. Сравнение данных экспериментов (×××)
с результатами расчета коэффициента $c_{xk\ остр.}$:
– по формуле (2) для $M < M_{кр}$ (·····);
– по формуле (3) для $M_{кр} \le M \le 1{,}25$ (— · —);
– по формуле (4) для $1{,}5 \le M$ (• • •);
– данные З. Копала (——)

Коэффициент сопротивления силы давления сферического притупления $c_{x\ сф.}$

Для проведения аэродинамических расчетов носовой части РН требуется знать давление и силы, действующие на сферическое притупление и ее коническую часть (рис. 3). Ниже приводятся формулы для расчета распределения давления по поверхности притупления и определения его коэффициента сопротивления.

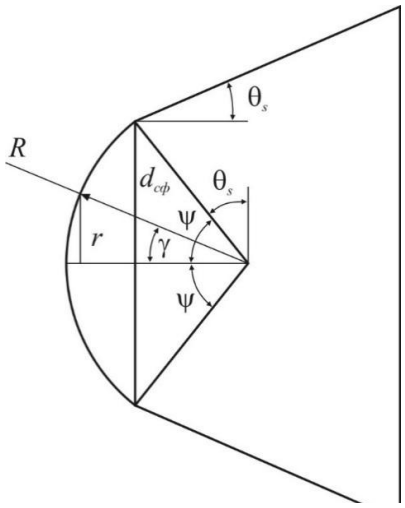


Рис. 3. Схема сферического притупления РН

Из экспериментальных данных известно [2], что распределение коэффициента давления в функции $\sin^2\gamma$ (γ – полярный угол) по поверхности изолированной сферы близко к линейному, а коэффициент давления $\bar{p}_0$ в лобовой точке близко к теоретическому значению коэффициента давления торможения. Для дозвуковых скоростей $\bar{p}_0$ рассчитывается по формуле изоэнтропического торможения:

$$\bar{p}_0 = \frac{2}{k\,M^2}\left[\left(1+\frac{k-1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}-1\right]. \qquad (6)$$

При сверхзвуковых скоростях ($M>1$) следует пользоваться формулой Релея для коэффициента давления торможения после прямого скачка:

$$\bar{p}_0 = \frac{2}{k\,M^2}\left[\left(\frac{k+1}{2}M^2\right)^{\frac{k}{k-1}}\left(\frac{k+1}{2\,k\,M^2-(k-1)}\right)^{\frac{1}{k-1}}-1\right]. \qquad (7)$$

При звуковой скорости (M =1) формулы (6) и (7) дают одинаковое значение:

$$\bar{p}_0\big|_{M=1} = \frac{2}{k}\left[\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}-1\right]. \qquad (8)$$

Поэтому распределение $\bar{p}$ по поверхности шара для дозвуковых, звуковых и сверхзвуковых скоростей можно представить в виде:

$$\bar{p} = \bar{p}_0\left(1-\frac{\sin^2\gamma}{\sin^2\theta^*}\right),$$

где θ^* – значение угла γ, при котором $\bar{p}$ =0.

Для расчета $\sin^2\theta^* = f(M)$ может быть использована следующая зависимость

$$\sin^2\theta^* = 0{,}645 + 0{,}226 \cdot arctg\ 2{,}38 \cdot (M - 0{,}9), \qquad (9)$$

дающая удовлетворительное совпадение с экспериментом (рис. 4).

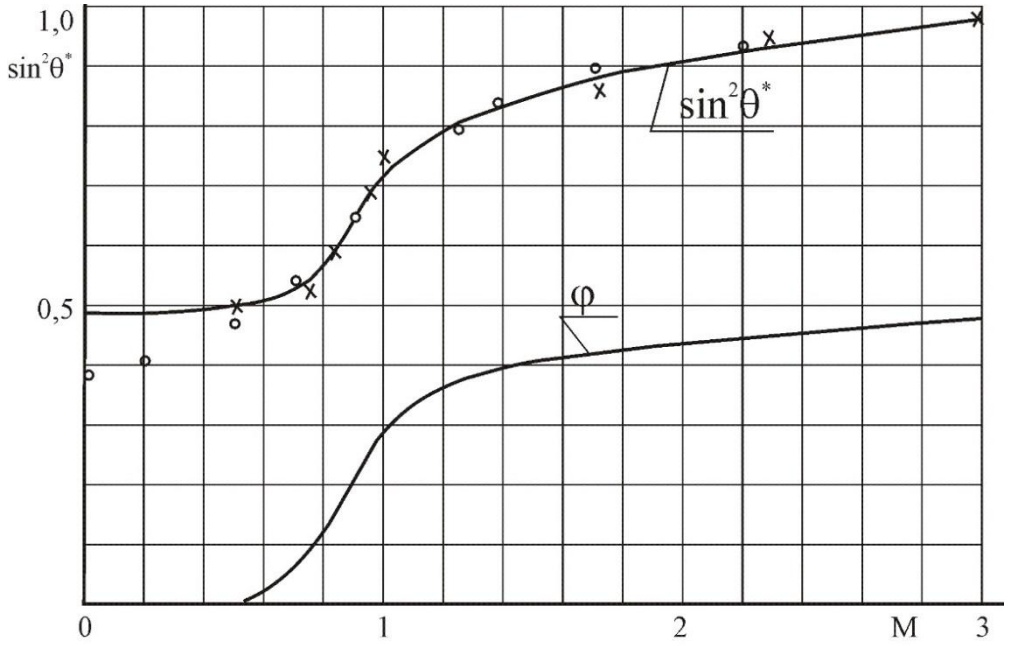


Рис. 4. Зависимости $\sin^2\theta^*$, φ от числа М:
× – экспериментальные данные [2];
○ – по формуле (9)

Если угол полураствора конуса θ_s, то при проведении интегрирования по углу γ от нуля до $\frac{\pi}{2} - \theta_s$ получим для сферического сегмента выражение:

$$\bar{c}_{x\ сф.} = \bar{p}_0 \cos^2\theta_s \left(1 - \frac{\cos^2\theta_s}{2\sin^2\theta^*}\right). \qquad (10)$$

Коэффициент сопротивления сферического притупления удобно представить в виде:

$$c_{x\ сф.} = \bar{c}_{x\ сф.} \frac{\pi R^2}{\frac{\pi d_{сф.}^2}{4}} = \bar{c}_{x\ сф.} \frac{1}{\cos^2\theta_s} = \varphi \cdot \bar{p}_0, \qquad (11)$$

причем $c_{x\ сф.}$ отнесен к площади $\frac{\pi\, d_{сф.}^2}{4}$, где $d_{сф.}$ – диаметр основания сферического сегмента, R – радиус сферы (рис. 3). Сравнивая формулы (10) и (11) с учетом (9), получим для коэффициента φ выражение:

$$\varphi = 1 - \frac{\cos^2\theta_s}{2\sin^2\theta^*} = 1 - \frac{0{,}5\cos^2\theta_s}{0{,}645 + 0{,}226 \cdot arctg\ 2{,}38 \cdot (M - 0{,}9)}.$$

Для $M \geq 3$ можно принять $c_{x\ сф.} = 0{,}5 \cdot \overline{p}_0$ (рис. 4).

Коэффициент сопротивления силы давления притупленного конуса $c_{xk\ прит}$

Для носовой части РН, выполненной в виде конуса со сферическим притуплением (рис. 3) для дозвуковых, звуковых и сверхзвуковых скоростей коэффициент $c_{xk\ прит}$ находится как сумма сферического сегмента и усеченного конуса:

$$c_{xk\ прит} = (1 - \overline{d}_{сф.}^2) \cdot c_{xk\ остр.} + \overline{d}_{сф.}^2 \cdot c_{x\ сф.}, \quad \overline{d}_{сф.} = \frac{d_{сф.}}{d}, \qquad (12)$$

где d – диаметр притупленного конуса, первое слагаемое правой части это коэффициент сопротивления усеченного конуса, второе – сферического сегмента, $c_{xk\ остр.}$ рассчитывается по формуле (2) для дозвуковых скоростей, по формуле (3) для трансзвуковых скоростей и по формуле (4) для сверхзвуковых скоростей, $c_{x\ сф.}$ – по формуле (11) для всего диапазона скоростей.

Коэффициент сопротивления донной осевой силы и силы трения

Коэффициент донной осевой силы при пространственном обтекании может быть задан как функция осредненного значения коэффициента $c_{хдон}$ от M в виде таблицы для конусов и цилиндров [3]:

Таблица 1

M	0	0,8	1,0	1,1	1,2	1,5	2,0	3	4	5	6	10	30
$c_{хдон}$	0,14	0,16	0,20	0,27	0,21	0,18	0,15	0,10	0,07	0,05	0,04	0,014	0,002

Режим обтекания тела зависит от числа Рейнольдса. В носовой части тела образуется ламинарный пограничный слой, затем следует некоторая область перехода ламинарного течения в турбулентное и, наконец, он ста-

новится полностью турбулентным. Поскольку большая часть тела обтекается турбулентным потоком и сопротивление трения турбулентного пограничного слоя больше, то в оценочных расчетах будем пользоваться формулой Прандтля-Шлихтинга для турбулентного пограничного слоя для эквивалентной плоской пластины:

$$c_f = \frac{0{,}455}{(\lg \mathrm{Re})^{2{,}584}}. \qquad (13)$$

В формуле (13) число Рейнольдса $\mathrm{Re} = \frac{M\ a\ L}{\nu}$, где M, a, ν – соответственно число Маха, скорость звука и коэффициент кинематической вязкости на высоте H, L – характерная длина корпуса РН.

Для расчета с полным проявлением шероховатости зависимость коэффициента сопротивления от относительной шероховатости k/l, где k есть средняя высота выступов, l – характерный линейный размер, может быть представлена посредством интерполяционной формулы [4]:

$$c_f = \left[1{,}89 + 1{,}62 \lg(l/k)\right]^{-2{,}5}.$$

Коэффициент сопротивления трения будет рассчитываться по формуле:

$$c_{xf} = c_f \cdot \bar{S}_{бок},$$

где $\bar{S}_{бок} = S_{бок}/S_{мид}$, $S_{бок}$– площадь боковой поверхности тела, $S_{мид}$ – площадь миделя тела.

Расчет коэффициентов c_y и c_z

Для блоков, состоящих из притупленных, усеченных конусов и цилиндров, расчеты коэффициентов c_{yi} и c_{zi} при малых углах атаки α и скольжения β проводятся по формулам:

$$c_{yi} = c_{yi}^{\alpha}\alpha, \quad c_{zi} = c_{zi}^{\beta}\beta.$$

Для тела вращения c_{yi}^{α} и c_{zi}^{β} рассчитываются по одинаковым формулам.

Экспериментальные данные для конусов со сферическим притуплением показывают, что значение производной коэффициента нормальной силы c_y^{α} в основном зависит от числа M и угла θ_s и очень слабо зависит от коэффициента притупления λ_i [2]. Для чисел $M < 1$ можно считать, что зависимость c_y^{α} от λ_i (для $\lambda_i \geq 0{,}5$) практически отсутствует; при $M > 1$ с уменьшением λ_i незначительно уменьшается c_y^{α}

Для расчета c_y^α острых конусов и близких к ним притупленных ($\lambda_i > 0{,}67$) во всем диапазоне чисел M и $7{,}5^\circ \le \theta_s \le 35^\circ$ может быть рекомендована следующая зависимость:

$$c_y^\alpha = A + B \cdot th\, \sqrt[3]{M - M^*},$$

где $A = 2{,}165 - 2\bar{\theta}_s$, $B = 0{,}100 + 0{,}32\bar{\theta}_s$, $M^* = 0{,}84 - 1{,}45\bar{\theta}_s$, $\bar{\theta}_s$ – в радианах, c_y^α имеет размерность 1/радиан. Расчет по этой формуле показывает хорошее совпадение с экспериментальными данными [2].

Можно также пользоваться для сверхзвуковых скоростей формулой, полученной в результате обработки данных З. Копала:

$$c_{yi}^\alpha = c_{zi}^\beta = \left[2 - 0{,}5 \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{\lambda_i} exp\left(-2 \frac{\sqrt{M^2 - 1}}{\lambda_i} \right) \right] \left(\frac{4\lambda_i^2}{1 + 4\lambda_i^2} \right).$$

Здесь λ_i – удлинение i-го элемента блока.

Расчет коэффициентов интерференции при последовательном соединении ступеней

Рассмотрим пример расчета c_x для тела вращения, составными частями которого являются (рис. 5):

– притупленный конус (R, θ_{s1}, $l_н$, $d_{сф}$, $\lambda_{k1} = l_н / L$, L – длина соответствующего острого конуса с углом полураствора θ_{s1});

– усеченный конус (θ_{s2}, l_{k2}, d, D);

– цилиндры ($l_{ц1}$, d, $l_{ц2}$, D, $\lambda_{ц1} = l_{ц1}/d$, $\lambda_{ц2} = l_{ц2}/D$).

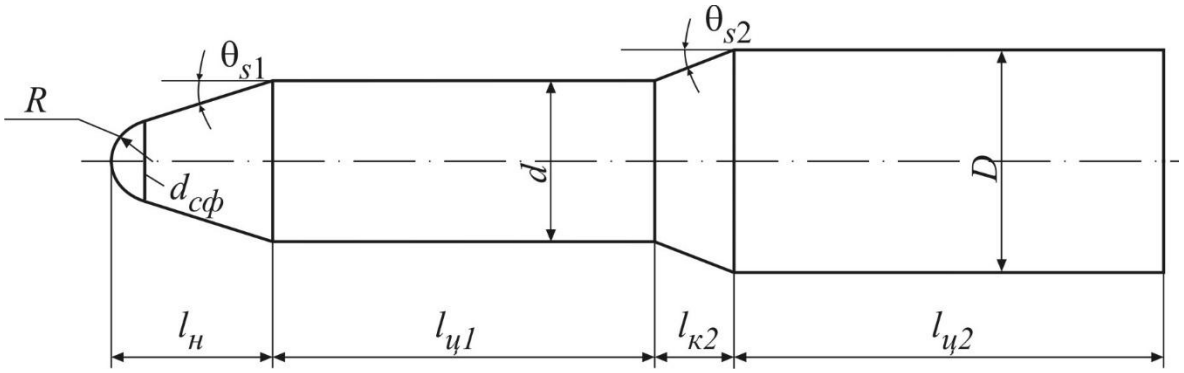


Рис. 5. Компоновка блока: $\theta_{s1} = 15^\circ$, $d_{сф} = 2R\cos\theta_{s1}$, $\lambda_{k1} = 0.8$, $\lambda_{ц1} = 2.4$, $\theta_{s2} = 20^\circ$, $\lambda_{ц2} = 1.9$, $d/D = 0.7$

Коэффициенты сопротивления c_x, нормальной c_y и боковой c_z силы тела вращения в этом случае можно представить в виде суммы коэффициентов соответствующих отдельных частей [2]:

$$c_x = A \cdot c_{x,k1+ц1} \cdot \frac{d^2}{D^2} + Б \cdot c_{x,k2} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + B \cdot c_{x,ц2},$$

$$c_y^{\alpha} = A \cdot c_{y,k1+ц1}^{\alpha} \cdot \frac{d^2}{D^2} + Б \cdot c_{y,k2}^{\alpha} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + B \cdot c_{y,ц2}^{\alpha},$$

$$c_z^{\beta} = A \cdot c_{z,k1+ц1}^{\beta} \cdot \frac{d^2}{D^2} + Б \cdot c_{z,k2}^{\beta} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) + B \cdot c_{z,ц2}^{\beta},$$

где $c_{x,k1+ц1}$, $c_{y,k1+ц1}^{\alpha}$, $c_{z,k1+ц1}^{\beta}$ – коэффициенты острого или притупленного по сегменту сферы конуса; $c_{x,k2}$, $c_{y,k2}^{\alpha}$, $c_{z,k2}^{\beta}$ – коэффициенты усеченного конуса; $c_{x,ц2}$, $c_{y,ц2}^{\alpha}$, $c_{z,ц2}^{\beta}$ – коэффициенты цилиндра, заканчивающегося плоским срезом.

В соответствии с экспериментальными данными [2] следует принять:

$A = B \approx 1{,}0$, $Б = 1{,}0$ при $0 < M < 1{,}5$ и $Б = \sqrt{1 - d^2/D^2}$ при $M \geq 1{,}5$.

Параллельное соединение ступеней (блоков)

Суммарный коэффициент сопротивления параллельно соединенных ступеней (блоков) находится как сумма коэффициентов отдельных ступеней:

$$c_x = k_{c_x} \sum_{i=1}^{n} c_{xi} \frac{S_i}{S_{мид}},$$

где $S_{мид}$ – это сумма площадей поперечных сечений всех n блоков:

$$S_{мид} = \sum_{i=1}^{n} S_i .$$

Коэффициент k_{c_x} характеризует интерференцию элементов комбинации для величины c_x. В работе [2] приведена экспериментальная зависимость k_{c_x} от числа ступеней (блоков), величина его изменяется при изменении n от 2 до 8 в пределах от 1,03 до 1,26.

В таблице 2 приведена зависимость коэффициента интерференции k_{c_x} от числа n ступеней (блоков) [2].

Таблица 2

n	1	2	3	4	5	6	8
k_{c_x}	1,0	1,03	1,03	1,04	1,1	1,2	1,26

При расчете параллельно расположенных блоков коэффициенты c_y^α и c_z^β такой компоновки находятся как сумма c_{yi} и c_{zi} отдельных блоков:

$$c_y^\alpha = k_{c_y} \sum_{i=1}^{n} c_{yi}^\alpha \left(\frac{S_{мi}}{S_{мид}} \right),\ c_z^\beta = k_{c_z} \sum_{i=1}^{n} c_{zi}^\beta \left(\frac{S_{мi}}{S_{мид}} \right).$$

Здесь $S_{мi}$ – площадь миделя i-го блока; $S_{мид}$ – площадь всех n блоков: $S_{мид} = \sum_{i=1}^{n} S_{мi}$; k_{c_y}, k_{c_z} – коэффициенты интерференции находятся согласно рекомендациям [3] как зависимости от числа Маха M.

В соответствии с [3] для схемы РН с боковыми блоками (их число n) на центральном корпусе при $n \geq 4$ приближенно можно положить:

$$k_{c_y} = k_{c_z} = 2 + 0{,}077(1 - M).$$

Для трехблочной схемы ($n = 3$) (при расположении блоков по оси OZ) приближенно примем:

$$k_{c_y} = (3 + 0{,}11(1 - M)),\ k_{c_z} \approx 1{,}0.$$

Для компоновки из двух блоков ($n = 2$) (при расположении блоков вдоль оси OZ) приближенно примем:

$$k_{c_y} = 1{,}6 + 0{,}1(1 - M),\ k_{c_z} \approx 1{,}0.$$

Для трехблочной схемы ($n = 3$) при расположении блоков равномерно по центральному углу, равному 120º, примем:

$$k_{c_y} = k_{c_z} = 2 + 0{,}077(1 - M).$$

Сравнение приближенных расчетов АДХ с результатами экспериментов

Проведены расчеты АДХ моноблочной компоновки по разработанным приближенным методикам и проведено сравнение с результатами экспериментов [3]. В таблице 3 проводится сравнение расчетов с экспериментом для компоновки, приведенной на рис. 1, в таблице 4 – для компоновки, приведенной на рис. 5.

Таблица 3

	M													
	0,8		1,0		1,25		1,75		2		3		4	
	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
c_x	0,27	0,23	0,42	0,37	0,53	0,56	0,54	0,53	0,52	0,50	0,50	0,47	0,49	0,45
c_y^α, 1/град	0,085		0,087		0,086		0,079		0,078		0,075		0,072	
c_z^β, 1/град	0,028		0,029		0,029		0,027		0,027		0,027		0,027	

Таблица 4

	M													
	0,8		1,0		1,25		1,75		2		3		4	
	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
c_x	0,19	0,14	0,31	0,30	0,42	0,40	0,30	0,32	0,28	0,29	0,25	0,24	0,23	0,21
c_y^α, c_z^β 1/град	0,029		0,029		0,029		0,02		0,02		0,02		0,02	

Библиографический список

1. Краснов, Н.Ф. Аэродинамика ракет / Н.Ф. Краснов, В.Н. Кошевой, А.Н. Данилов, В.Ф. Захарченко. – М.: Издательство «Высшая школа», 1968. – 772 с.

2. Петров, К.П. Аэродинамика тел простейшей формы / К.П. Петров. – М.: Издательство «Факториал», 1998. – 432 с.

3. Петров, К.П. Аэродинамика транспортных космических систем / К.П. Петров. – М.: Издательство «Эдиториал УРСС», 2000. – 368 с.

4. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М., 1974. – 711 с.

К содержанию

УДК 523.681-027.45:629.762.2:629.78

ВОЗМОЖНОСТИ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С ОПАСНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ «МАЛЫХ» РАЗМЕРОВ

С.С. Саитгараев, Г.Б. Позин

Проведен анализ астероидной опасности Земли в свете нынешних представлений после падения Челябинского метеорита, обоснована необходимость и возможность создания ближнего эшелона защиты Земли на базе существующих МБР и двухэшелонной системы космических оптических телескопов, размещаемых в точках Лагранжа Земли.

Ключевые слова: опасный космический объект, метеорит, точки Лагранжа, защита Земли.

В последние годы человечество начало всерьез задумываться над проблемами астероидно- кометной безопасности, пришло осознание того, что падение небесных тел на Землю может привести к глобальной катастрофе, что нужно научиться противодействовать этой опасности.

Ещё недавно, когда шла речь о борьбе с опасными космическими объектами, говорили, прежде всего, об угрозе столкновения с кометами или астероидами километрового класса, которые, несомненно, несут глобальную угрозу планете Земля. Вместе с тем, в просторах Космоса существуют многочисленные объекты меньших размеров, способных нанести не глобальный, но существенный ущерб нашей планете и ее обитателям. Самыми известными космическими объектами такого рода являются Тунгусский (1908 г.), Бразильский (1930 г.), и Сихотэ-Алинский (1947 г.) метеориты, падения которых только по счастливой случайности произошли вдали от густонаселенных районов Земли и не привели к катастрофическим последствиям. Последним ярким примером такого гостя из Космоса является метеорит, взорвавшийся 15 февраля 2013 года над городом Челябинском, который, несмотря на относительно малые размеры (18–20 м., около 10 000 т.), принес городу весьма существенный ущерб.

Это был первый в истории случай падения метеорита в густонаселенном промышленном регионе. Мощность взрыва этого «малого» космического объекта была эквивалентна 50 атомным бомбам, брошенным на Хиросиму. Окажись траектория полета этого метеорита менее пологой (летел под углом 20 градусов к поверхности Земли), взрыв мог произойти значительно ниже и ущерб был бы гораздо более существенным. Если бы «жертвой» такого объекта оказались атомные электростанции, склады оружия и подобные объекты, последствия могли бы оказаться катастрофическими. Такие относительно «мелкие» объекты вызывают озабоченность ещё и тем, что они гораздо чаще, чем крупные объекты, сталкиваются с Землёй.

Поэтому необходимо развивать методологию и создавать средства борьбы со всеми классами опасных космических объектов, как с крупными, так и с относительно небольшими.

Главной особенностью «малых» космических объектов является внезапность их появления: объекты с размером до 40–50 м. (порой и до 100 м) современными телескопами могут быть обнаружены с достаточной вероятностью на расстоянии около 1 млн км., то есть когда до его столкновения с Землёй остается несколько часов. Особенно опасны такие объекты при их появлении со стороны Солнца: в этом направлении оптические телескопы вовсе «не работают», а радиотелескопы не обладают достаточной дальностью действия.

Поэтому, для борьбы с «малыми» космическими объектами необходима особая методология, способная работать в условиях острого дефицита времени, как в части средств поражения, так и в части средств обнаружения и целеуказания.

Что касается средств поражения, необходимо отметить, что исследования, проведенные в Государственном ракетном центре имени В.П. Макеева [2, 3], показывают, что для борьбы с «малыми» ОКО крупные ракетно-космические комплексы с ракетами на низкокипящих компонентах топлива (жидкий азот, водород, керосин) непригодны вследствие большого (до нескольких суток) времени их подготовки к пуску. Для решения этих задач предлагается использовать комплексы малого класса с ракетами с высокой оперативностью, созданными на базе переоборудованных межконтинентальных баллистических ракет (МБР) на высококипящих компонентах топлива, которые могут находиться в состоянии готовности в течение длительного времени и в любой момент могут взлететь навстречу опасному объекту после 10–15 минут подготовки.

Создание таких ракет вполне реально, например, на базе существующих ракет-носителей «Днепр», которые при сравнительно небольшой доработке будут способны доставить средства воздействия (механические импакторы либо взрывчатые вещества вплоть до ядерных зарядов) на космический объект, находящийся на расстоянии до 1,5…2,0 млн км.

По оценкам, проведенным в ГРЦ Макеева, для предстартовой подготовки ракеты-носителя с перехватчиком и доставки к опасному объекту средства его уничтожения на безопасном для Земли расстоянии, достаточно 2, 5…4,5 часов.

С учетом времени, необходимого на пролонгацию и уточнение траектории движения ОКО системой точного слежения, времени на принятие руководством страны решения о пуске к ОКО ракеты и возможном применении ядерного заряда, минимально необходимое время от обнаружения до предполагаемого падения ОКО составляет 5...7 часов.

Таким образом, основной проблемой на сегодня становится задача оперативного обнаружения опасного космического объекта «малого» класса, минимум, за 5–7 часов до его столкновения с Землёй с любого направления, в том числе со стороны Солнца. А это для тела, летящего со скоростью от 40 до 60 км/с, равносильно расстоянию около 1,0 … 1, 5 млн км.

Такая задача не решаема существующими системами наблюдения, так как, во-первых, современные оптические телескопы не способны обнаруживать объекты менее 50 м. на расстоянии 1 млн. км. и более, во-вторых, для гарантированного обнаружения опасных объектов и слежения за ними с любого направления потребуется сканировать всю небесную сферу. А это около 42 тысяч квадратных градусов [1]. Даже при развертывании разветвленной глобальной сети оптических и радиотелескопов решение этой задачи потребует от нескольких дней до месяцев, что недопустимо для ближнего эшелона защиты Земли.

Облегчает задачу обнаружения то обстоятельство, что в нашем случае нет необходимости сканировать все околосолнечное пространство, достаточно контролировать только пространство на расстоянии 2...3 млн км от Земли.

В силу этих обстоятельств, для ближнего эшелона представляется целесообразным создание отдельной, упрощенной, системы раннего оперативного обнаружения космического базирования.

Чтобы не заниматься сканированием всей небесной сферы есть смысл разместить телескопы на большом расстоянии от Земли, таким образом, чтобы они были направлены в сторону Земли и все контролируемое вокруг Земли пространство входило в поле их зрения, которое составляет около 2,5 ... 3 градуса.

Создать такую систему оперативного обнаружения опасных космических объектов можно, поместив стереосистему из двух космических оптических телескопов в точках Лагранжа L_4 и L_5 орбиты Земли, которые расположены на орбите Земли на 60° впереди и позади неё. Расстояние от Земли до каждой из этих точек равно 150 млн км.

Специалистами Пулковской обсерватории /1/ для такой системы рассматривались телескопы с апертурой 1 м и было показано, что они смогут оперативно обнаружить любой космический объект 20…60-метрового класса, попавший в эту сферу. Есть принципиальные возможности для снижения минимальных размеров обнаруживаемого объекта до 10...20 метров, если применить более мощные специализированные телескопы класса «Хаббл» с апертурой 2 м.

Недостатком этой системы является сравнительно низкая точность обнаружения, она оценивается в 100...200 км. Такой точности недостаточно для наведения на объект перехватчика со средствами поражения. Поэтому, данную систему оперативного (первичного) обнаружения целесообразно

дополнить системой слежения с более высокой точностью, расположенной вблизи от Земли. Эта система слежения на основе информации о космическом объекте, получаемой от системы первичного обнаружения, осуществляет боде точную идентификацию объекта и более точное определение его траекторных, массогабаритных и прочих параметров.

Один из вариантов системы точного слежения представляет собой еще одну стереосистему из двух космических оптических телескопов. Только размещаться они будут в точках Лагранжа L_1 и L_2 орбиты Земли на расстояниях примерно в 1.5 млн км от Земли, то есть в 100 раз ближе к Земле, чем точки L_4 и L_5. Причём точка L_1 находится в сторону Солнца, точка L_2 – в противоположную сторону. Система точного слежения должна работать по целеуказанию от системы оперативного обнаружения. Но, точность пролонгации траектории возрастет на два порядка – до 1...2 км. Такой точности уже достаточно для наведения перехватчика с целью доставки на опасный объект средств его поражения, чтобы спасти нашу планету и её жителей от непрошенных космических «гостей».

Современные технологические возможности позволяют создать космические аппараты с телескопами, имеющими требуемые параметры. Выведение космических аппаратов в точки либрации L_1 и L_2 является уже освоенной процедурой. Задача выведения в точки либрации L_4 и L_5 также может быть решена современными ракетами-носителями. По энергетике и уровню сложности она примерно соответствует запуску межпланетных аппаратов на орбиту Марса или Венеры.

Таким образом, задача создания системы защиты от опасных космических объектов «малого» класса решаема как в части создания средств поражения, так и в части средств обнаружения этих объектов.

Следует отметить, что такой системе также должны быть по силам более крупные метеориты с размерами до 100…150 метров, например, за счет воздействия на объект несколькими устройствами, доставляемыми разными ракетами-носителями.

В некоторых особых случаях эту систему можно будет использовать для доставки исследовательской аппаратуры типа «Каисса» на Апофис (с размерами около 340 метров, который 13 апреля 2029 года пройдет примерно в 35…39 тыс км от Земли,) для проведения эксперимента по определению состава и структуры опасного космического объекта, и установки на него передающей аппаратуры с целью уточнения его траектории, либо с целью воздействия на «Апофис» для его увода с опасной траектории, так как для этого потребуется сравнительно малое воздействие в течение продолжительного времени.

Библиографический список

1. Шустов, Б.М. Астероидно-кометная опасность: новые подходы / Б.М. Шустов, Л.В. Рыхлова // Вестник российской академии наук. – 2009. – Т. 79. – № 7. – С. 579–586.

2. Дегтярь, В.Г. Возможности ракетно-космических комплексов для уменьшения астероидно-кометной опасности / В.Г. Дегтярь, С.Т. Калашников, С.С. Саитгараев // Труды международной научно-практической конференции «Астероиды и кометы. Челябинские события и изучение падения метеорита в озеро Чебаркуль», г. Чебаркуль, Челябинской области, 21–22 июня 2013 г.

3. Васильева, Ю.Б. Ближний эшелон защиты Земли от опасных космических объектов как первый этап развития системы / Ю.Б. Васильева, С.С. Саитгараев // Труды четвертой научно-технической конференции ФГУП «КБ «Арсенал»; Балтийский гос. техн. ун-т. – СПб., 2013. – С. 106–109.

4. Чубей, М.С. Орбитальная стереоскопическая обсерватория / М.С. Чубей // Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, IV Международный специализированный Симпозиум «Космос и глобальная безопасность человечества», г. Евпатория, 2012 г.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. НИЖНЕВАРТОВСК

УДК 004.055 + 004.738.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ В ПОВСЕДНЕВНОЙ ЖИЗНИ

Н.Р. Жарова

В статье проводится анализ концепции интернета вещей Internet of Things, IoT) с начала ее зарождения, рассматриваются проблемы и перспективы дальнейшего развития.

Ключевые слова: Интернет вещей, IoT, частотная идентификация RFID, Cisco, Web-технологии.

Основной целью нашего исследования является история возникновения и дальнейшего развития концепции интернета вещей (англ. Internet of Things, IoT) в различных странах, выявления позиции ученых и наше отношение к этой концепции.

По определению Кевина Эштона, концепция Интернет вещей – это вычислительные сети физических объектов («вещей»), оснащённых встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. Кэвин Эштон рассматривает IoT как «организацию таких сетей как явление, способное перестроить экономические и общественные процессы, исключающее из части действий и операций необходимость участия человека» [1].

Интернет вещей, как и многие другие научные концепции, зародился в Массачусетском технологическом институте (1999 г.). Там же был создан Центр автоматической идентификации (Auto-ID Center), занимавшийся радиочастотной идентификацией (RFID) и новыми сенсорными технологиями. Центр координировал работу семи университетов, расположенных на четырех континентах. Именно здесь была разработана архитектура Интернета вещей. По мнению консалтингового подразделения Cisco IBSG (Internet Business Solutions Group), Интернет вещей – всего лишь момент времени, когда количество «вещей» или материальных объектов, подключенных к Интернету, превысило число людей, пользующихся «всемирной паутиной» [2].

В соответствии с исследованиями главного футуролога компании Cisco Дэйва Эванса (Dave Evans) в 2003 году на нашей планете проживало около 6,3 млрд человек, а к Интернету было подключено 500 млн устройств, т.е. что на каждого человека тогда приходилось по 0,08 такого устройства [3]. Поэтому, в соответствии с определением Cisco IBSG, в 2003 году Интернета вещей еще не было. Смартфоны в то время только появились на рынке. Напомним, что главный исполнительный директор компании Apple Стив Джобс анонсировал iPhone лишь четыре года спустя – 9 января 2007 года.

В 2010 году в результате стремительного распространения смартфонов и планшетных компьютеров количество подключенных устройств выросло до 12,5 млрд, тогда как население Земли составило 6,8 млрд человек. Таким образом, впервые в истории на каждого человека стало приходиться более одного подключенного устройства (1,84 устройства на душу населения). Исследователи Cisco IBSG сделали заключение о том, что Интернет вещей «появился на свет» в промежутке между 2008 и 2009 годами (рисунок 1). Заглядывая в будущее, Cisco IBSG прогнозирует, что к 2015 году к Интернету будет подключено 25 миллиардов, а к 2020 году – 50 миллиардов устройств. По мнению Питера Хартуэлла (Peter Hartwell), старшего исследователя из лабораторий HP, это вызовет в нашей жизни глубокие изменения под стать революционным преобразованиям в области коммуникаций, которые произошли на предыдущем этапе развития Интернета (рис. 1).

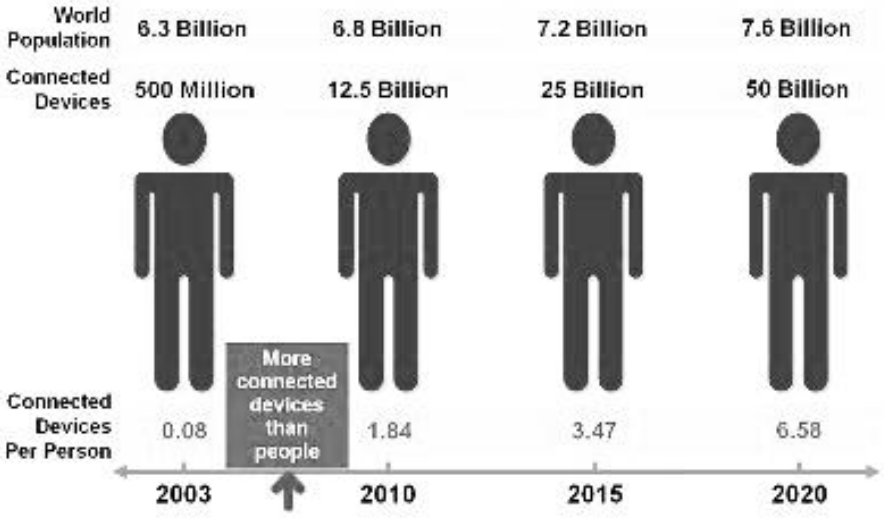


Рис. 1. Прогноз развития Интернета вещей до 2020 года

Сегодня Интернет вещей состоит из слабо связанных между собою разрозненных сетей, каждая из которых была развернута для решения своих специфических задач. К примеру, в современных автомобилях работают сразу несколько сетей: одна управляет работой двигателя, другая – системами безопасности, третья поддерживает связь и т.д. В офисных и жилых зданиях также устанавливается множество сетей для управления отоплением, вентиляцией, кондиционированием, телефонной связью, безопасностью, освещением. По мере развития Интернета вещей эти и многие другие сети будут подключаться друг к другу и приобретать все более широкие возможности в сфере безопасности, аналитики и управления (рис. 2). В результате Интернет вещей приобретет еще больше возможностей открыть человечеству новые, более широкие перспективы.

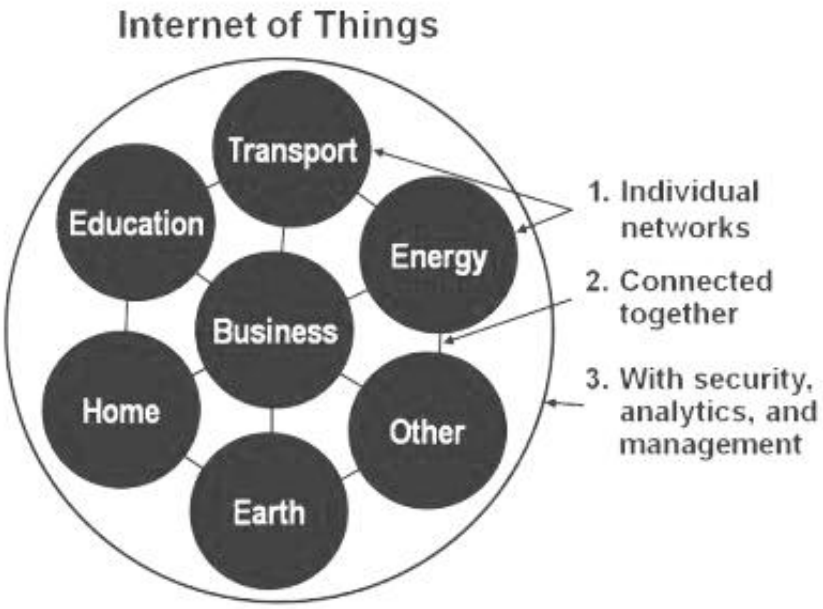


Рис. 2. Интернет вещей как интеграция бизнеса,
социальных и информационных проектов

Понять значение Интернета вещей можно, увидев разницу между Интернетом и «всемирной паутиной» (World Wide Web, или просто Web). Эти термины часто используются как абсолютные синонимы, хотя Интернет – это, прежде всего, физический уровень сетей: коммутаторы, маршрутизаторы и прочее оборудование. Главная функция Интернета состоит в быстрой, надежной и безопасной передаче информации из одной точки в другую. Web же – это уровень приложений, работающий поверх Интернета. Его задача – создать интерфейс для получения реальной пользы от передаваемой через Интернет информации.

В своем развитии Web прошел через несколько четко различимых этапов: этап исследований, этап «брошюрный» (каждая компания заявляла о своих продуктах и услугах), этап транзакционный (продажа услуг и товаров), этап социальный (этап пользовательского опыта). На этом этапе мы находимся и сегодня. Это появление Facebook, Twitter и Groupon. Эти компании позволяют людям связываться друг с другом, подключаться к сети и обмениваться личной информацией: текстами, фотографиями, видео с друзьями, родственниками и коллегами.

В отличие от Web-технологий, Интернет развивался, прежде всего, в количественном отношении, почти не меняясь качественно. На данном этапе мы наблюдаем эволюцию Интернета: Интернет вещей на уровне физического Интернета. Это качественный скачок Интернета.

Интернет в новом эволюционном развитии проявляется в виде датчиков температуры, давления, вибрации, освещения, влажности и физических нагрузок. Интернет проникает в ранее недоступные сферы: медицина, генетика, биология, космос.

С появлением Интернет вещей мир информационной безопасности стал намного сложнее. Тем не менее, эволюция продолжается.

Среди первых крупных компаний и корпораций, осуществивших проекты по внедрению RFID, являются Wal-Mart, Tesco, Metro. Применение RFID в ритейле только начинается, но уже сейчас ведущие розничные компании признают ее преимущества. К примеру, американская компания Wal-Mart, впервые внедрившая эту технологию, прогнозирует ежегодную экономию 8 миллиардов долларов – а это больше, чем совокупный оборот половины компаний из списка Fortune 500, вместе взятых. METRO GROUP с 2004 года использует RFID в логистике и управлении складом в сетях Metro Cash&Carry, real,- и Galeria Kaufhof в Германии, а с 2007 года тестирует технологию на уровне торговых залов [7].

По словам Сергея Дудника, генерального директора компании «РСТ-Инвент» департамента RFID в Росии, наиболее ощутимую пользу для предприятий розничной торговли RFID-технология приносит в том случае, если используется по всей цепочке поставок, а именно: производство, упаковка, склад производителя, транспорт, распределительный центр, склад продавца, прилавок в магазине. Внедрение такой системы возможно только в том случае, если все участники цепочки, осознав преимущества прослеживания товаров по всему пути следования, разделят между собой соответствующие издержки [5].

Владислав Тропко, инвестиционный менеджер ОАО «РОСНАНО», выдел основным ключевым вопросом для России – безопасность, которая расставляет приоритеты в программе по широкому внедрению RFID-технологии.

Программа включает:

- ✓ сектор общественного транспорта;
- ✓ проект RFID для библиотек – книги, CD и DVD;
- ✓ использование RFID в торговле;
- ✓ проект глобальной системы почтового мониторинга на базе RFID;
- ✓ мониторинг сухопутных и морских перевозок грузов.

РОСНАНО совместно с компанией «Систематика» инвестирует в создание отечественного производителя меток радиочастотной идентификации (RFID-меток) – Plastic Logic. В рамках проекта к 2015 г. будет произведено 150 млн RFID-меток для продажи в России. Для реализации проекта в России имеется разнообразная база фундаментальных исследований, обеспеченных сильной поддержкой со стороны государства. Российская академия наук (РАН) является ведущей научной организацией в стране, она объединяет 466 научно-исследовательских институтов, в которых трудятся 55 тыс. научных работников, а также необходимое экономическое обеспечение. В настоящее время Россия является десятой экономикой в мире по ВВП и шестой – по паритету покупательной способности.

Человечество развивается благодаря коммуникациям. Принцип передачи информации и ее использования для новых открытий лучше понять, если знать, что обычно делают люди с полученными данными.

Сами по себе исходные данные могут быть совершенно бесполезны, однако большой объем накопленных данных помогает выявить закономерности и тенденции развития. Информация складывается в знания. Мудрость – это знания плюс опыт.

Знания со временем меняются, мудрость же остается неизменной (рис. 3). Нет большего приоритета и внимания, чем в Китае, где премьер Вэнь Цзябао назвал IoT приоритетом экономического развития в нескольких своих выступлениях и однажды предложил формулу Интернет + Интернет вещей = Мудрость земли [4]. Возможности Интернета вещей в области генерирования, сбора, передачи, анализа и распределения данных в мировом масштабе позволят человечеству в конечном итоге получить знания и мудрость, которые необходимы не только лишь для выживания, но и для настоящего процветания на протяжении многих месяцев, лет, десятилетий.

Рис. 3. Развитие Интернета вещей как источника
накопления человеческой мудрости

Таким образом, с нашей точки зрения, Интернет вещей приобретает не только технологическое, эволюционное толкование, но и имеет глубокий философский смысл. Мы полностью поддерживаем точку зрения Роб ван Краненбурга, основателя Европейского совета по «Интернету вещей» (Internet of Things, IoT) и всемирно признанного эксперта HLEG (High Level Expert Group). В своем выступлении в Московском национольном научно-исследовательском ядерном университете (МИФИ) в феврале 2014 года он отметил важные в человеческом понимании аспекты. Роб ван Краненбурга выделил основной принцип ускорения эволюции IoT – открытость, отсутствие территориальных границ на уровне контента и приложений, т.е. построение приложений с открытым исходным кодом. Интернет

вещей должен иметь несколько конкурирующих мировоззрений, находящихся в диалоге друг с другом, мире и согласии о правильным представлении, что такое «работа», «честь», «уважение». Успешный IoT – это лучшие разработки, успешное сотрудничество различных корпораций, основанное на разумном распределении человеческих и природных ресурсов, создающих прочную основу для внедрения новейших нано и биотехнологий на благо всего человечества.

Библиографический список

1.Kevin Ashton, That"s internet of things" thing, [Электронный ресурс]. – URL: http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986/.

2.Интернет вещей Российский исследовательский и консалтинговый центр [Электронный ресурс]. – URL: http://internetofthings.ru/sobytiya/70-otkrytaya-lektsiya-roba/.

3. Dave Evans, Интернет вещей: как изменится вся наша жизнь на очередном этапе развития Сети [Электронный ресурс]. – URL: http://www.cisco.com/web/RU/news/releases/txt/2011/062711d.html/.

4. W. David Stephenson, Stephenson Strategies, Интернет вещей: игнорируемый кандидатами, но не Китаем [Электронный ресурс]. – URL: http://www.internetofthings.ru/gosudarstvo/20-internet-veshchej-ignoriruemyj-kandidatami-no-ne-kitaem.

5. Волчанинов, Л. CNEWS аналитика [Электронный ресурс] / Л. Волчанинов. – URL: http://www.cnews.ru/reviews/free/trade2008/articles/RFID.shtml.

6. Дудников, С. Работаем с технологией RFID [Электронный ресурс] / С. Дудников // Сайт о нанотехнологиях № 1 в России. – URL: http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/sergei-dudnikov-rabotaem-s-tekhnologiei-rfid.

7. Media Markt продвигает технологию RFID в России [Электронный ресурс]. – URL: http://market.mediamarkt.ru/blog/2012/04/04/media-markt-prodvigaet-tehnologiyu-rfid-v-rossii/.

К содержанию

УДК 378.147.88

ИНФОРМАЦИОННОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ПРАКТИК

Е.А. Зверева

Производится определение оптимальной информационной обеспеченности студента для повышения эффективности проведение практики. Представлены выявленные требования к информационному сопровождения практик, содержимому рабочей программы и пример выполнения индивидуального задания на практику.

Ключевые слова: практика; информационное сопровождение, рабочая программа, техническое задание.

Многолетний опыт выпускающей кафедры «Информатика» в филиале Южно-Уральского университета в г. Нижневартовске, показал, что практическая подготовка специалистов в условиях реального производства была и остается одной из самых актуальных.

Проблема определила цель исследования – определить оптимальные содержание и методику руководства практикой студентов технических направлений на выпускающей кафедре.

Объект исследования – практика студентов.

Предмет исследования – подготовка специалистов инженерных специальностей.

Гипотеза исследования – определение оптимальной организационной и информационной обеспеченности студента будет способствовать повышению эффективности производственной практики, если: выявлены принципы организации производственной практики, раскрывающие её особенности.

Для достижения цели исследования и проверки выдвинутой гипотезы были поставлены следующие задачи исследования:

1. Определить значимость методического обеспечения практики.
2. Определить этапы практики будущего специалиста.
3. Разработать информационное сопровождение, способствующее качественному проведению практики.

4 Повести анализ удовлетворенности организацией практики.

Подробнее остановимся на решении одной из задач – разработки информационного сопровождения практик.

Для организации любого вида практик (учебной, производственной, преддипломной) необходимо наличие информационного сопровождения.

В ходе исследований выявлены требования к информационном обеспечению практик: необходимость технической поддержки информационного обеспечения студенческих практик; доступность информационного обес-

печения в процессе прохождения практики студентами; техническая и технологическая подготовленность студента к взаимодействию с информационным обеспечением; опыт взаимодействия студента с информационным обеспечением; целесообразное взаимодействие студента с информационным обеспечением практики, с учетом реальных потребностей клиента и учебных задач практики; оперативность получения информационного обеспечения для выполнения студентами-практикантами профессиональных задач и учебных заданий практики.

Основным документом, регулирующим проведение того, или иного вида практики является рабочая программа.

Требования к содержанию отдельных компонентов РПП зависят от вида и назначения практики и отражают содержание подготовки по специальности/направлению.

РПП должна быть разработана в соответствии с требованиями, установленными ФГОС по соответствующему направлению подготовки:

– определять цель прохождения практики и обеспечивать необходимую связь ее с соответствующими дисциплинами профилей, специальностей (специализации);

– соответствовать целям и задачам, определенным для каждого вида практики;

– формировать определенные общекультурные и профессиональные компетенции обучающегося;

– учитывать при проведении практики основные перспективные направления развития изучаемой науки, техники и технологии;

– включать образовательные, научно-исследовательские и научно-производственные технологии, используемые на практике;

– определять объем и содержание учебной нагрузки практики, отражающие требования по организации, проведению и отчетности по практике, в том числе самостоятельной работы студентов (СРС), форму промежуточной аттестации (зачет, зачет с оценкой) в соответствии с рабочим учебным планом [1].

Последние требование реализуется в соответствии с применением поэтапной технологии проведения и организации практики (рис.).

Ключевым этапом прохождения практики студентов является выполнение индивидуального задания. Для его качественного выполнения руководитель практики от вуза разрабатывает методические указания, являющиеся частью информационного сопровождения практики.

№ п/п	Разделы (этапы) практики	Виды учебной работы, на практике включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)	Формы текущего контроля
1	Подготовительный этап	Участие в установочной конференции по практике, получение задания на практику	Получение необходимой документации
		Изучение структуры предприятия, знакомство с ее внутренним распорядком	Дневник практики
		Инструктаж по технике безопасности на рабочем месте	Дневник практики
2	Основной этап	Сбор и обработка информации	Дневник практики
		Работа с технической литературой	
		Выполнение заданий (в том числе **индивидуального задания**) руководителей практики от Вуза и предприятия	
3	Заключительный этап	Подготовка отчета по результатам прохождения практики	Сдача отчета
		Участие в итоговой конференции практике	Защита отчета

Объем и содержание учебной нагрузки практики

В качестве примера рассмотрим методические указания на выполнение одного из возможных видов индивидуального задания учебной практики студентов 2 курса направления «Информатика и вычислительная техника» – разработку технического задания. Базой для выполнения данного индивидуального задания является предприятие, за которым закреплен студент на практику, и задачи на разработку ПО выявленные в ходе прохождения практики.

Техническое задание представляет собой документ, в котором сформулированы основные цели разработки, требования к программному продукту, определены сроки и этапы разработки и регламентирован процесс приемно-сдаточных испытаний.

Разработка технического задания регламентировано ГОСТ 19.201-78. Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению [2] и должно содержать следующие разделы:

1. Введение.
2. Наименование и область применения.
3. Основание для разработки.
4. Назначение разработки.
5. Технические требования к программе или программному изделию.
6. Технико-экономические показатели.
7. Стадии и этапы разработки.
8. Порядок контроля и приёмки.
9. Приложения.

В зависимости от особенностей программы или программного изделия допускается уточнять содержание разделов, вводить новые разделы или объединять отдельные из них. При необходимости допускается в техническое задание включать приложения.

В случаях, если какие-либо требования, предусмотренные техническим заданием, заказчик не предъявляет, следует в соответствующем месте указать «Требования не предъявляются».

Пример технического задания

1. Введение

Работа выполняется в рамках проекта «Автоматизированная система оперативного контроля параметров и управления агрегатами пожаротушения ОАО “Югрампонтажавтоматика”».

2. Основание для разработки

2.1. Основанием для данной работы служит договор № 1064 от 5 ноября 2013 г.

2.2. Наименование работы

«Модуль пожаротушения ОАО “Югрампонтажавтоматика”».

2.3. Исполнители: ОАО «Практика+».

2.4. Соисполнители: нет.

3. Назначение разработки

Создание модуля для контроля и параметров и управления агрегатами пожаротушения ОАО «Югрампонтажавтоматика».

4. Технические требования

4.1. Требования к функциональным характеристикам

4.1.1. Состав выполняемых функций

Разрабатываемое ПО должно обеспечивать:

- измерение и отображение в цифровой форме технологических параметров в виде отдельных величин или в виде взаимосвязанных величин по вызову оператора;
- формирование трендов по основным технологическим параметрам;
- вывод основных технологических параметров и состояния оборудования на мнемосхемы;
- автоматическое управление технологическими агрегатами (насосами, задвижками), согласно с заданными алгоритмами управляющих контроллеров;
- обнаружение, оперативное отображение, регистрация, сигнализация отклонений технологических параметров и показателей состояния оборудования за установленные пределы;
- обнаружение и регистрация аварийных и предаварийных ситуаций, пожара.

4.1.2. Организация входных и выходных данных

Исходные данные в систему поступают в виде значений с датчиков, установленных в помещениях. Эти значения отображаются на компьютере диспетчера. После анализа поступившей информации оператор диспетчерского пункта устанавливает необходимые параметры для устройств, регули-

рующих отопление и вентиляцию в помещениях. Возможна также автоматическая установка некоторых параметров для устройств регулирования.

Основной режим использования системы – ежедневная работа.

4.2. Требования к надежности

Для обеспечения надежности необходимо проверять корректность получаемых данных с датчиков.

4.3. Условия эксплуатации и требования к составу и параметрам технических средств

Для работы системы должен быть выделен ответственный диспетчер.

Требования к составу и параметрам технических средств уточняются на этапе эскизного проектирования системы.

4.4. Требования к информационной и программной совместимости

Программа должна работать на платформах Windows 7.

4.5. Требования к транспортировке и хранению

Программа поставляется на флеш-носителе информации. Программная документация поставляется в электронном и печатном виде.

4.6. Специальные требования:

- дружественный интерфейс программного обеспечения;
- интеграция отдельно разработанных модулей системы;
- программно-инструментальные средства разработки по выбору.

5. Требования к программной документации

Основными документами, регламентирующими разработку будущих программ, должны быть документы Единой Системы Программной Документации (ЕСПД): руководство пользователя, руководство администратора, описание применения.

6. Технико-экономические показатели

Эффективность системы определяется удобством использования системы для контроля и управления основными параметрами пожаротушения помещений предприятия, а также экономически окупаемой.

7. Порядок контроля и приемки

После передачи Исполнителем отдельного функционального модуля программы Заказчику последний имеет право тестировать модуль в течение 2 недель. После тестирования Заказчик должен принять работу по данному этапу в соответствии с актом сдачи-приемки либо оформить отказ с указанием причины в письменном виде. В случае обоснованного отказа Исполнитель обязуется доработать модуль.

8. Календарный план работ

Приведенный пример выполнения индивидуального задания позволит студентам выстроить траекторию работы относительно выполнения подобного индивидуального задания во время практики и позволит достичь поставленных задач практики.

Таблица

№	Название этапа	Сроки этапа	Чем заканчивается этап
1	Создание технического проекта системы.	ДД.ММ.ГГ-ДД.ММ.ГГ	Технический проект
2	Создание рабочего проекта ПО. Реализация. Пробное внедрение.	ДД.ММ.ГГ-ДД.ММ.ГГ	Рабочий проект. Программная документация. Акт сдачи-приемки
3	Тестирование, отладка и внедрение.	ДД.ММ.ГГ-ДД.ММ.ГГ	Готовая АСУ пожаротушения, установленная в диспетчерском пункте. Программная документация. Акт сдачи-приемки работ

В заключении хотелось бы отметить, что в ходе экспериментального исследования, проводимого на базе выпускающей кафедры «Информатика» филиала Южно-Уральского университета в г.Нижневартовске, была проведена диагностика готовности студентов к практики и их взаимодействие с информационным обеспечением, выявлены принципы организации производственной практики, определена оптимальность информационной обеспеченности студента как средства повышения эффективности производственной практики разработаны УМК практик, включающие программы практик, рекомендации методического характера.

Библиографический список

1. Программа учебной практики студентов направления 230100 «Информатика и вычслительная техника» / сост. Е.А. Зверева. – Нижневартовск: ф-л ЮУрГУ, 2013. – 13 с.

2. ГОСТ 19.201-78. Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению.

3. Молодцов, М.В. Управление практиками и трудоустройством студентов на кафедре / М.В. Молодцов. – URL: http://connect.susu.ac.ru/p83561425/.

4. Стандарт университета. Практика и трудоустройство студентов. СМК СТУ 2.0-2006. – Челябинск: Издательский цент ЮУрГУ, 2006.

К содержанию

УДК 004.62 + 004.31

ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

А.Н. Леоненко

Производится анализ основных Business Intelligence продуктов. На примере применения аналитической платформы Deductor Studio описываются способы автоматизации информационно-аналитической деятельности по обработке данных. Особое внимание уделяется визуализации средствами OLAP и формированию вычисляемых полей.

Ключевые слова: технологии информационно-аналитической деятельности; визуализация; консолидация; Business Intelligence; аналитическая платформа; OLAP-куб; Deductor Studio.

Ни для кого не секрет, что настоящее время характеризуется стремительным ростом объемов информации, накапливаемый на машинных носителях, и потребностей специалистов всех сфер по анализу этих данных.

Ответом этому в сфере аналитики стало появление новых парадигм анализа, а именно: хранилищ данных, машинного обучения, Data Mining (интеллектуальный анализ данных), Knowlegde Discovery in Databases (KDD – поиск знаний в базах данных), а также рождение целого сегмента рынка программного обеспечения – Business Intelligence (BI). Это позволило популяризировать анализ данных, вывести его на промышленную основу и решить огромное число бизнес-задач с большим экономическим эффектом. Также наметилась интеграция программных решений и переход от специализированных аналитических решений к многоцелевым BI-платформам. Рассмотрим некоторые программные решения, позволяющие автоматизировать информационно-аналитическую деятельность.

Венцом развития анализа данных стали специализированные программные системы – аналитические платформы, которые полностью автоматизировали все этапы анализа от консолидации данных до эксплуатации моделей и интерпретации результатов. На рынке указанные средства представлены крупными зарубежными поставщиками: BusinessObjects (www.businessobjects.com), Cognos (www.cognos.com), MicroStrategy (www.microstrategy.com), Oracle (www.oracle.com), SAS (www.sas.com), Microsoft (www.microsoft.com), а также российскими разработчиками – фирмы BaseGroup Labs (www.basegroup.ru) с пакетом Deductor и Intersoft Lab (www.iso.ru) с платформой хранилищ данных и аналитической платформой «Контур».

Обратимся к особенностям работы в аналитической платформе Deductor компании BaseGroup.

Deductor – это аналитическая платформа, основа для создания законченных прикладных решений в области анализа данных [2].Она состоит из пяти частей:

1. Warehouse – хранилище данных, консолидирующее информацию из разных источников.

2. Studio – приложение, позволяющее пройти все этапы построения прикладного решения, рабочее место аналитика.

3. Viewer – рабочее место конечного пользователя, одно из средств тиражирования знаний (т.е. когда построенные аналитиком модели используют пользователи, не владеющие технологиями анализа данных).

4. Server – служба, обеспечивающая удаленную аналитическую обработку данных.

5. Client – клиент доступа к Deductor Server. Обеспечивает доступ к серверу из сторонних приложений и управление его работой.

Существует три типа варианта поставки платформы Deductor:

1) Enterprise;

2) Professional;

3) Academic.

Мы будем использовать версию *Academic*, которая предназначена для образовательных и обучающих целей.

После запуска главное окно Deductor Studio выглядит следующим образом (рис. 1).

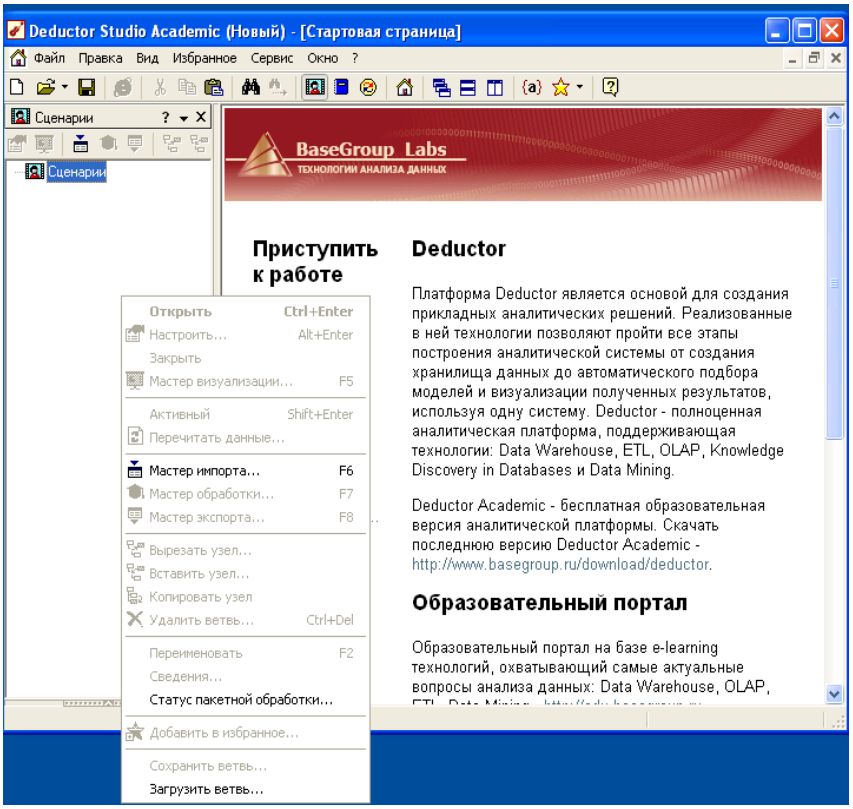


Рис. 1. Общий вид окна Deductor

В Deductor Studio ключевым понятием является *проект*. Это файл с расширением *.ded, который хранит в себе последовательности обработки данных (сценарии), настроенные визуализаторы, переменные проекта и служебную информацию. Свойства проекта можно настроить (Файл – Свойства проекта).

В Deductor Studio вся работа ведется с использованием пяти мастеров: мастера импорта, экспорта, обработки, визуализации и подключений. С помощью мастеров импорта, экспорта и обработки формируется сценарий. Мастер подключений предназначен для создания настроек подключений к различным источникам и приемникам данных. Мастер визуализации настраивает визуализаторы для конкретного узла.

Визуализатором называется любое представление набора данных в каком-либо виде: табличном, графическом, описательном [2]. Примеры визуализаторов: таблица, дерево, гистограмма, диаграмма, OLAP-куб и т.д.

В Deductor Studio для аналитика основополагающим понятием является сценарий. *Сценарий* представляет собой последовательность операций с данными, представленную в виде иерархического дерева [2]. В дереве каждая операция образует узел, заголовок которого содержит: имя источника данных, наименование применяемого метода обработки, используемые при этом поля и т.д. Кроме этого, слева от наименования узла стоит значок, соответствующий типу операции (рис. 2).

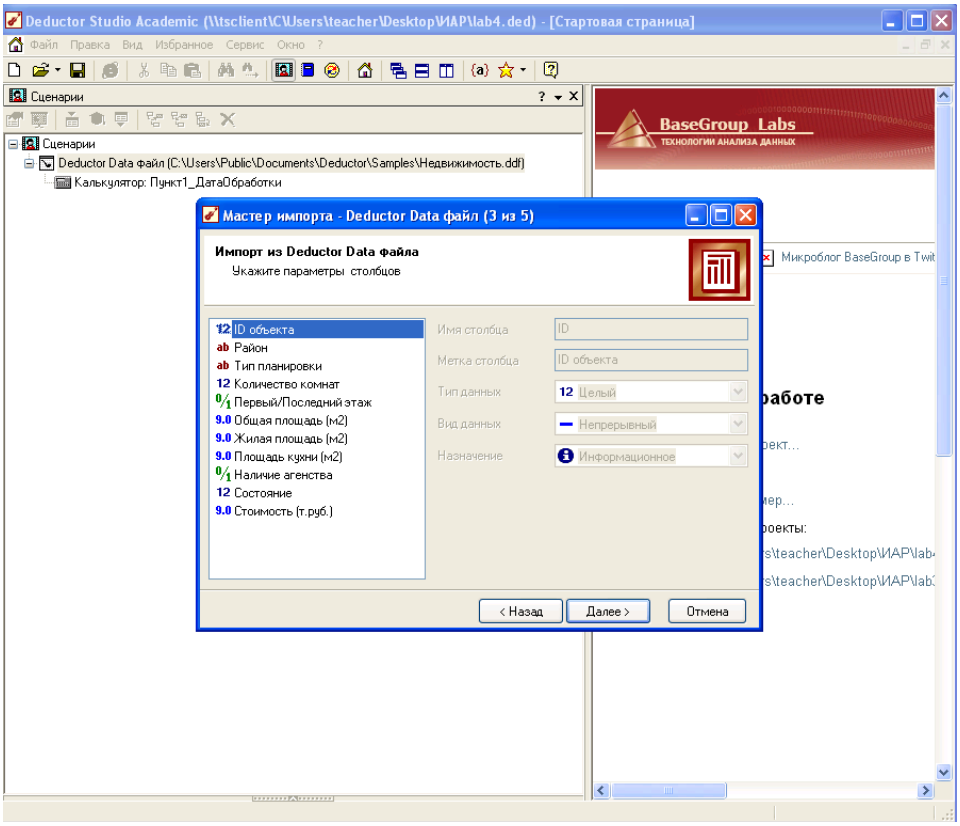


Рис. 2. Импорт данных в сценарий

Deductor не имеет собственных средств для ввода данных, поэтому сценарий *всегда* начинается с узла импорта из какого-либо источника (с помощью Мастера импорта) (рис. 2). К любому узлу импорта можно добавить узел обработки или узел экспорта. Новый узел будет добавлен как подчиненный к узлу импорта. В нем все обработчики сгруппированы по следующим четырем категориям: очистка данных, трансформация данных, Data Mining, прочее.

Рассмотрим основные шаги работы в платформе на примере создания визуализатора OLAP-куба и вычисляемых полей с использованием узла «Калькулятор».

Вначале с помощью Мастера импорта импортируем файл Недвижимость.ddf (рис. 2). Заметим, что папка Samples с готовыми файлами данных появится после установки платформы. Каждое поле импортированной таблицы имеет свой тип (рис. 3).

Тип	Описание
0/1	*логический* данные в поле могут принимать только два значения – 0 или 1
7	*дата/время* поле содержит данные типа дата/время
9.0	*вещественный* числа с плавающей точкой
12	*целый* целые числа
ab	*строковый* строки символов

Рис. 3. Основные типы полей

В процессе импорта выберем требуемый визуализатор – OLAP-куб и зададим его основные элементы: измерения (в строках – поле «Тип планировки»; в столбцах – «Район») и факты и их способ агрегации (сумма по полю «Стоимость») (рис. 4.)

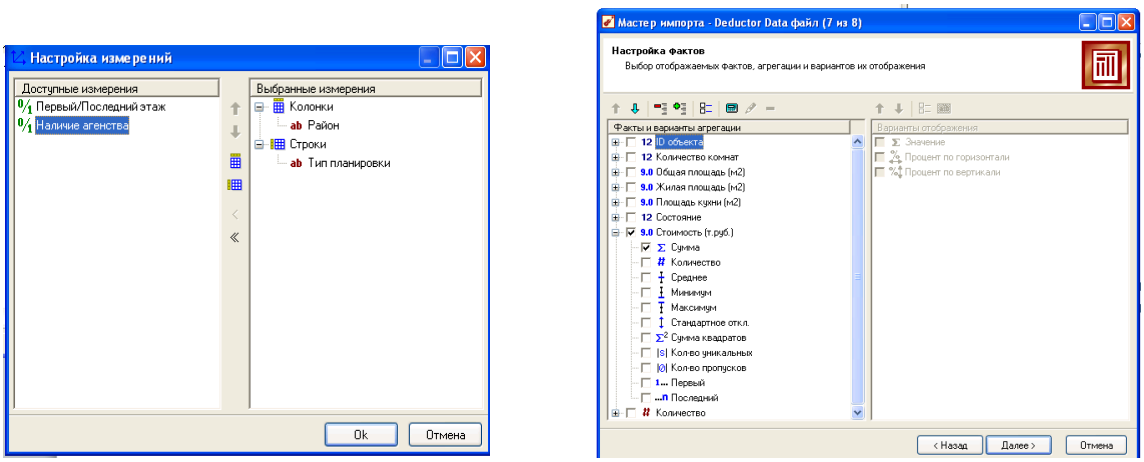


Рис.4. Посторенние OLAP-куба

В результате имеем куб, общий вид которого показан на рис. 5. Он отражает суммарную стоимость квартир разных планировок по различным районам города с учетом наличия/отсутствия агентства и нахождения или ненахождения на крайних этажах.

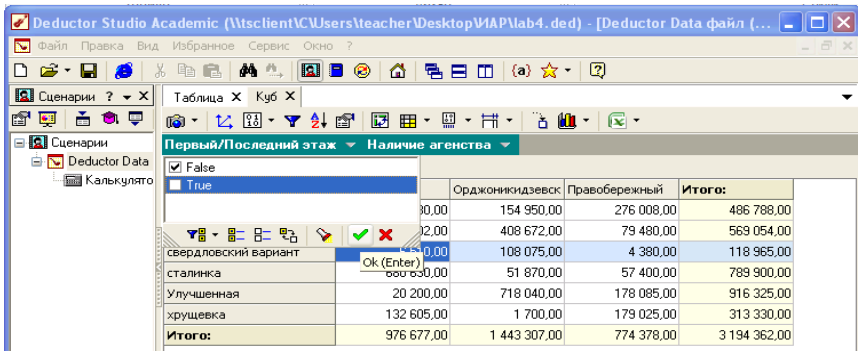
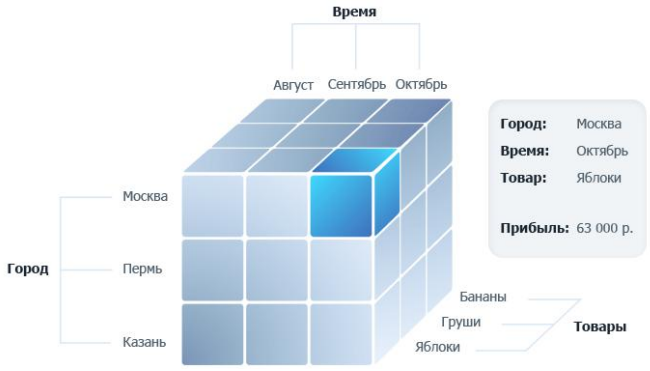


Рис. 5. OLAP-куб по файлу Недвижимость

Переключение невидимого третьего измерения осуществляется установкой флажков в соответствующих списках. Так, для того, чтобы увидеть суммарную стоимость квартир каждого вида планировки по районам, находящимся не на крайних этажах, выбирается только флаг «False» в измерении «Первый/последний этаж».

Скажем несколько слов о принципе построения OLAP-куба (рис. 6а) и его основных понятиях.

а)



б)

		Август	Сентябрь	Октябрь	
Москва	Яблоки	20 000	21 000	22 000	63 000
	Груши	25 000	27 000	29 000	81 000
	Бананы	30 000	33 000	36 000	99 000
	Итого:	75 000	81 000	87 000	243 000
Пермь	Яблоки	18 000	19 000	20 000	57 000
	Груши	20 000	22 000	24 000	66 000
	Бананы	14 000	17 000	30 000	51 000
	Итого:	52 000	58 000	64 000	174 000
Казань	Яблоки	12 000	13 000	14 000	39 000
	Груши	18 000	20 000	22 000	60 000
	Бананы	22 000	25 000	28 000	75 000
	Итого:	52 000	58 000	64 000	174 000
Итого		179 000	197 000	215 000	591 000

Рис. 6. Представление информации о продажах различных товаров в разрезе городов и с разбивкой по месяцам (сверху – в виде куба, снизу – в виде двумерной таблицы) [1]

OLAP-куб – это многомерный массив данных, как правило, разреженный и долговременно хранимый. Многомерность в рамках OLAP предполагает концептуальное представление данных в виде многомерной структуры данных – *гиперкуба* (OLAP-куба), ребрами в котором выступают *измерения* (dimension), а данные (facts – *факты*; measures – *меры*, *показатели*) расположены на пересечении осей измерений.

Из OLAP-куба может быть составлен обычный плоский отчёт. По столбикам и строчкам отчёта будут бизнес-категории (измерения), а в ячейках показатели (данные) (рис. 6б).

После визуализации обратимся к настройке вычисляемых столбцов таблицы Недвижимость, создав узел «Калькулятор» из группы «Трансформация данных» в Мастере обработки.

«Калькулятор» предназначен для добавления в набор данных новых полей, которые рассчитываются по определенным правилам на основе столбцов данных и встроенных функций (рис. 7).

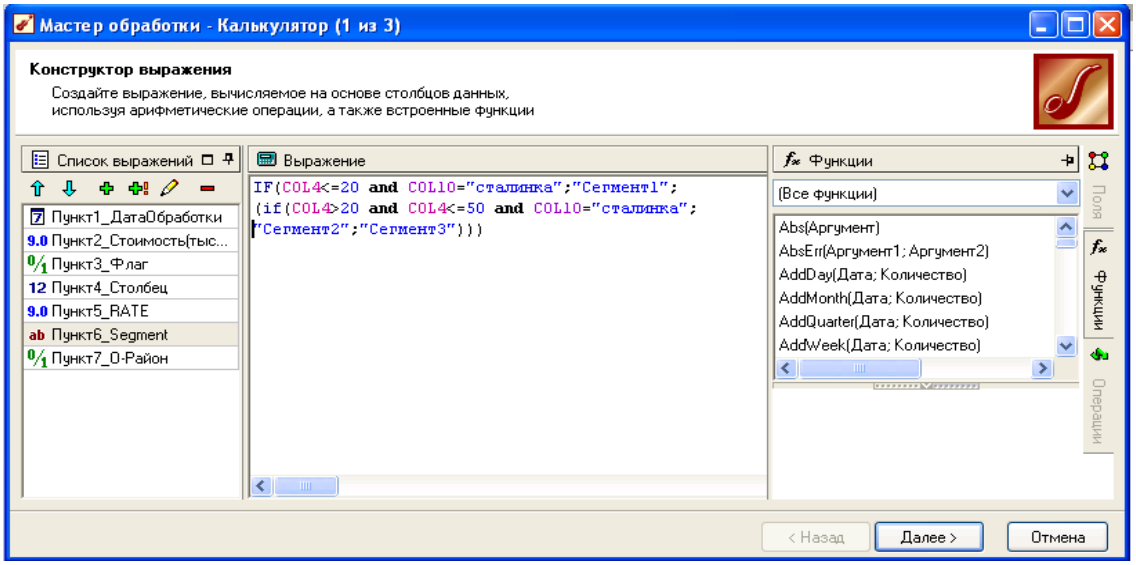


Рис. 7. Узел «Калькулятор»

Окно калькулятора имеет несколько областей (перечисляем слева направо): *область списка вычисляемых выражений* (каждое вычисляемое выражение будет новым столбцом в результирующем наборе данных); *формула*, по которой будет рассчитываться выражение (окно выражения); *список всех существующих столбцов* (вкладка «Поля») текущего набора данных, состоящих из имен и меток, *функций* (вкладка «Функции») и доступных арифметических, логических и других *операций* (вкладка «Операции»).

Для иллюстрации возможностей работы с узлом «Калькулятор» выполним следующие задачи (задачи приведены вместе с решающими их выражениями):

1. Создайте новое поле Стоимость (т. у.е.), который рассчитывается делением на 30 поля Стоимость (т. руб.). Все значения в новом поле должны быть округлены до второго знака. round ((COL9/32);2).

2. Создайте новое поле Флаг, значение в котором истинно, если выполняется условие: Стоимость (т. руб.) > 2000 и Наличие агентства = TRUE. IFF(COL9>2000 and COL7;True;false).

3. Создайте еще один столбец, значение в котором равно 1, если выполняется условие: Флаг = TRUE и Состояние =самое лучшее. IFF(p3 and COL8=max(2;3;4;5);1;0).

4. Создайте новое поле Сегмент, которое делит все квартиры на сегменты по следующим правилам (используйте функцию IF/IFF):

1) ЕСЛИ Жилая площадь от 0 до 20 и Тип планировки = Сталинка ТО Сегмент = Сегмент 1;

2) ЕСЛИ Жилая площадь от 21 до 50 и Тип планировки = Сталинка ТО Сегмент = Сегмент 2;

3) Сегмент = Сегмент 3 во всех остальных случаях, не удовлетворяющим п. 1) и 2). Решение этого пункта приведено на рис. 7.

5. Создайте новое поле, в которое выведите значение TRUE, если название района, где размещена квартира, начинается на «О» и FALSE в противном случае. IFF(left(COL11;1)="O";True;False).

Таким образом, мы рассмотрели возможности автоматизации аналитической работы по обработке данных с использованием современных информационных технологий обработки информации. Очевидно, что функционал аналитических платформ, в частности Deductor, значительно шире, чем нами было рассмотрено, и оставляет множество возможностей как для обучения применению информационных технологий в аналитической деятельности, так, собственно, и для реализации этой деятельности.

Библиографический список

1. OLAP-технологии. KAI development. IT-решения для бизнеса и государства. – URL: http://www.kaidev.ru/Pages/Article.aspx?p=OlapAbout.

2. Руководство аналитика Deductor 5.3. – URL: http://www.basegroup.ru/download/guides/.

К содержанию

УДК 532.542

ОБ ОДНОМ РЕЖИМЕ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРАТНОЙ ПРИ ВСПЛЫТИИ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА

О.Р. Нурисламов

В работе представлена модель образования пористой гидратной частицы при всплытии газового пузырька. Установлен критерий, разделяющий два режима, образования гидратной корки. Принято, что интенсивность образования гидрата определяется конвективным теплообменом с окружающей частицу водой.

Ключевые слова: всплытие гидратной частицы, образование газогидратов, пористая гидратная частица.

Введение

Газовые гидраты – это клатратные соединения (соединения включения), образующиеся при определенных термобарических условиях из воды и газа. В природе самым распространенным гидратом является гидрат метана. Интерес к газовым гидратам в настоящее время преимущественно проявляется как к энергетическим ресурсам, запасы газа в которых по некоторым оценкам в несколько раз превышают разведанные и неразведанные запасы углеводородного сырья (угля, нефти, газа). Газовые гидраты часто являются причинами многих аварийных ситуаций и экологических катастроф при добыче углеводородного сырья на шельфе и его транспортировке по трубопроводам.

В данной работе предложена модель образования пористой гидратной частицы при всплытии одиночного газового пузырька. Поток газовых пузырей может образоваться при возникновении на дне морей или океанов трещин в породах, покрывающих газовые пустоты, при авариях на нефтегазодобывающих скважинах, а также при разгерметизации газопроводов, расположенных на дне морей.

Постановка задачи

Предполагается, что в зависимости от начальной глубины всплытия пузырька возможны различные режимы образования гидратной корки [1]–[3]. Критерием, разделяющим эти режимы является глубина h^*, на которой плотность газового пузырька равна средней плотности газового включения в образующейся гидратной частице, т.е.:

$$\rho_g = G\rho_h.$$

Для газа примем модель калорически совершенного газа:

$$p = \rho_g R_g T.$$

Давление на глубине h будет определяться согласно гидростатическому закону:

$$p = p_0 + \rho_w g h.$$

Тогда глубина h^* будет определяться формулой:

$$h^* = \frac{G \rho_h R_g T - p_0}{\rho_w g},$$

где G – массовая доля газа в гидрате, ρ_h – плотность гидрата, R_g – газовая постоянная, p_0 – атмосферное давление, ρ_w – плотность воды, g – ускорение свободного падения. В частности, для газа метана $G = 0.12$, $\rho_h = 910$ кг/м^3, $R_g = 519.6$ Дж/(кг·К). Полагая, что температура окружающей воды $T = 277$ К (т.е. 4ºС), получим $h^* \approx 1594$ м.

Если всплытие пузырька начинается с глубины $h > h^*$, уменьшение объема газовой части пузырька происходит медленнее увеличения объема образующегося при этом гидрата. Поэтому рост гидрата будет происходить на внешней поверхности пузырька, образовывая непроницаемую гидратную структуру, только за счет диффузии газа через гидратную корку.

Если всплытие пузырька начинается с глубины $h < h^*$, вследствие расхода газа на образование гидратной корки, уменьшение объема газовой части пузырька происходит быстрее увеличения объема образующегося при этом гидрата. Это указывает на пористую структуру образующейся гидратной корки. Гидратная корка при этом растет внутрь за счет воды, просачивающейся через пористую структуру.

Полагая, что за время полного образования гидратной частицы глубина всплытия изменится незначительно, пористость образующейся гидратной корки будет постоянна и определяться по формуле:

$$m = 1 - \frac{p_0 + \rho_w g h}{G \rho_h R_g T}.$$

Для образования гидрата на границе контакта газа и воды необходимо реализовать определенные термобарические условия, при которых температура среды должна быть ниже температуры фазового равновесия гидрата, газа и воды, определяемая условием:

$$T_s(p) = T_{s0} + T_* \ln\left(\frac{p}{p_{s0}}\right),$$

где T_s и T_{s0} – равновесные температуры при давлениях p и p_{s0} соответственно, T_* – эмпирический параметр, зависящий от газа и исследуемого интервала температур. Область, для которой температура среды T ниже температуры фазового равновесия $T_s(p)$, называется зоной стабильности гидратов (ЗСГ).

Рассмотрим всплытие одиночного газового пузырька в ЗСГ, сопровождаемое образованием пористой гидратной частицы. Для теоретического описания процесса ось координат z направим вертикально вверх с началом отсчета, совпадающим с начальным положением пузырька.

Для распределения давления по координате z примем гидростатический закон:

$$p = p_0 + \rho_w g(h - z),$$

где p_0 - атмосферное давление, h – начальная глубина, с которой начинается всплытие, z – текущая координата положения частицы.

Будем полагать, что интенсивность образования гидрата лимитируется интенсивностью отвода тепла от границы образования гидрата в окружающую воду. Условие теплового баланса на фазовой границе будет иметь вид:

$$j_h l_h = q,$$

где $j_h = (1-m)\rho_h \frac{da_g}{dt}$ - интенсивность образования гидрата, отнесенная на единицу площади поверхности фазового перехода, q - интенсивность теплового потока от поверхности фазового перехода, l_h - теплота образования гидрата.

Пренебрегая теплоемкостью гидратной частицы по сравнению с теплотой, выделяющейся при гидратообразовании, можно полагать, что интенсивности тепловых потоков от поверхности фазового перехода и от внешней поверхности гидратной частицы одинаковы и равны q.

Интенсивность теплопередачи зависит от разности температур между поверхностью частицы и водой, а также от скорости движения пузырька и определяется по формуле:

$$q = k(T_h - T_w), \quad k = \frac{\mathrm{Nu}_w \lambda_w}{2a_{hg}},$$

где T_h – температура на поверхности гидратной частицы, T_w – температура воды, k - коэффициент теплопередачи, λ_w - теплопроводность воды, Nu_w – число Нуссельта, a_{hg} – радиус гидратной частицы. Число Нуссельта зададим в виде:

$$\mathrm{Nu}_w = 2 + 0.46 Re^{0.55} Pr^{0.33}, \quad Re = \frac{2a_{hg}\rho_w w}{\mu_w}, \quad Pr = \frac{\nu_w}{\chi_w}$$

где Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля, w – скорость всплытия частицы, $\mu_w = \rho_w \nu_w$ – динамическая вязкость воды, ν_w – кинематическая вязкость воды, $\chi_w = \lambda_w / \rho_w c_w$ – коэффициент температуропроводности воды.

Уравнение для изменения массы частицы, с учетом пористости образующейся гидратной оболочки, имеет вид:

$$\frac{dm_{hg}}{dt} = 4\pi a_g^2(\rho_g - m\rho_w - (1-m)\rho_h)\frac{da_g}{dt},$$

где m_{hg}, a_g – масса и радиус газового пузырька.

Уравнение импульсов для гидратной частицы примем в виде:

$$\frac{d}{dt}\big(w(m_{hg} + \mu_{hg})\big) = f_A - f_T - f_c,$$

$$f_A = \frac{4}{3}\pi a_{hg}^3 \rho_w g,\ f_T = m_{hg} g,\ f_c = \xi \pi a_{hg}^2 \frac{\rho_w w^2}{2},$$

где f_A, f_T, f_c – силы Архимеда, тяжести, гидродинамического сопротивления, для которых масса газогидратной частицы и присоединенной массы определяются соответственно по формулам:

$$m_{hg} = \frac{4}{3}\pi\big(a_{hg}^3 - a_g^3\big)((1-m)\rho_h + m\rho_w) + \frac{4}{3}\pi a_g^3 \rho_g,\ \ \mu_{hg} = \frac{2}{3}\pi a_{hg}^3 \rho_w$$

Для зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления ξ от числа Рейнольдса Re используем следующее выражение [4]:

$$\xi = \frac{12}{\mathrm{Re}}(1 + 0.241\mathrm{Re}^{0.687}) + 0.42(1 + 1.902\cdot 10^4 \mathrm{Re}^{-1.16})^{-1}.$$

Анализ численного решения

Численные расчеты проведены при следующих значениях теплофизических параметров: $\rho_h = 910$ кг/м^3, $l_h = 5\cdot 10^5$ Дж/кг, $\lambda_h = 0.6$ Вт/(м·К), $T_{s0} = 280$ К, $p_{s0} = 5.5$ МПа, $T_* = 10$ К, $\nu_w = 10^{-6}$ м^2/с, $\rho_w = 1000$ кг/м^3, $c_w = 4200$ Дж/(кг·К), $\lambda_w = 0.556$ Вт/(м·К), $R_g = 519$ Дж/(кг·К), $g = 9.81$ м/с^2, $G = 0.12$, $p_0 = 0.1$ МПа.

На рис. 1 представлена динамика изменения радиуса газового ядра a_g, толщины гидратной оболочки δ, скорости всплытия пузырька w и массы гидратной частицы m_{hg} при всплытии с начальной глубины $h = 1000$ м при различных значениях начального радиуса газового пузырька $a_{g0} = 1, 1.5$ и 2 мм, соответствующих на рисунке цифрам 1, 2 и 3. Вследствие большой начальной положительной плавучести пузырек газа вначале всплытия резко увеличивает скорость до максимально возможного значения, а в процессе образования гидратной оболочки, вследствие увеличения массы, скорость постепенно уменьшается и начинает стабилизироваться к концу процесса образования гидратной частицы. Согласно рис. 1 (е), скорость синтеза гидрата сильно зависит от исходного радиуса пузырька. Так, например, время полного образования гидратной частицы для газового пузырька с начальным радиусом 1 мм составляет около 200 секунд, а для 2 мм – 1000 секунд. Массы образующихся гидратных частиц при этом соответственно равны 4 и 32 мг. Это говорит о том, что средние скрости образования гидрата отличаются примерно в 1,6 раза. Объясняется это тем,

что с увеличением исходного радиуса пузырька увеличивается и средняя скорость всплытия, что напрямую влияет на интенсивность теплопередачи и, как следствие, на интенсивность гидратообразования.

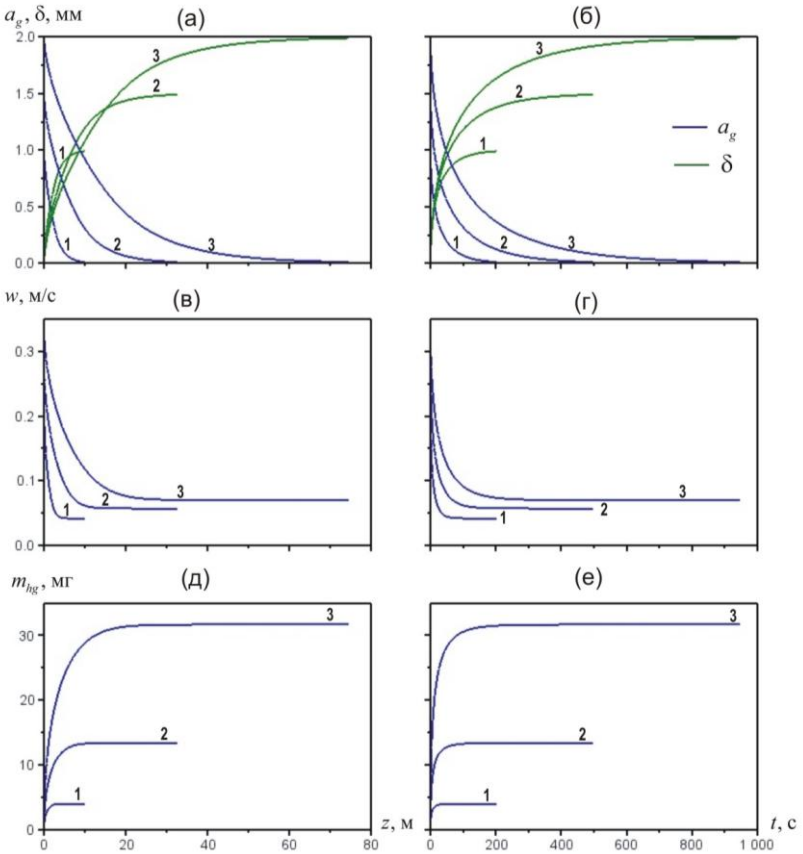


Рис. 1. Динамика изменения радиуса газового ядра a_g и толщины гидратной оболочки δ *(а, б)*, скорости всплытия пузырька w (*в, г*) и массы гидратной частицы m_{hg} (*д, е*) при различных значениях начального радиуса газового пузырька a_{g0}

На рис. 2 представлена динамика изменения радиуса газового ядра a_g, толщины гидратной оболочки δ, скорости всплытия пузырька *w* и массы гидратной частицы m_{hg} при всплытии газового пузырька радиуса $a_{g0} = 1$ мм при различных значениях начальной глубины $h = 800, 1000$ и 1500 м, обозначенных на рисунках цифрами 1, 2 и 3 соответственно. Из рис. 2 (е) видно, что времена полного образования гидратной частицы слабо зависят от начальной глубины всплытия. Масса гидрата в гидратных частицах, вследствие различной пористости частиц, будет различной. Так для частицы всплывающей с глубины 1500 м величина пористости составляет 0,1, а для глубины 800 м – 0,5. Исходя из всего этого можно сделать вывод о том, что скорость образования гидрата в пузырьке, всплывающей с глубины 1500 м, примерно в 2 раза превышает скорость образования гидрата в пузырьке, всплывающей с глубины 800 м.

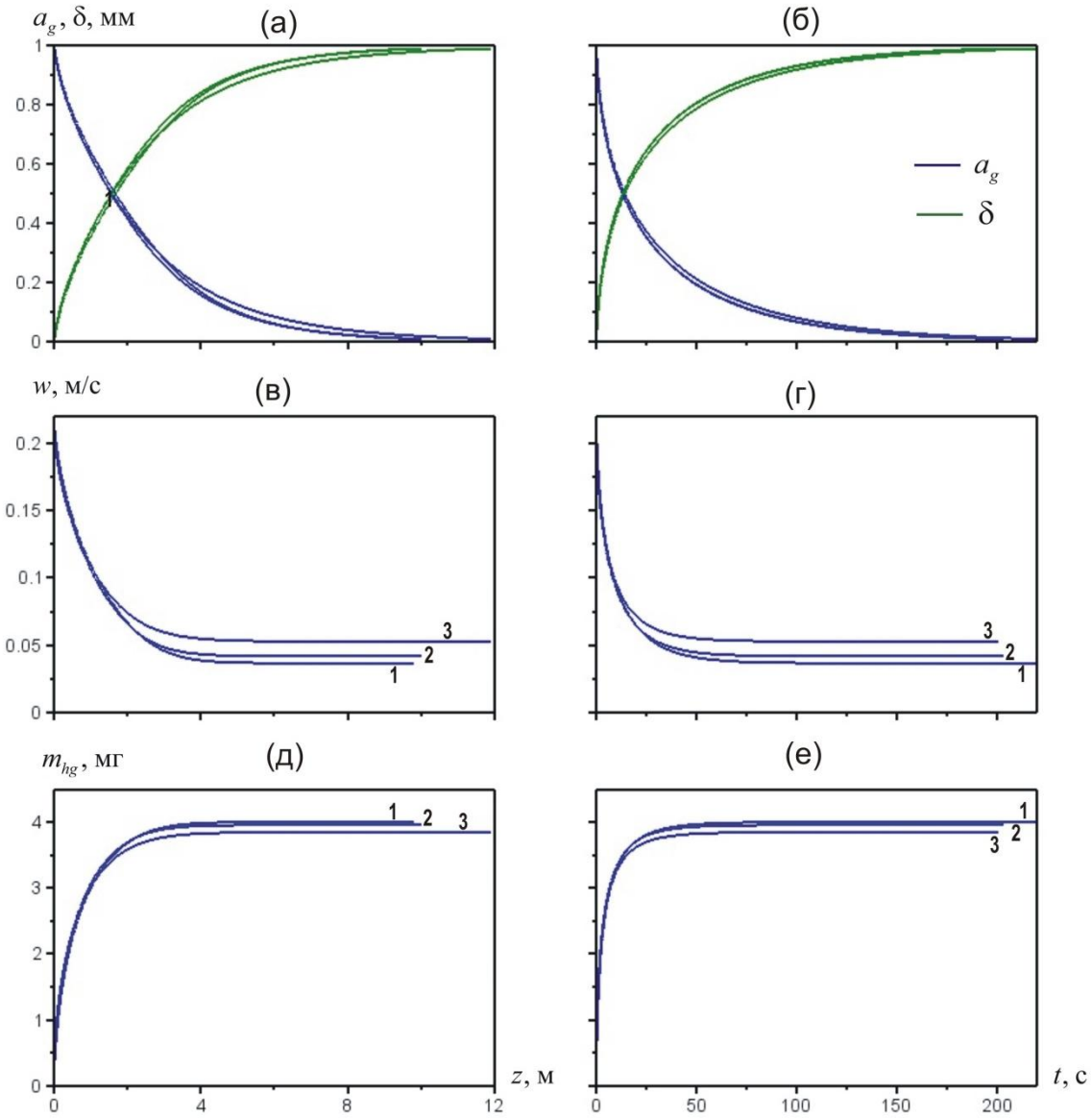


Рис. 2. Динамика изменения радиуса газового ядра a_g и толщины гидратной оболочки δ *(а, б)*, скорости всплытия пузырька w (*в, г*) и массы гидратной частицы m_{hg} (*д, е*) при различных значениях начальной глубины h

Заключение

Предполагается, что образование гидратной оболочки возможно в двух режимах: в диффузионном режиме, если начальная глубина всплытия больше $h^* \approx 1594$ м, и в режиме фильтрационного проникновения воды через пористую гидратную оболочку, если начальная глубина всплытия меньше h^*. Установлено, что скорость образования гидрата во втором режиме значительно зависит от начальной глубины всплытия и радиуса пузырька.

Библиографический список

1. Егоров, А.В. Тепловые эффекты при транспорте глубоководных гидратов метана в негермнтичном контейнере / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, А.Н. Рожков, Е.С. Черняев. – Препринт ИПМех РАН № 1009, 2012.

2. Егоров, А.В. О превращениях глубоководных метановых пузырей в гидратный порошок и гидратную пену / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, А.Н. Рожков, А.М. Сагалевич, Е.С. Черняев // Океанология. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 1–13.

3. Егоров, А.В. Разрушение глубоководных метановых пузырей / А.В. Егоров, Р.И. Нигматулин, Н.А. Римский-Корсаков, А.Н. Рожков, А.М. Сагалевич, Е.С. Черняев // Океанология. – 2010. – Т. 50. – № 4. – С. 505–514.

4. Кутепов, А.М. Химическая гидродинамика / А.М. Кутепов, А.Д. Полянин, З.Д. Запрянов, А.В. Вязьмин, Д.А. Казенин. – М.: Квантум, 1996. – 336 с.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. СНЕЖИНСК

УДК 531.2+ 534.1

ОБ ИЗОХРОННОСТИ МУЛЬТИФИЛЯРНОГО ПОДВЕСА

С.В. Соколков

Исследована зависимость изохронности крутильных колебаний трифилярного подвеса от его геометрических параметров. Показано, что при увеличении длины подвеса изохронность колебаний ухудшается, приближаясь в пределе к изохронности колебаний математического маятника. Численными методами найдено оптимальное соотношение геометрических параметров мультифилярного подвеса, при котором период его крутильных колебаний практически не зависит от амплитуды в пределах $\pm\pi/2$.

Ключевые слова: период крутильных колебаний, момент инерции, изохронность, гармонические колебания.

Крутильные колебания тел, подвешенных на мультифилярном подвесе, используют в технике для измерения моментов инерции различных тел [1]. К сожалению, точность этого простого метода принципиально ограничена неизохронностью колебаний подвеса, т.е. зависимостью периода колебаний от амплитуды. Этот недостаток механических колебательных систем имеет глубокие исторические корни. Еще Х. Гюйгенс озабоченный неизохронностью математического (кругового) маятника, предложил циклоидальный маятник [2, 3].

В физическом практикуме для определения моментов инерции тел обычно применяют трифилярный подвес [4, 5]. Величину искомого момента момент инерции вычисляют по измеренному периоду крутильных колебаний тела и известным геометрическим параметрам подвеса, используя приближенную формулу, полученную при двух допущениях:

1) амплитуда крутильных колебаний мала (не больше 5–6º);

2) длина подвеса намного больше радиусов его платформ, поскольку принято считать, что чем больше длина подвеса, тем выше изохронность его колебаний.

Первое условие усложняет измерение периода колебаний, а второе – вызывает определенные практические неудобства в работе с прибором.

Крутильные колебания подвеса будут изохронными, если момент возвращающих сил является линейной функцией угла поворота подвижной платформы. Точные соотношения, связывающие моменты сил в трифилярном подвесе с углом поворота платформы, достаточно просты. Цель настоящей работы – анализ влияния геометрических параметров подвеса на характер зависимости возвращающего момента от угла поворота нижней платформы подвеса, и, как следствие, на изохронность ее колебаний.

Типичный трифилярный подвес (рис. 1) состоит из трех нитей 2, верхние концы которых прикреплены симметрично по вершинам равностороннего треугольника к верхнему основанию 1, а нижние – к нижнему основанию 3. Поворачивая верхнее основание вокруг вертикальной оси на некоторый угол, возбуждают крутильные колебания нижнего основания. На нижнее основание помешают исследуемое тело, момент инерции которого определяется, располагая его так, чтобы ось подвеса не отклонялась вертикали.

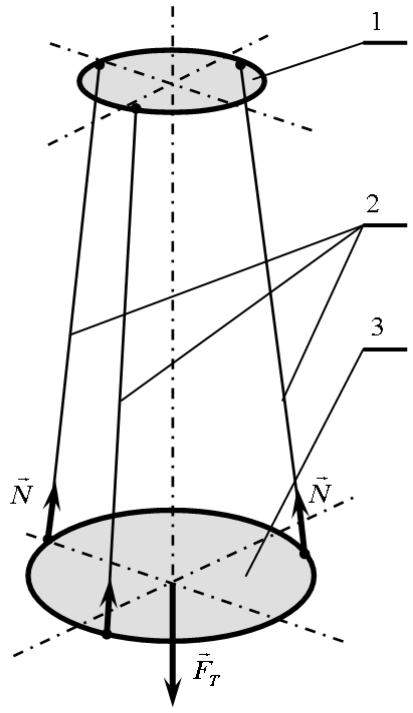


Рис. 1. Трифилярный подвес

На покоящееся нижнее основание подвеса (рис. 2) массой $\boldsymbol{m}$ со стороны земли действует сила тяжести $\boldsymbol{F_T}$, а со стороны нити – реакции нити $\boldsymbol{N}$. В соответствии со вторым законом Ньютона сумма сил, действующих на основание, равна нулю. В силу симметрии подвеса вертикальная проекция реакции нити $\boldsymbol{N_в}$ равна по модулю одной третьей силы тяжести, т.е.:

$$N_{\hat{A}} = \frac{1}{3}mg \quad (1)$$

Модуль реакции подвеса $\boldsymbol{N}$ можно определить, зная величину угла α (рис. 2):

$$N = \frac{N_{\hat{A}}}{\cos\alpha} = \frac{mg}{3\cdot\cos\alpha} \quad (2)$$

Модуль горизонтальной проекции реакции $\boldsymbol{N_г}$ равен:

$$N_{\tilde{A}} = N\cdot\sin\alpha = \frac{m\cdot g\cdot\sin\alpha}{3\cdot\cos\alpha} = \frac{m\cdot g}{3}tg\alpha \quad (3)$$

где $tg\alpha = \dfrac{\boldsymbol{R-r}}{\boldsymbol{h}} = \dfrac{\boldsymbol{R-r}}{\sqrt{\boldsymbol{l}^2 - (\boldsymbol{R-r})^2}}$ (4)

Горизонтальная проекция вектора $\boldsymbol{N}$ направлена радиально к центру основания.

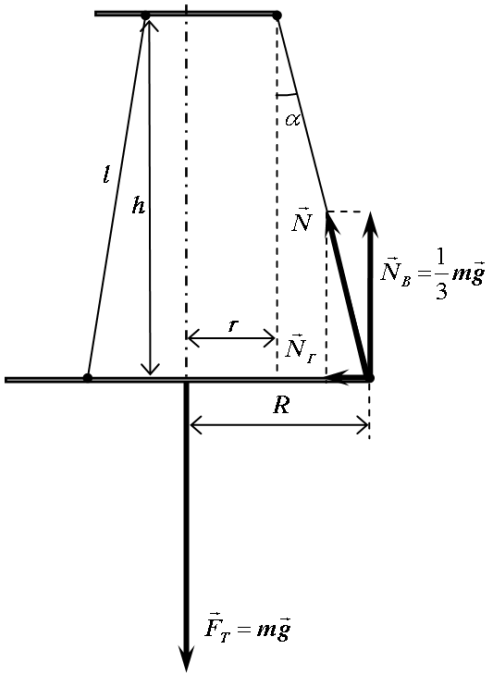


Рис. 2. Силы, действующие
на покоящееся нижнее основание подвеса

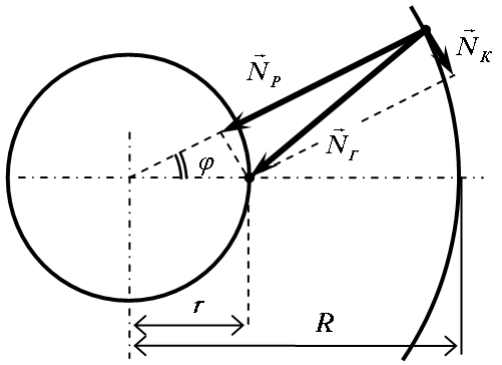


Рис. 3. Силы, действующие на повернутое нижнее основание.
Вид на трифилярный подвес сверху (для упрощения построений
$\boldsymbol{N_\Gamma}$ совмещена с проекцией нити подвеса)

При повороте нижнего основания относительно верхнего на угол φ направление и величина горизонтальной проекции силы реакции подвеса $\boldsymbol{N_\Gamma}$ изменится (рис. 3), что привет к возникновению касательной составляющей $\boldsymbol{N_K}$, которая будет стремиться повернуть нижнее основание в положение равновесия.

Отношение касательной составляющей к радиальной составляющей нетрудно определить из геометрических законов:

$$\frac{N_{\hat{E}}}{N_{Đ}} = \frac{r \cdot \sin\varphi}{R - r \cdot \cos\varphi} \tag{5}$$

С другой стороны из теоремы Пифагора:

$$N_{Ã}^2 = N_{\hat{E}}^2 + N_{Đ}^2 \tag{6}$$

Решая совместно уравнения (5) и (6) находим:

$$N_{\hat{E}} = \frac{N_{Ã} \cdot r \cdot \sin\varphi}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi}} \tag{7}$$

И, далее, с учетом (3), получаем:

$$N_{\hat{E}} = \frac{m \cdot g \cdot tg\alpha}{3} \cdot \frac{r \cdot \sin\varphi}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi}} \tag{8}$$

Следует также учесть, что угол α также изменился. Величина этого угла будет зависеть от угла поворота нижнего основания φ. На основе геометрических построений нетрудно показать, что:

$$tg\alpha = \frac{\sqrt{R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi}}{\sqrt{l^2 - \left(R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi\right)}} \tag{9}$$

С учетом (9) получаем:

$$N_{\hat{E}} = \frac{m \cdot g}{3} \cdot \frac{r \cdot \sin\varphi}{\sqrt{l^2 - \left(R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi\right)}} \tag{10}$$

Далее учитывая плечо силы R и то, что подвеса три, находим результирующий момент возвращающих сил:

$$M(\varphi) = 3N_{\hat{E}} \cdot R = m \cdot g \cdot \frac{R \cdot r \cdot \sin\varphi}{\sqrt{l^2 - \left(R^2 + r^2 - 2 \cdot R \cdot r \cdot \cos\varphi\right)}} \tag{11}$$

Преобразуем формулу (11):

$$M(\varphi) = m \cdot g \cdot \frac{R \cdot r \cdot \sin\varphi}{\sqrt{l^2 - R^2 + r^2}\sqrt{1 + \frac{2Rr}{l^2 - R^2 + r^2}\cos\varphi}}$$

и введем новое обозначение, объединив геометрические параметры подвеса в обобщенный параметр ξ:

$$\xi = \frac{2Rr}{l^2 - R^2 + r^2} \tag{12}$$

Тогда:

$$M = m \cdot g \cdot \frac{\sqrt{\xi \cdot R \cdot r}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sin\varphi}{\sqrt{1 + \xi \cdot \cos\varphi}} \tag{13}$$

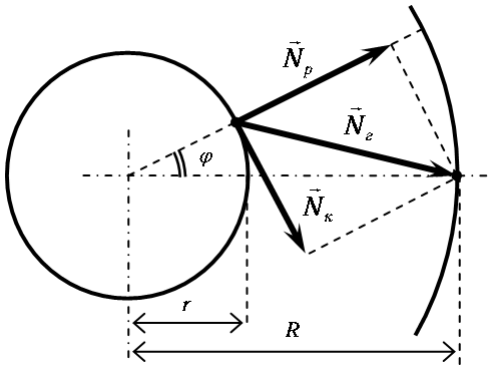


Рис. 4. Силы, действующие на повернутое верхнее основание.
Вид на трифилярный подвес сверху

Нетрудно показать, что при рассмотрении сил, действующих на верхнее основание со стороны подвеса (рис. 4.), мы получим то же самое значение результирующего момента. Поскольку, несмотря на то, что касательная компонента силы будет больше, однако плечо силы в этом случае меньше (***r*<*R*).**

Зависимость величины возвращающего момента от угла поворота ***M***(φ) при больших изменениях угла φ является существенно нелинейной. Однако характер нелинейности, как видно из соотношения (13) зависит от параметра ξ. Анализ показывает, что можно найти такое значение параметра ξ, при котором в пределах $-\pi/2 \le \varphi \le \pi/2$ указанная зависимость весьма близка к линейной.

Воспользовавшись методом наименьших квадратов, найдем значение параметра ξ**,** для которого зависимость ***M***(φ) максимально приближается к линейной.

На рисунке 5 приведена зависимость модуля вектора невязки ***R***(ξ), рассчитанного для 18 значений угла φ в диапазоне. $0 \le \varphi \le \pi/2$.

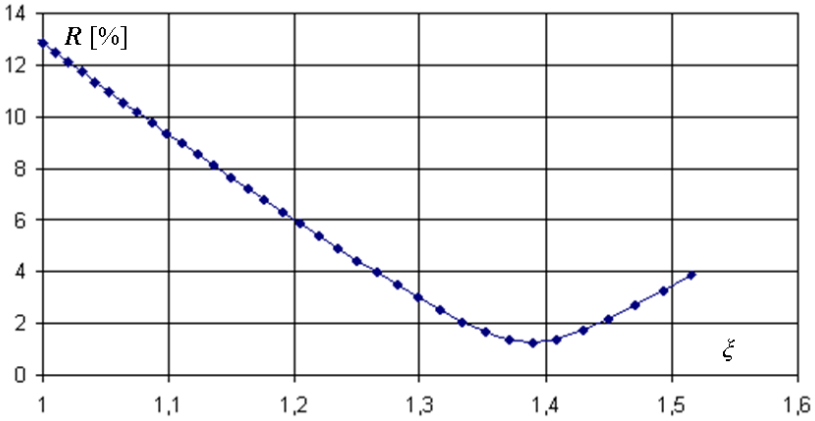


Рис. 5. Результаты оптимизации параметра ξ

$$\boldsymbol{R}=\sqrt{\sum_{i=1}^{18}\left(\boldsymbol{M}(\varphi_i)-\boldsymbol{a}\cdot\varphi_i\right)^2}\text{, где }\boldsymbol{a}=\frac{\boldsymbol{M}(\pi/2)}{\pi/2}.$$

На рисунке 6 представлен нормированный график зависимости $\boldsymbol{M}(\varphi)$, построенный для ξ = 1,39. Расчеты показывают, что при таком значении ξ средняя нелинейность зависимости возвращающего момента от угла поворота не превышает 0,1 % в диапазоне углов крутильных колебания $\pm\pi/2$.

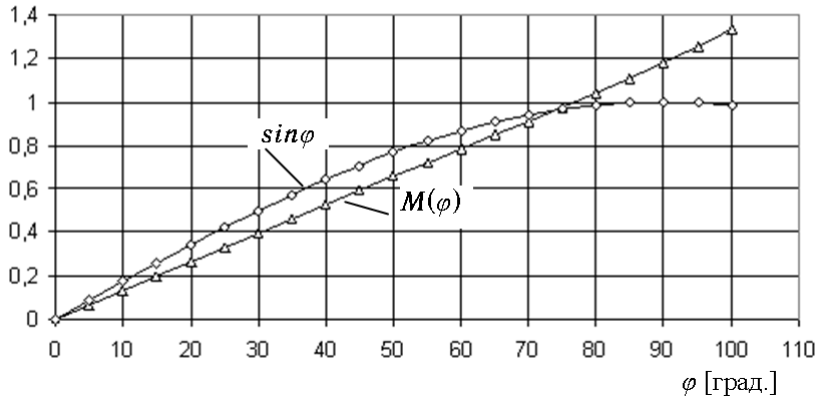


Рис. 6. Нормированный график зависимости $\boldsymbol{M}(\varphi)$

Возвращающие силы, действующие в таком подвесе, можно считать линейными в пределах $-\pi/2\le\varphi\le\pi/2$. Т.е.:

$$\boldsymbol{M}(\varphi)=\boldsymbol{D}\cdot\varphi \qquad (14)$$

где $\boldsymbol{D}$ – модуль кручения.

Найдем величину $\boldsymbol{D}$.

$\boldsymbol{M}(\pi/2)=\boldsymbol{D}\cdot\pi/2$

Отсюда с учетом (13) получаем:

$$\boldsymbol{D}=\frac{2}{\pi}\boldsymbol{M}(\pi/2)=\frac{2}{\pi}\cdot\boldsymbol{m}\cdot\boldsymbol{g}\cdot\frac{\sqrt{\xi\cdot\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{r}}}{\sqrt{2}}=\boldsymbol{mg}\cdot\frac{\sqrt{2\xi\boldsymbol{Rr}}}{\pi} \qquad (15)$$

Из теории колебаний известно, что динамика движения такой системы описывается дифференциальным уравнением 2-го порядка: $\frac{\boldsymbol{d}^2\varphi}{\boldsymbol{dt}^2}=\frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{J}}\cdot\varphi$, где $\boldsymbol{J}$ – момент инерции нижнего основания относительно оси подвеса.

Решением этого уравнения является гармоническая функция времени. Т.е. в системе будут происходить гармонические колебания, описываемые следующей зависимостью

$$\varphi(\boldsymbol{t})=\varphi_0\,sin(\omega\boldsymbol{t})+\varphi_i\ ,$$

где φ_0 – амплитуда колебания;

$\varphi_{\boldsymbol{н}}$ – начальное значение угла поворота нижнего основания относительно верхнего (в момент времени $\boldsymbol{t}$=0).

Причем круговая (циклическая) частота колебаний ω будет определяться только значениями модуля кручения и момента инерции колеблющегося тела (в нашем случае нижнего основания) относительно оси вращения:

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{J}}.$$

Соответственно период колебаний:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D}}. \qquad (16)$$

Следовательно, измерив период колебаний системы, мы сможем определить момент инерции колеблющегося тела относительно оси подвеса:

$$J = \frac{T^2 D}{4\pi^2} = T^2 mg \cdot \frac{\sqrt{2\xi Rr}}{4\pi^3}. \qquad (17)$$

Искомый момент инерции определяется квадратом периода колебания, массой тела, ускорением свободного падения и некоторым коэффициентом ξ_n, зависящим только от геометрических параметров подвеса:

$$J = T^2 mg \cdot \xi_i, \text{ где } \xi_i = \frac{\sqrt{2\xi Rr}}{4\pi^3}$$

Или с учетом (12):

$$\xi_i = \frac{Rr}{2\pi^3\sqrt{l^2 - \left(R^2 + r^2\right)}}. \qquad (18)$$

Таким образом, выбрав оптимальные соотношения между длиной подвеса и радиусами его платформ, мы получим колебательную систему изохронную в широком диапазоне углов.

Аналогичным образом можно оптимизировать параметры любого мультифилярного подвеса, существенно повысив изохронность его колебаний.

Оптимизированный мультифилярный подвес позволит существенно повысить точность измерения моментов инерции, при значительно меньшей длине подвеса.

Библиографический список

1. Гернет, М.М. Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобыльский. – М.: Машиностроение, 1969. – 247 с.

2. Берман, Г.Н. Циклоида / Г.Н. Берман. – М.: Наука, 1980. – 112 с.

3. Гиндикин, С.Г. Рассказы о физиках и математиках / С.Г. Гиндикин. – 4-е изд., исправ. – М.: МЦНМО, 2006. – 464 с.

4 Физический практикум / под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Физматгиз, 1962. – 956 с.

5. Руководство к лабораторным занятиям по физике / под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1973. – 688 с.

К содержанию

УДК 691.002.5 + 725.4.011

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭКСТЕРЬЕРА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Г.С. Семеняк, Н.Е. Крупнова

В статье освещены материалы наружных ограждающих конструкций, наиболее используемые при проектировании и строительстве современных промышленных зданий и сооружений.

Ключевые слова: двухслойная стеновая панель, силикатный кирпич, пеноблок, наружные ограждающие конструкции.

При проектировании современных промышленных объектов применяется довольно обширное и разнообразное количество строительных материалов, используемых в качестве основных компонентов для ограждающих и несущих конструкций зданий и сооружений.

Основное назначение ограждающих конструкций – защита помещений от температурных воздействий, ветра, влаги, шума, радиации и т.п. Типологически ограждающие конструкции разделяют на: внешние (или наружные) и внутренние. Наружные служат главным образом для защиты от атмосферных воздействий, внутренние – в основном для разделения внутреннего пространства здания и звукоизоляции.

Материалы наружных ограждающих конструкций промышленных зданий и сооружений делятся на: штучные (кирпич и его разновидности), пеноблоки, панели.

На сегодняшний день в современном строительстве используются два основных вида кирпича: керамический и силикатный. Каждый из этих видов имеет свои преимущества и недостатки.

Силикатный кирпич – группа материалов автоклавного синтеза. Силикатный кирпич готовится методом полусухого прессования из смеси кварцевого песка, воздушной извести и воды. Отформованный кирпич подвергается автоклавной обработке – воздействию насыщенного водяного пара при температурах 140…200 °С и давлении пара 8…12 атм.

Следует отметить, что силикатный кирпич имеет достаточно много недостатков, главный из которых – неводостойкость; основные недостатки отмечены в табл. 1.

Керамический кирпич обычно применяется для возведения несущих и самонесущих стен и перегородок, одноэтажных и многоэтажных зданий и сооружений, внутренних перегородок, заполнения пустот в монолитно-бетонных конструкциях, кладки фундаментов, внутренней части дымовых труб, промышленных и бытовых печей. Стоит разделить преимущества рядового (строительного) и лицевого кирпича. Лицевой кирпич применяется практически во всех областях строительства и готовится по специальной технологии, которая придает ему массу преимуществ. Лицевой кирпич должен быть не только красивым, но и надежным.

Таблица 1

Преимущества и недостатки силикатного кирпича

Преимущества	
Экологичность	Изготовлен из экологически чистого натурального сырья. Отвечает самым высоким экологическим требованиям и международным стандартам ISO
Звукоизоляция	Применяют для кладки стен и столбов в гражданском и промышленном строительстве
Морозостойкость и прочность	По прочности (25 МПа и выше) и морозостойкости значительно превосходит легкие бетоны
Неприхотливость	Строения из силикатного кирпича неприхотливы и устойчивы к внешним факторам. Фасады сохраняют цвет и не требуют дополнительного ухода
Недостатки	
Пониженная водостойкость и жаростойкость	Силикатный кирпич нельзя использовать в конструкциях, подвергающихся воздействию воды (фундаменты, канализационные колодцы) и высоких температур (печи, дымовые трубы)

Пеноблок (конструктивный пенобетон) – строительный материал, производимый по технологии ячеистых бетонов. Он, наряду с высокими тепло- и звукоизоляционными свойствами, имеет низкие коэффициенты усадки и водопоглощения, обладает высокой пожароустойчивостью и устойчивостью к переменному замораживанию, оттаиванию. Основные свойства пеноблоков приведены в табл. 2.

Однослойные панели изготовляют из однородного малотеплопроводного материала (легкого или ячеистого бетона), класс прочности которого должен соответствовать воспринимаемым нагрузкам, а толщина, кроме того, учитывать климатические условия района строительства. Панель армируется стальным сварным каркасом и сеткой. С наружной стороны панели имеют защитный слой из тяжелого бетона толщиной 20…40 мм или декоративного плотного бетона (для защиты от атмосферных влияний) и с внутренней стороны – отделочный слой из цементного или известково-цементного раствора толщиной 10…15 мм. Эти панели применяют для зданий с поперечными несущими стенами, а наружные стеновые панели являются самонесущими. Торцевые стены состоят из двух панелей: внутренней несущей (из железобетона) и наружной самонесущей (из ячеистого бетона). Однослойные панели имеют простые конструктивные решения и технологию изготовления.

Двухслойные панели состоят из несущего слоя из плотного легкого или тяжелого бетона класса В10…В15 плотностью более 1000 кг/м^3 и утепляющего слоя из теплоизоляционного легкого или ячеистого бетона или

жестких термоизоляционных плит. Толщина несущего слоя для стеновых панелей должна быть не менее 60 мм, и располагают его с внутренней стороны помещения, чтобы он одновременно являлся и пароизоляционным.

Таблица 2

Преимущества и недостатки пеноблоков

Преимущества пеноблоков	
Огнестойкость	Не горит и не поддерживает горения. Соединения, образующиеся при нагревании пеноблоков, до очень высоких температур не являются токсичным: сам бок способен сопротивляться открытому пламени до 8 часов
Влаго- и морозостойкость	При его производстве все поры, которые есть в материале, выходят закрытыми. Таким образом, вода не попадает во внутренние поры. Обеспечивается отменная влагостойкость. Стены, сделанные из пенобетона, не вымерзают
Долговечность	Очень долговечный материал. Со временем все его показатели только улучшаются за счет внутреннего созревания
Звукоизоляция	Акустические свойства пенобетона заключаются в том, что звук поглощается и не отражается. Пенобетонные блоки идеально поглощают низкие частоты шума
Прочность	Прочность при сжатии: 3,5…5,0 МПа
Недостатки пеноблоков	
Теплопроводность	Теплопроводность пеноблоков в 3…4 раза ниже керамических кирпичей из-за мелких пор, заполненных воздухом
Низкая плотность	Плотность пеноблоков в зависимости от марки составляет от 400 до 1600 кг/м^3, что в 2…4 раза меньше плотности керамзитобетона

При отсутствии заполнителя, пригодного для получения легкого бетона весом менее 1000 кг/м3, можно применять двухслойные панели, несущий слой которых состоит из плотного легкого или тяжелого бетона марки 150…200 с объемным весом более 1000 кг/м3, и утепляющий слой из теплоизоляционного легкого или ячеистого бетона или жестких термоизоляционных плит.

Двухслойные панели (рис. 1), однослойные и двухслойные блоки (с внутренним слоем из тяжелого бетона) применяются, как правило, для влажного и мокрого температурно-влажностного режимов.

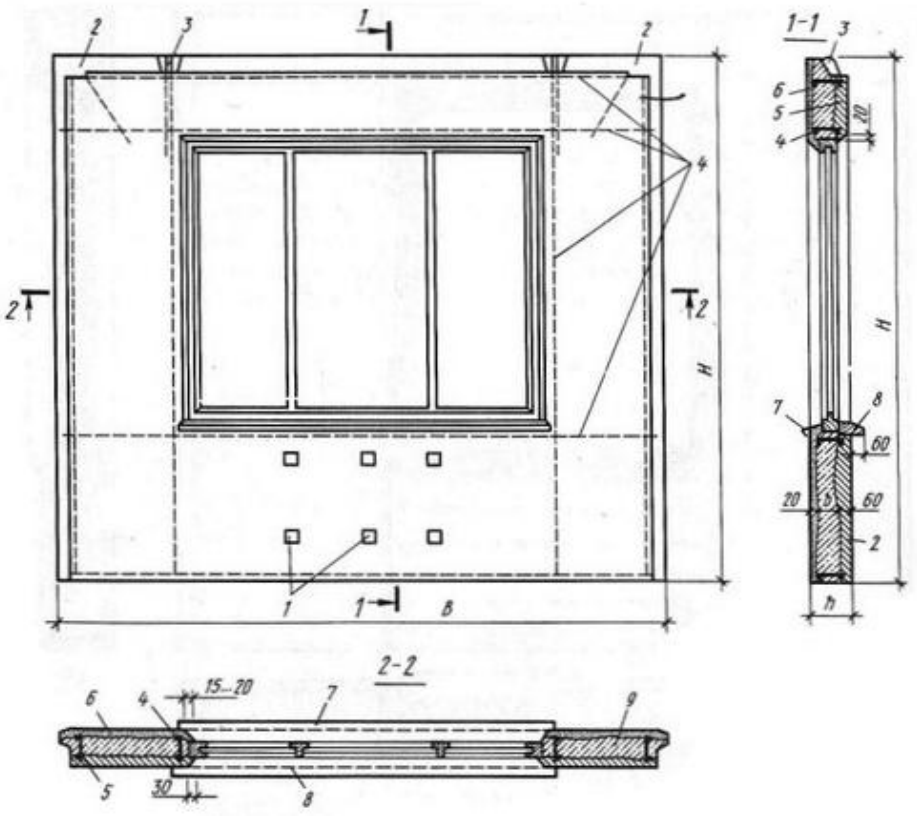


Рис. 1. Двухслойная стеновая панель из легкого бетона:
1 – закладные детали для крепления радиаторов; 2 – закладные детали;
3 – монтажные петли; 4 – каркас; 5 – несущий слой; 6 – отделочный слой;
7 – слив; 8 – подоконная плита; 9 – крупнопористый (теплоизоляционный) слой

Трехслойные панели состоят из двух железобетонных плит и эффективного теплоизоляционного слоя (утеплителя), укладываемого между ними (рис. 2) . В качестве утеплителя применяют полужесткие минераловатные плиты, минеральную пробку, цементный фибролит, асбестоцементные плиты, минераловатные маты на фенольной связке, маты из стекловолокна, а также жесткие утеплители – пеностекло, пеносиликат и др.

Трехслойные ребристые панели (рис. 3) применяют для устройства стен неотапливаемых каркасных промышленных зданий с шагом пристенных колонн 6 и 12 м. Панели изготовляют в виде железобетонных плит длиной 6 и 12 м, высотой 1,2 и 1,8 м. Панели длиной 6 м имеют сетку ребер одинаковой высоты – 120 мм и полку между ребрами толщиной 30 мм. При ширине 1,2 и 1,8 м панели различаются количеством продольных ребер.

Панели длиной 12 м имеют по контуру ребра высотой 300 мм и пять промежуточных поперечных ребер меньшей высоты. Полка панели между ребрами имеет толщину 30 мм. Такие панели изготовляют с предварительным напряжением продольных ребер, а поперечные ребра и полку панели армируют плоскими сварными каркасами и сетками. Панели длиной 6 м полностью армируют плоскими сварными каркасами и сетками.

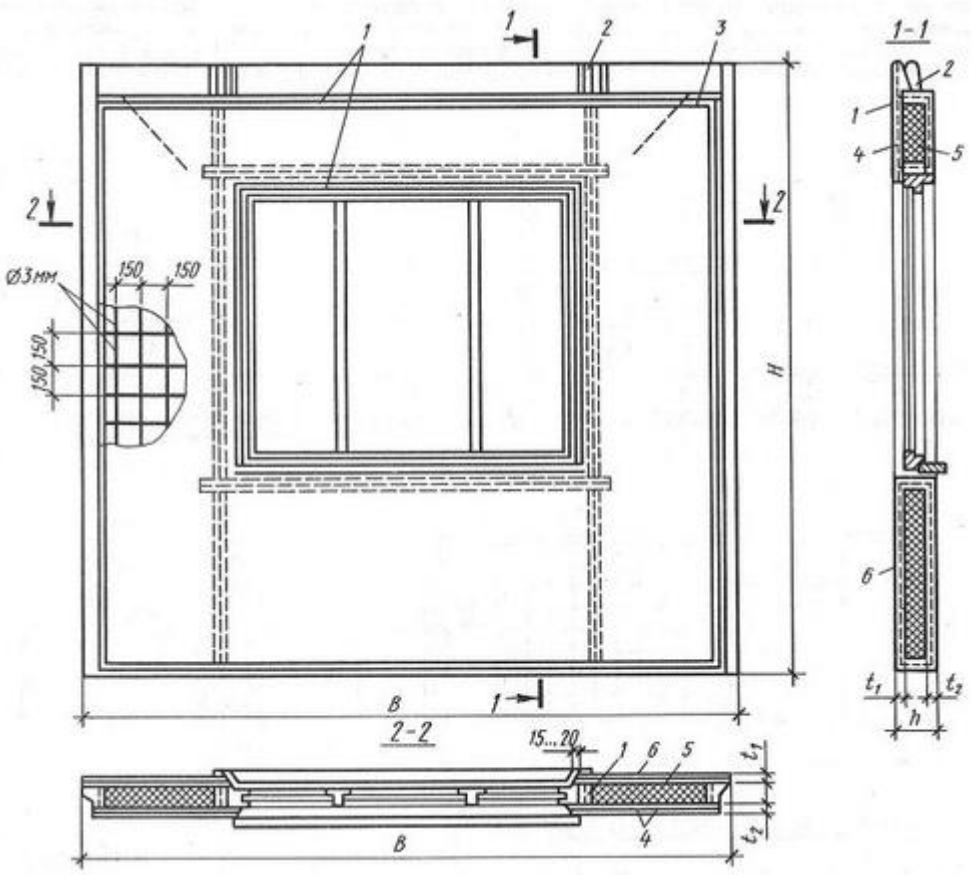


Рис. 2. Трехслойная стеновая панель: 1 – сварные крытые бетоном; 2 – монтажные петли; 3 – закладные детали; 4 – арматурные сетки; 5 – утеплитель; 6 – тяжелый бетон

Трехслойные ребристые панели (неутепленные) применяют только в ненесущих стенах с ленточными проемами. Материал для их изготовления, армирование, заполнение швов между панелями при их монтаже в основном такие же, как и в утепленных трехслойных железобетонных панелях.

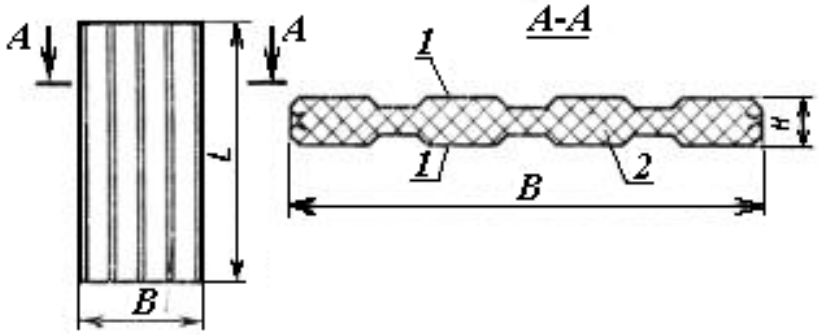


Рис. 3. Трехслойная ребристая панель:1 – металлические профилированные листы; 2 – сварной каркас

Многослойные стеновые панели (сэндвич-панели) – строительный материал, имеющий трехслойную (или более трех слоев) структуру, состоящую из двух листов жёсткого материала (металл, ПВХ, ДВП, магнезитовая плита) и слоя утеплителя между ними. Все детали сэндвич-панелей склеиваются между собой с помощью горячего или холодного прессования. Наружные слои сэндвич-панелей изготовляются из оцинкованного металла с нанесением дополнительного покрытия, который во многом объясняет свойства конечного продукта. Основные материалы, используемые в качестве покрытия для панелей типа сэндвич: оцинкованная сталь, алюкоцинк, гипсокартон, полиэстер и др. При выборе цвета учитывается его способность к светопоглощению (светоотражению), так как в совокупности с характеристиками окружающей среды это условие будет во многом предопределять общий срок службы постройки. В качестве утеплителя используется минеральная вата (базальтовое волокно), пенополиуретан, пенополистирол и стекловолокно (рис. 4–8). К сожалению, у сэндвич-панелей кроме преимуществ существуют и определенные недостатки (табл. 3).

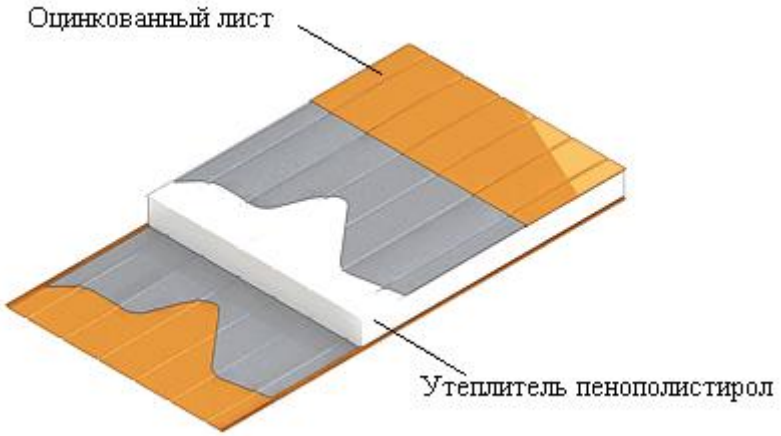


Рис. 4. Конструктивный разрез сэндвич-панели

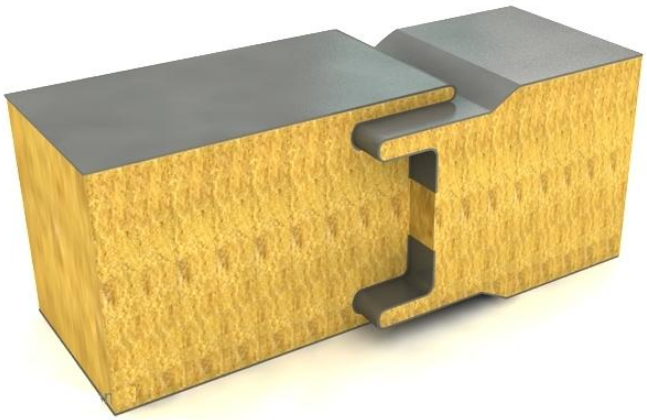


Рис. 5. Сэндвич-панели с двойным замком
и открытым сквозным креплением.

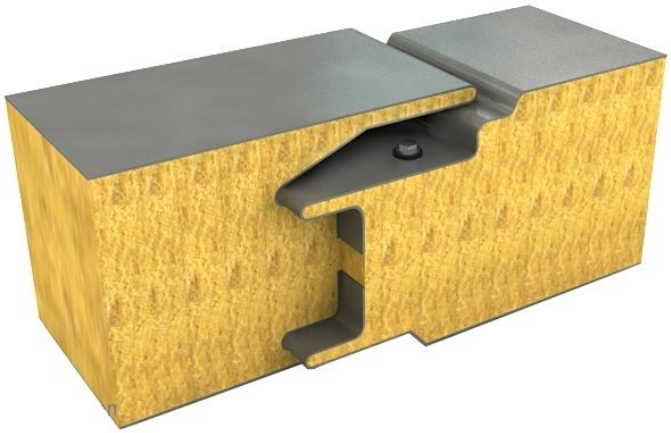


Рис. 6. Сэндвич-панели с двойным замком
и скрытым сквозным креплением

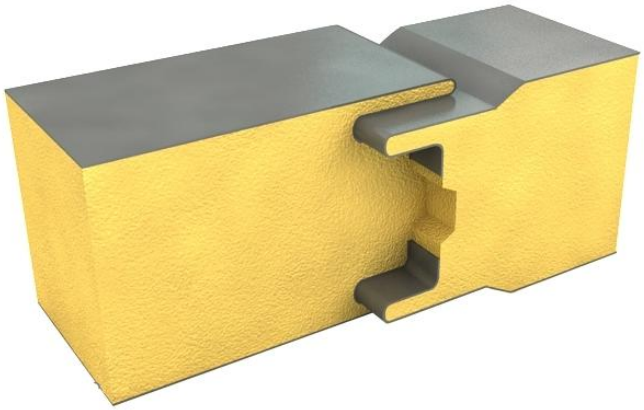


Рис. 7. Сэндвич-панели из пенополиуретана с двойным замком
и пазогребневым соединением «шип-паз»

Рис. 8. Сэндвич-панели трапециевидной формы
и сквозным креплением.

Таблица 3

Преимущества и недостатки сэндвич-панелей

Преимущества сэндвич-панелей	
Теплоизоляция	Высокие показатели теплоизоляции.
Экологичность	Экологичность, гигиеничность, безопасность для человека. Возможность использования в сфере пищевой промышленности и мед. учреждениях
Звукоизоляция	Высокая звукоизоляция
Химическая и биологическая стойкость	Отсутствие реакции на воздействие агрессивных химически веществ или биологических факторов (плесень, грибок)
Удобство монтажа и транспортировки	Быстрые сроки возведения или ремонта зданий. Лёгкость транспортировки
Недостатки сэндвич-панелей	
Низкая прочность	Не выдерживают существенную дополнительную нагрузку
Возможность повреждений	Высокая вероятность косметического повреждения

Библиографический список

1. Семеняк, Г.С. Современные строительные материалы и изделия: учеб. пособ. / Г.С. Семеняк. – Челябинск, 2010. – 111 с.

2. Киреева, Ю.И. Современные строительные материалы и изделия: Учеб. пособие для ВУЗов / Ю.И. Киреева. – Ростов н/Д.: Феникс, 2010. – 245 с.

3. Рыбьев, И.А. Материаловедение в строительстве: Учеб. пособие для ВУЗов / И.А. Рыбьев. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 528 с.

К содержанию

УДК 543.55

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА КАК ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИНФОРМАЦИИ

С.В. Соколков

Рассмотрены основные метрологические характеристики электрохимических датчиков. Обращено внимание на собственные шумы сенсора, вызванные электромеханической неустойчивостью двойного электрического слоя. Описан квазиравновесный метод измерения, сочетающий низкий уровень шумов с высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном. Представлены экспериментальные результаты, полученные на модельных водных растворах, содержащих ионы меди, свинца и кадмия, а также 3D-хроматограммы модельной пробы гидразина и его производных, полученные с помощью одноканального электрохимического детектора собственной разработки.

Ключевые слова: электрохимический анализ, датчик, шумы, информативность, чувствительность, хроматограф.

Аналитическая химия – это измерительный арсенал современной химии, в котором достойное место занимают электроаналитические методы анализа, что обусловлено спецификой множественных электрохимических реакций проходящих на границе твердофазный электрод-раствор. Использование биохимических реакций значительно расширило возможности электроаналитических методов в биологии, медицине и экологическом контроле. Это вполне ожидаемый результат, поскольку большинство биологически значимых веществ проявляют электрохимическую активность.

К сожалению, аналитические возможности электрохимии в данных областях использованы пока не в полной мере. Исключение составляют портативные электрохимические глюкометры, которые практически вытеснили с рынка приборы, работающие на других принципах, что явилось результатом больших финансовых вложений крупных корпораций в данное направление.

С позиций измерительной техники электрохимическая ячейка – датчик или первичный преобразователь (ПП), в котором происходят сложные физико-химические процессы, зависящие от большого числа параметров. Не вдаваясь в механизмы этих процессов, рассмотрим основные характеристики такого первичного преобразователя.

Важнейшей характеристикой является конверсионная эффективность электрохимической ячейки, определяемая долей искомого компонента, участвующего в формировании аналитического сигнала. Конверсионная эффективность при прочих равных условиях пропорциональна отношению объема диффузионного слоя к объему ячейки. Однако простое увеличение площади поверхности рабочего электрода, повышающее конверсионную

эффективность, не дает результата, поскольку приводит к уменьшению отношения сигнал/шум. Инновационный подход – использование предварительного электрохимического концентрирования [1], позволил значительно поднять конверсионную эффективность и создать новый высокочувствительный метод электрохимического анализа – инверсионную вольтамперометрию, которая имеет предельно высокую чувствительностью к значительному числу электроактивных частиц.

Метрологические возможности любого преобразователя характеризует объем информации, получаемой в измерении. Объем информации в основном определяется разрешающей способностью ПП и числом независимых измерений, а разрешающая способность в свою очередь – чувствительностью, зависящей от коэффициента конверсионной эффективности ячейки и уровня шума на выходе преобразователя. Зачастую оптимизация этих параметров требует противоположных действий. Например, увеличение площади рабочего электрода повышает конверсионную эффективность, но ухудшает отношение сигнал/шум. Электрохимики давно нашли изящный выход из этой ситуации – фрагментирование поверхности рабочего электрода (ультрамикроэлектроды). Инновационным решением в создании рабочего электрода с конверсионной эффективностью близкой к 100 % и низким уровнем шумов явилась разработка углеродного материала с ориентированными субмикронными каналами [2]. Кулонометрические проточные ячейки, с таким рабочим электродом широко используются в современной жидкостной хроматографии, а несколько ячеек с различными потенциалами рабочего электрода, включенных последовательно в гидравлический тракт хроматографа, позволяют получать трехмерные хроматограммы [3], что значительно повышает информативность аналитического сигнала.

Шумы преобразователя обусловлены как физико-химическими процессами в элементах ячейки, так и электроникой управления. Природа шумов самой ячейки недостаточно исследована. Множество процессов и факторов влияет на уровень шума. Одним из малоизученных факторов является электромеханическая неустойчивость двойного слоя, хотя простейшая физическая модель двойного слоя – «упругий конденсатор» указывает на неустойчивость такой системы [4]. Теоретические работы по неустойчивости липидных мембран и двойных электрических слоев также показывают, что при так называемом φ-управлении возникает неустойчивость системы, в то время как при q-управлении таких проблем не бывает [5]. Таким образом, электромеханическая неустойчивость присуща только электрохимическим ячейкам в потенциостатическом режиме, который наиболее широко используется в современных приборах.

Автором с коллегами разработаны два способа электрохимического анализа раствора [6, 7], использующие гальваностатический режим ячейки с инверсией тока.

В анализаторе воды на тяжелые металлы АСК-2000 [8] реализован сканирующий кулонометрический режим с высокой конверсионной эффективностью ячейки и предельно низким уровнем собственных шумов. Потенциостатический режим используется только для электрохимического концентрирования определяемых металлов на рабочем электроде. Затем запускается циклический процесс с инверсией заданного тока в узком диапазоне потенциалов рабочего электрода (10-50 мВ) в окрестности заданного значения потенциала до установления равновесия. Фиксируется последовательность временных интервалов, соответствующих моментам достижения граничных значений потенциала. Далее процесс повторяется при следующем значении потенциала рабочего электрода.

Фактически, существенно неравновесный режим измерения, традиционно используемый в инверсионной вольтамперометрии, заменен последовательностью малых периодических изменений потенциала рабочего электрода. Процесс продолжается до установления некоторого динамического равновесия. Следовательно, такой метод можно назвать квазиравновесным.

Полученный аналитический сигнал не требует никакой фильтрации. Математическая обработка заключается только в вычитании установившегося значения интервала времени для каждого из значений потенциалов рабочего электрода. Результатом измерения являются матрицы фарадеевских зарядов для анодного (рис. 1) и катодного процесса.

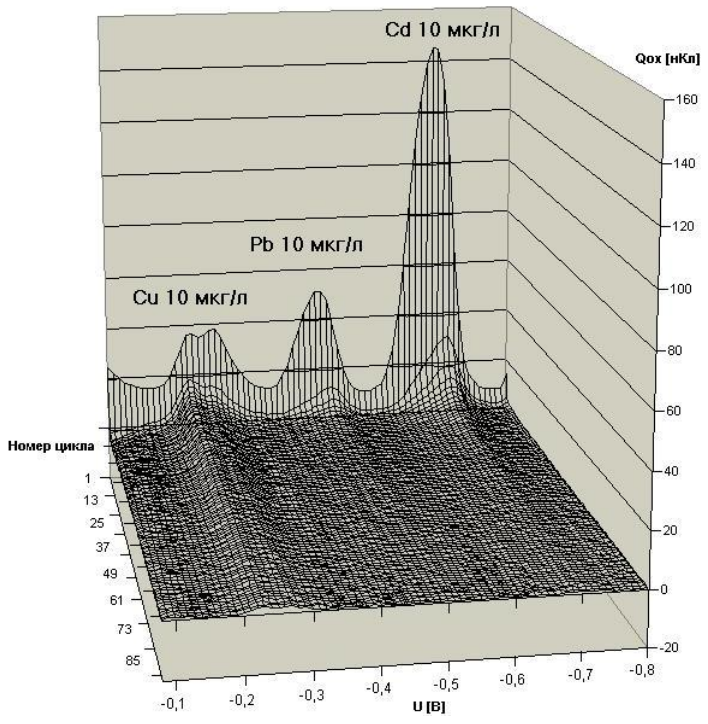


Рис. 1. Матрица фарадеевских зарядов (нКл) для анодного процесса. Модельная проба объемом 0,25 мл. Потенциал рабочего электрода (В) относительно хлорид-серебряного электрода сравнения. Буфер ацетатный

Получены экспериментальные результаты на модельных водных растворах, содержащих ионы меди, свинца и кадмия. Порог обнаружения по указанным металлам определяется инструментальной погрешностью измерительного блока, которая для анализатора не превышает 1 нКл.

В анализаторе используется трехэлектродная планарная одноразовая электрохимическая ячейка (рис. 2), емкостью 0,25 мл. Ввод пробы в ячейку осуществляется шприцем. В ячейку вмонтирована миниатюрная магнитная мешалка, которая включается в режиме накопления.

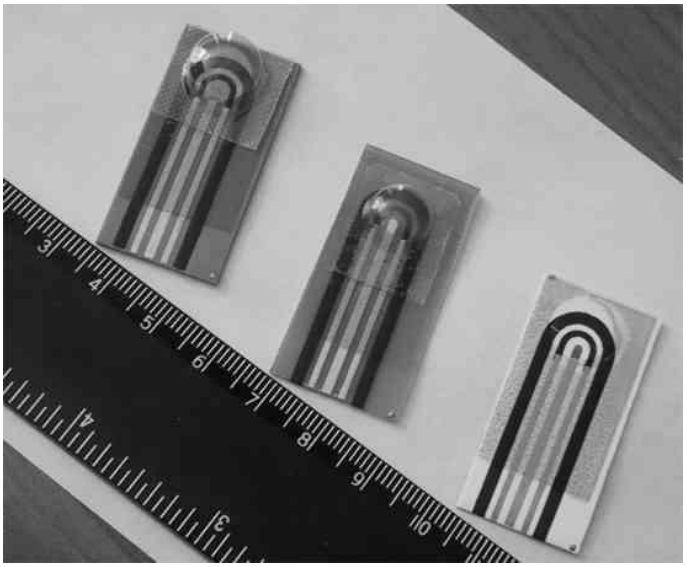


Рис. 2. Электрохимические ячейки, изготовленные
на подложках из ситалла, стеклотекстолита и электрокерамики

Один из способов повышения селективности анализа заключается в сепарации пробы. Сепарация может осуществляться хроматографическими или электрокинетическими методами.

Применение подобной технологии в электрохимическом детекторе для систем ВЭЖХ позволяет надежно выявлять перекрывающиеся пики, а также идентифицировать компоненты пробы не только по времени их удержания в колонке, но и по «электрохимическому образу» пробы, который представляет собой динамически изменяющуюся зависимость дифференциальной емкости двойного электрического слоя от потенциала рабочего электрода [8].

Технология дает исследователю возможность получать хроматограмму не в виде одной кривой, а в виде нескольких кривых, привязанных к различным значениям потенциала. Фактически одноканальным детектором регистрируется 3D-хроматограмма (рис. 3, 4), которую можно получить только с многоканальным детектором [3]. Притом, что в формировании аналитического сигнала одновременно участвуют и катодный и анодный процессы, происходящие на рабочем электроде.

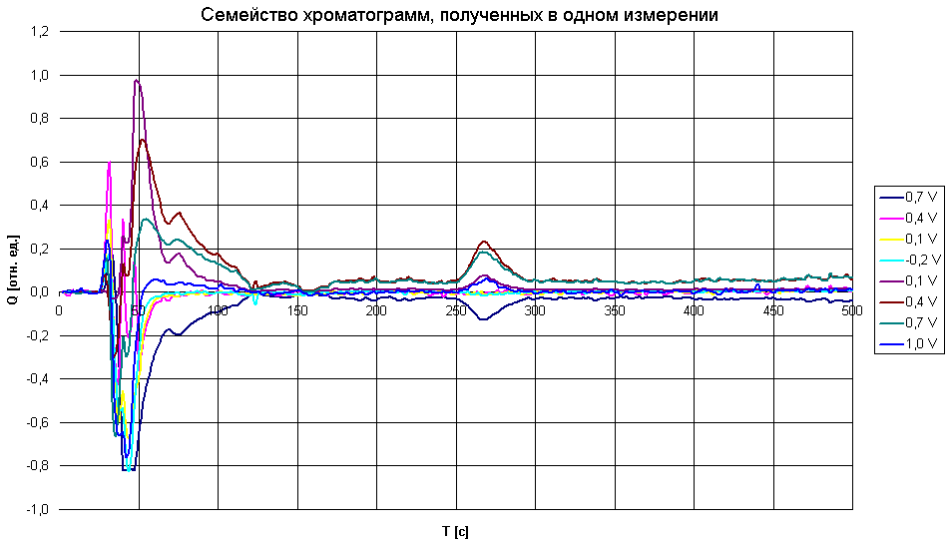


Рис. 3. Хроматограмма модельной пробы водного раствора N_2H_4 (5,1 мкг/л), $CH_3NH\text{-}NH$ (16,0 мкг/л), $(CH_3)_2N\text{-}NH_2$ (40,0 мкг/л). Элюент – ацетат аммония. Скорость элюента - 1 мл/мин. Аналитический центр Химического факультета МГУ

Отличие разработанной технологии в том, что она позволяет произвольно изменять количество таких «виртуальных каналов». В зависимости от целей исследования можно достичь максимальной чувствительности, снижая количество каналов, либо – максимальной селективности, увеличивая количество каналов. В пределе аналитический сигнал представляет собой трехмерную поверхность в координатах время - фарадеевский заряд - потенциал рабочего электрода.

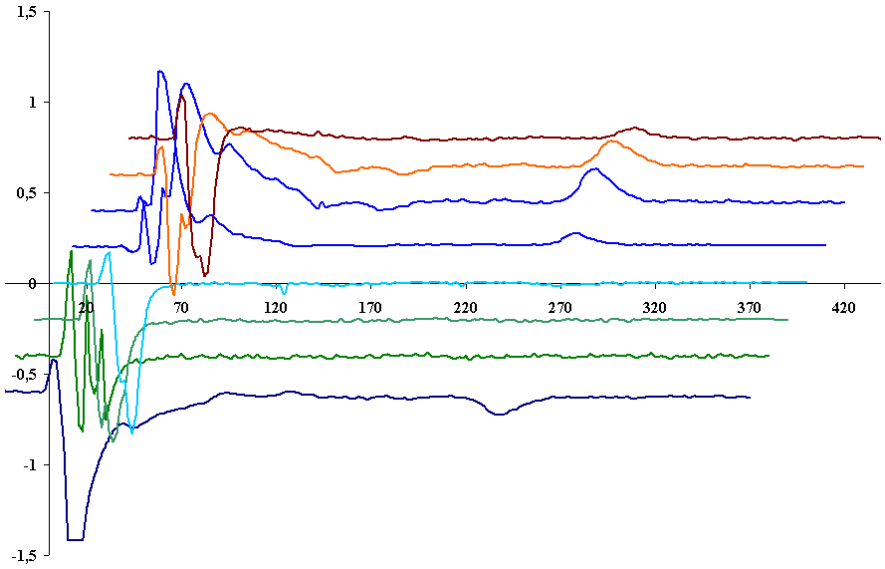


Рис. 4. Та же хроматограмма, представленная в виде, принятом в работе [3]

В настоящее время автором изготовлен действующий макет проточного электрохимического детектора, который имеет абсолютную инструментальную погрешность измерения аналитического сигнала не более 0,1 нКл, что для одноэлектронной электрохимической реакции соответствует 10^{-15} моль вещества.

Также проработаны несколько конструкция проточной электрохимической ячейки с блоком электрокинетической сепарации пробы.

Конструкция ячейки выглядит настолько простой, что можно изготавливать ее как расходный материал, т.е. одноразовой. В перспективе исследователь при проведении анализа будет подключать к хроматографу одноразовый картридж (колонку + сенсор электрохимического детектора). Можно использовать планарную хроматографию с ее недорогими материалами. А если применить электрокинетический метод разделения пробы (электрофорез или электрохроматографию), то одноразовый картридж и станет основой самого хроматографа. Функции управления таким хроматографом возьмет на себя современный портативный компьютер.

Такие анализаторы будут востребованы в мобильной и домашней медицине, экологии, в учебном процессе.

Библиографический список

1. Nicholson, M.M., J. Am. Chem. Soc. 79, 7 (1957).

2. W.R. Matson, US Patent #5104639, 14.03.1992.

3. Svendsen, C.N., Multielectrode Array Detectors in HPLC – a New Dimension in Electrochemical Analysis**,** ANALYST 118 (2): 123-129 FEB 1993.

4. Crowley, J.M. Electrical Breakdown of Bimolecular Lipid Membranes, Biophysical Journal v. 13, 1973.

5. Negative capacitance and related instabilities in theoretical models of the electric double layer and membrane capacitors, M.B. Partenskii and P.C. Jordan, Dep. of Chemistry, MS-015, Brandeis University, Waltham, MA, USA, February 2, 2008. – URL: http://arxiv.org/abs/physics/0412183v5.

6. Загороднюк, П.Н. Способ электрохимического анализа. Патент РФ №2199734 от 27.02.2003 г., приоритет 04.12.2000 г. (PCT WO 02/46736 A1 от 13.06.2002) / П.Н. Загороднюк, А.Н. Карженков, С.В. Соколков, А.В. Сырский.

7. Соколков, С.В. Способ электрохимического анализа. Патент РФ №2382354 от 20.02.2010 г., приоритет 20.09.2005 г. (PCT WO 2007/035130 A1 от 29.03.2007) / С.В. Соколков.

8. Соколков, С.В. Портативные электрохимические анализаторы / С.В. Соколков, П.Н. Загороднюк // Российский Химический Журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И Менделеева). – 2001. – Т. XLV. – № 5–6. – С. 78.

К содержанию

ФИЛИАЛ В г. УСТЬ-КАТАВ

УДК 621.731 + 621.731.31

ТЕХНОЛОГИЯ ВЫТЯЖКИ ДЕТАЛЕЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ГОФРО- И КОНУСООБРАЗОВАНИЕМ ФЛАНЦА ЛИСТОВОЙ ЗАГОТОВКИ

Ю.Б. Колесов, В.Г. Некрутов, П.С. Мальцев

В данной статье представлены результаты разработки процесса вытяжки полых изделий из листовой заготовки с управляемым гофрообразованием. Это обеспечивает по сравнению с известным способом вытяжки повышение качества деталей. Кроме того, с помощью одновременного управления гофро- и конусообразованием расширяется диапазон использования способа вытяжки благодаря достижению высокой геометрической точности изготовления тонкостенных деталей с куполообразной донной частью.

Ключевые слова: гофро- и конусообразование, вытяжка.

Работа [1] касается обработки металлов давлением и относится к способам вытяжки полых изделий из листовой заготовки.

Цель работы является повышение качества путем предотвращения образования следов от гофров на стенке готового изделия.

Кроме образования гофров на фланце, при вытяжке может возникнуть еще один вид нарушения плоскостности – конусообразование. При этом поворот фланца происходит под действием изгибающего момента, возникающего при контакте фланце со скругленной частью матрицы. Наличие конусообразования в процессе вытяжки отмечено в работах [2–5]. Установлено, что оно способствует ухудшению устойчивости фланца против гофрообразования, так как уменьшается поверхность контакта с прижимом.

На рис. 1 изображены схемы вытяжки полых изделий из листовой заготовки.

Устройство для реализации способа содержит соосно установленные пуансон 1 и матрицу 2 с коническим «зеркалом», а также установленный коаксиально пуансону 1 прижим 3 с конической рабочей поверхностью. Позицией 4 обозначена обрабатываемая заготовка [6].

Способ осуществляется следующим образов. Плоскую листовую заготовку 4 помещают между матрицей 2 и прижимом 3 (рис. 1а). Прижим 3 подводят и прижимают к матрице 2 (рис. 1б). При этом на периферийной части заготовки формируют конус на угол α_k рассчитываемый по формуле (1):

$$\alpha_k = \frac{39{,}8677tn(2-n)}{r(R_0/r)^{2-n}}, \qquad (1)$$

где n – показатель степени уравнения степенной аппроксимации кривой упрочнения материала; t – толщина заготовки; r – радиус вытягиваемого изделия; R_0 – радиус заготовки.

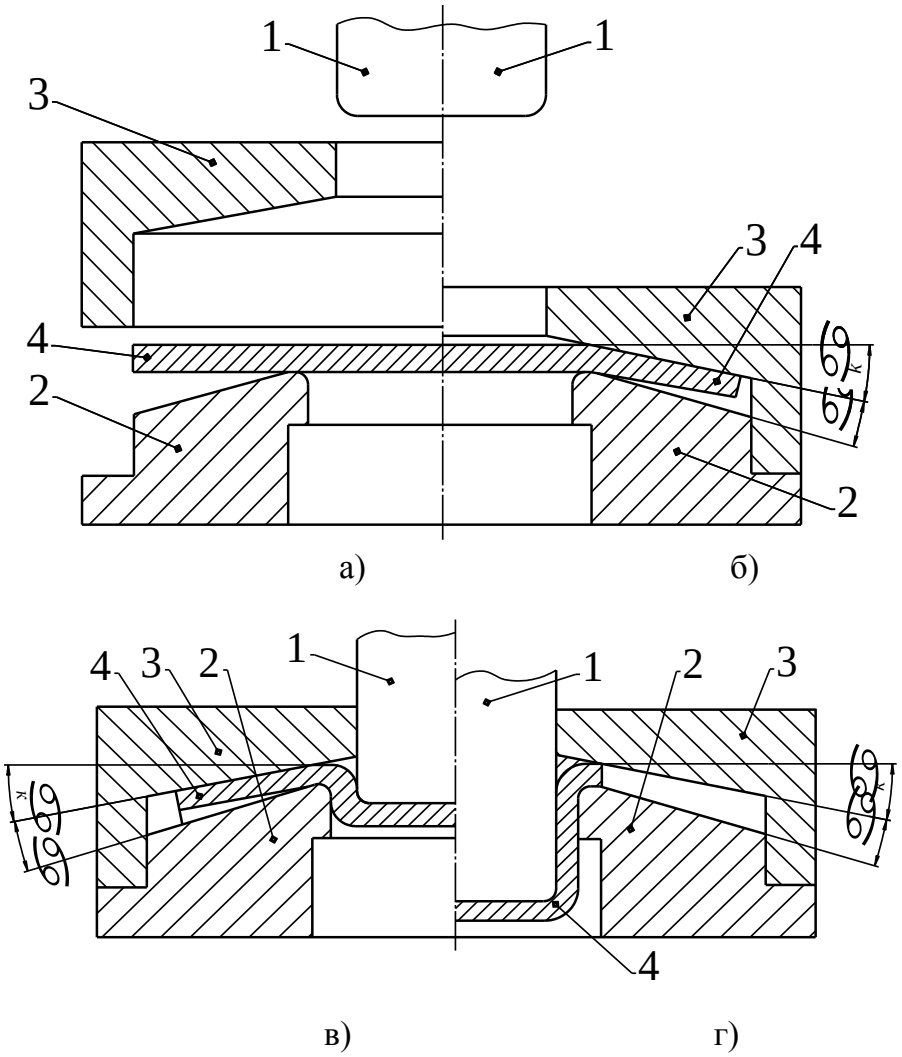


Рис. 1. Схемы вытяжки полых изделий из листовой заготовки:
а – заготовка в исходном положении; б – образование конуса
на фланце заготовки перед началом вытяжки; в – образование гофров
на фланце заготовки в начале вытяжки; г – заключительный момент
вытяжки; 1 – пуансон; 2 – матрицы; 3 – прижим; 4 – заготовка

Периферийная часть заготовки 4 после формирования конуса находится в сужающейся полости между зеркалом матрицы 2 и прижимом 3.

На центральную часть заготовки 4 воздействуют усилием деформация со стороны пуансона 1 до образования не ее периферийной части конических радиальных гофров с увеличивающейся к периферии высотой, при этом высоту гофров ограничивают (рис. 1в). Радиальный профиль образованных гофров соответствует углу α между «зеркалом» матрицы 2 и прижимом 3, определяемому выражением (2):

$$\alpha = \frac{1{,}7552tn}{\left(1-\frac{r}{R_0}\right)\sqrt{rR_0}}, \qquad (2)$$

где n – показатель степени уравнения степенной аппроксимации кривой упрочнения материала заготовки; t – толщина заготовки; r – радиус вытягиваемого изделия; R_0 – радиус заготовки.

После образования устойчивых гофров при дальнейшем ходе пуансона 1 осуществляют вытяжку заготовки 4 с выпрямлением этих гофров в сужающейся полости. В конце процесса вытяжки гофры, расположенной в наружной кромки фланца, выпрямляются в самой узкой части сужающейся полости (рис. 1г). Затем отводят пуансон 1 прижим 3 и извлекают изделие.

Величина угла α_k отгибания периферийной части заготовки при формировании конуса зависит от толщины t материала заготовки 4, радиуса R заготовки 4, радиуса r готового изделия и показателя упрочнения n. Величина угла α_k найдена из условия отсутствия отклонений от конической формы в процессе формирования конуса, что исключает искажения периферийной части заготовки в сужающейся полости до воздействия усилием деформации на центральной части заготовки. Это обеспечивает равномерное распределение по периферийной части радиальных конических гофров при воздействии на центральную часть заготовки усилием деформирования. Направление отгибания периферийной части при формировании конуса найдено из условия полного выпрямления гофров и предотвращения переходом гофров на стенку изделия.

Использование предлагаемого способа вытяжки по сравнению и известными изделиями повышение качества изделия и сокращения брака на 85–95 % в результате отсутствия следов от гофров на стенках изделий. Кроме того, расширяется диапазон использования способа вытяжки за счёт достигаемой высокой геометрической тонкости для изготовления тонкостенных деталей с куполообразной донной частью.

Библиографический список

1. Колесов, Ю.Б. Штамповка днищ с управляемым конусообразованием / Ю.Б. Колесов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1993. – № 2. – С. 33–34.

2. Недорезов, В.Е. Глубокая вытяжка листового металла / В.Е. Недорезов. – М.-Л: Машгиз, 1949. – 104 с.

3. Ганелин, И.Н. Особенности условий устойчивости фланца при вытяжке с подогревом и эффективность переменного прижима заготовки / И.Н. Ганелин // Тр. МАТИ. Вып. 29. – 1956. – С. 38–61.

4. Бебрис, А.А. Устойчивость заготовки в формообразующих операциях листовой штамповки / А.А. Бебрис. – Рига: Зинатне, 1978. – 127 с.

5. Катков, Н.П. Основные вопросы теории и проектирования исполнительных механизмов кривошипных прессов двойного действия: дис. …. д-ра техн. наук / Н.П. Катков. – Челябинск, 1982. – 245 с.

6. А.с. 1303221 СССР, МКИ В 21 D 22/20. Способ вытяжки полых изделий из листовой заготовки / Ю.Б. Колесов.

К содержанию

УДК 621.3.076

СПОСОБЫ ВЕКТОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ИСТОЧНИКА ТОКА

В.И. Сафонов, В.Д. Константинов

Рассмотрено несколько способов векторного регулирования параметрического источника тока. В каждом варианте выполнена оценка мощности дополнительного источника, необходимого для поддержания тока активной нагрузки при изменении напряжения сети. Показано, что введение регулирующих источников в ветви с реактивными элементами позволяют более эффективно и позволяет осуществить регулирование только за счет перераспределения реактивной мощности между элементами схемы.

Ключевые слова: векторное регулирование, параметрический источник тока.

Параметрические источники тока (ПИТ) используются в системах электроснабжения многих технологических установок [1], таких как электролизные установки, дуговые вакуумные печи и т.д., в которых требуется неизменный по величине ток при изменяющемся в небольшом диапазоне $0.8R_n < R < 1.2R_n$ сопротивлении нагрузки, где R_n – номинальное сопротивление нагрузки. Поддержание необходимой величины тока при изменении напряжение сети в таких системах осуществляется путем механического переключения отпаек обмотки высшего напряжения (РПН и ПБВ) силовых трансформаторов. Эти способы регулирования напряжения обладают рядом недостатков, таких как дискретность регулирования, износ трансформаторного масла и механических контактов и т.п. В работе [2] регулирование выполнено путем механического переключения отпаек реактора в ПИТ, что сохраняет указанные выше недостатки.

Альтернативным способом регулирования является введение в систему электроснабжения дополнительных источников, выполненных на основе активных преобразователей с ШИМ и звеном постоянного напряжения [3]. В ПИТ (рис. 1) может рассматриваться несколько вариантов введения дополнительных источников, обеспечивающих сохранение тока при изменении напряжения сети.

Номинальным режимом работы ПИТ является режим, в котором обеспечивается наименьшая реактивная мощность элементов. Режим реализуется, если нулевая точка нагрузки O_1 располагается на топографической диаграмме посередине отрезка *BC*. В этом режиме активная мощность в $2\sqrt{3}$ раз выше реактивной мощности катушки (конденсатора). В дальнейшем все мощности будем нормировать на величину активной мощности нагрузки в номинальном режиме. Условие $X_L = X_C$ позволяет сохранять действующее значение тока активной нагрузки при изменении сопротивления нагрузки.

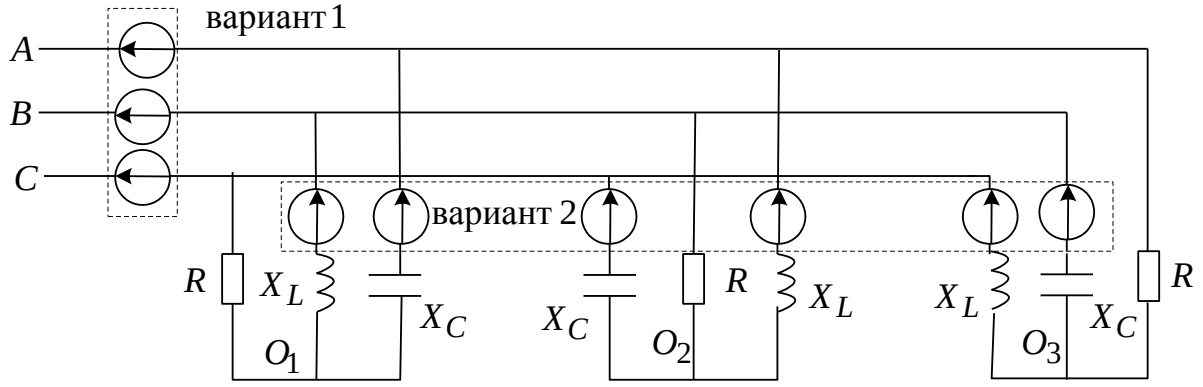


Рис. 1. Схема ПИТ с дополнительными регулирующими источниками

Если установить дополнительный источник на входе ПИТ (вариант 1), то мощность источника, необходимая для регулирования составляет:

$$dP(k_U, k_R) = k_U(1 + k_R),$$

где $k_U = dU/U_n$ – относительное изменение напряжения сети, $k_R = dR/R_n$ – относительное изменение сопротивления нагрузки, U_n и R_n – номинальные значения напряжения сети и сопротивления нагрузки.

Дополнительный источник будет потреблять активную мощность при уменьшении напряжения сети ниже номинального значения, и выдавать активную мощность при увеличении напряжения сети. Обмен активной мощностью может осуществляться со звеном выпрямленного напряжения [4] (например, в установке электролиза). Активная мощность может также передаваться во второй активный преобразователь, имеющий одно звено

постоянного напряжения с первым преобразователем [3]. В этом случае суммарная мощность активных преобразователей повышается в 2 раза.

Если установить дополнительные источники в ветви ПИТ с реактивными элементами (вариант 2), то для осуществления регулирования необходима мощность:

$$dQ(k_U, k_R) = \frac{k_U}{\sqrt{3}}\left(1 + 3\left(\frac{k_R - k_U}{1 + k_U}\right)^2\right).$$

Каждый из дополнительных источников работает как «наведенный» индуктивный или емкостный элемент. При соблюдении условия $X_L = X_C$ для эквивалентных сопротивлений ветвей поддержание действующего значения тока нагрузки осуществляется при изменении активного сопротивления нагрузки. Таким образом, вариант 2 можно рассматривать как векторно-параметрическое регулирование в системе электроснабжения, при котором поддержание необходимого режима осуществляется за счет изменения параметров реактивных элементов. Мощность дополнительных источников реактивная, поэтому звено для передачи активной мощности не требуется. Регулирование осуществляется только за счет перераспределения реактивной мощности между элементами системы. Конструктивно источники можно выполнить с двумя активными выпрямителями и одним общим (или двумя отдельными) звеньями постоянного напряжения.

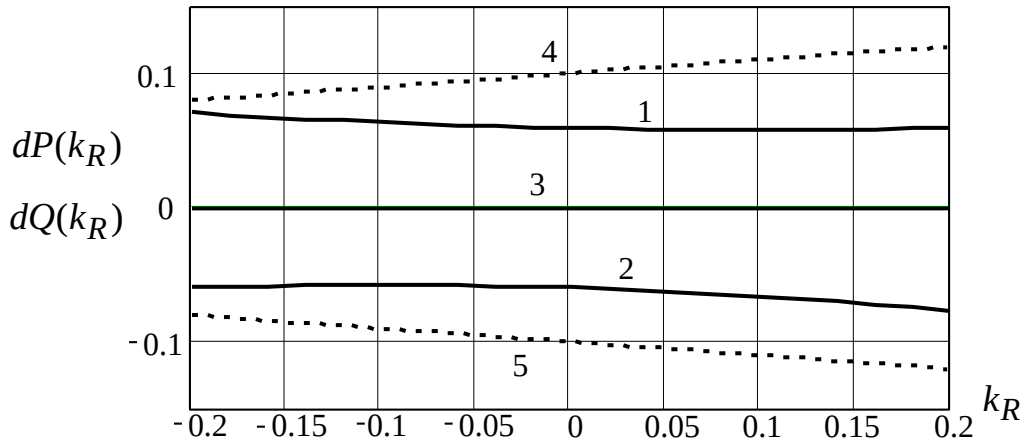


Рис. 2. Нормированные мощности дополнительных активных преобразователей в зависимости от относительного сопротивления сети: 1 – для варианта 2 и $k_U = 0.1$; 2 – для варианта 2 и $k_U = -0.1$; 3 – для вариантов 1 и 2 и $k_U = 0$; 4 – для варианта 1 и $k_U = 0.1$; 5 – для варианта 1 и $k_U = -0.1$

Сравнение мощностей дополнительных источников выполнено на рис. 2. Диапазон изменения параметра k_U принят равным от – 0,1 до 0,1, исходя из нормативных требований по качеству электрической энергии [5].

Из рис. 2 следует, что мощность активного преобразователя в варианте 1 больше суммарной мощности активных преобразователей в варианте 2 во всем диапазоне регулирования. Таким образом, номинальная мощность активных преобразователей в варианте 2 меньше, чем в варианте 1.

При наличии в системе электроснабжения с ПИТ выпрямительных блоков изменение эквивалентных параметров элементов ПИТ неизбежно будет сказываться на моментах включения вентилей и, как следствие, внешних характеристиках выпрямителя. Добавочные сопротивления в ветвях ПИТ $dx = X_L k_U$ и согласно [5] не превышают 10 % от номинального значения. Такие изменения параметров несущественно скажутся на характеристиках выпрямителя. Однако, этот вопрос требует дополнительного исследования.

Регулирование ПИТ может осуществляться путем введения дополнительных источников только в ветви с индуктивностями. При этом условие $X_L = X_C$ для эквивалентных сопротивлений ветвей будет нарушаться. Подбором величины добавочного сопротивления можно добиться неизменной величины тока нагрузки, аналогично рассмотренному в [2] варианту с механическим переключением отпаек. Мощность дополнительного источника в этом случае будет сравнима с суммарной мощностью источников в ветвях с реактивными элементами, показанной на рис. 2. Для мощных энергетических установок допустимая мощность, проходящая через вентильные ключи активных преобразователей, ограничена, поэтому разделение системы управления на два активных преобразователя меньшей мощности предпочтительнее.

Библиографический список

1. Миронов, Ю.М. Электрооборудование и электроснабжение электротермических, плазменных и лучевых установок: учебное пособие для вузов / Ю.М. Миронов, А.Н. Миронова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 376 с.

2. Виноградов, А.В. Возможности улучшения энергетических показателей мощных преобразовательных подстанций электролиза алюминия за счет применения вольтодобавочного параметрического источника тока / А.В. Виноградов, В.И. Суров // Технико-экономический вестник РУСАЛа. – 2007. – Вып. 21. – С. 24–26.

3. Бурман, А.П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем / А.П. Бурман, Ю.К. Розанов, Ю.Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.

4. Хохлов, Ю.И. Моделирование электромагнитных процессов в компенсированном выпрямителе с обратной связью по напряжению на основе АИН с ШИМ. / Ю.И. Хохлов, Д.В. Гиззатуллин, А.Г. Осипов // Вестник ЮУрГУ. – 2008. – Вып. 11. – С. 32–38.

5. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

К содержанию

УДК 621.929.7 + 66-911.48

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ЭМУЛЬСИЙ

С.В. Сергеев, В.Г. Некрутов, И.В. Мартынова

Статья посвящена вопросам совершенствования процесса получения пищевых эмульсий. На основе нового способа возбуждения колебаний разработан и изготовлен экспериментальный аппарат с вибромешалкой. Произведено компьютерное моделирование виброперемещений рабочего органа аппарата.

Ключевые слова: роторные инерционный вибровозбудитель, пищевые эмульсии, турбулентные затопленные струи.

Ведущие тенденции развития пищевой промышленности характеризуются возрастающим применением в отрасли сложных процессов переработки сырья, базирующихся на использовании достижений науки и техники, новых технологий производства многокомпонентных продуктов, включающих жировые эмульсии. Вопросы расширения ассортимента при одновременном повышении качества и биологической ценности продукции связаны с использованием прогрессивных технологий и конструкций аппаратов. Производство подобной продукции представляет собой сложный технологический процесс, ключевой операцией которого является перемешивание (диспергирование и гомогенизация) в аппаратах различного типа [1].

Возможности повышения технологической эффективности процесса получения пищевых эмульсий в использовании методов, основанных на вибрационном воздействии на обрабатываемые среды при одновременном снижении энергопотребления и металлоемкости. К таким аппаратам относятся различные конструкции вибромешалок [2].

Совершенствование техники получение эмульсий обычно связано с общим развитием технологии производства того или иного продукта. В этом случае выбор метода перемешивания зависит от конкретного производства и диктуется технологией.

Все это свидетельствует о том, что совершенствования процесса получения пищевых эмульсий в производстве различных продуктов является актуальной задачей.

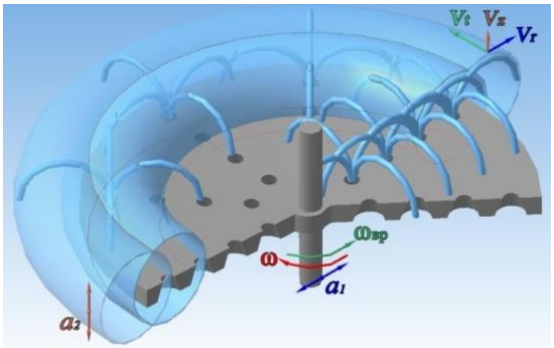
Для решения этой задачи предлагается непосредственно в зону перемешивания аппарата ввести роторный инерционный вибровозбудитель, который реализует принципиально новый способ возбуждения колебаний [3].

На рис. 1 представлен экспериментальный аппарат с вибромешалкой.

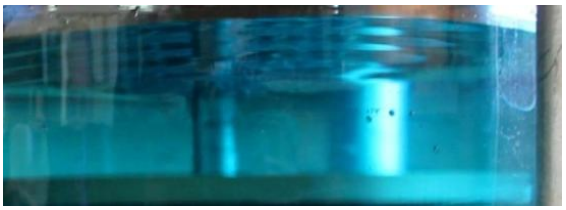
Рис. 1. Экспериментальный аппарат с вибромешалкой

В качестве рабочего органа используется ротор с коническими перфорированными дисками, которым помимо вращения одновременно задают еще и радиально-осевые колебания, при этом частота колебаний значительно превышает частоту их вращения.

Используя данный способ возбуждения колебаний возможно управлять интенсивностью процесса перемешивания жидких сред при получении пищевых эмульсий. Это реализуется усилением либо радиальной либо осевой составляющей скорости движения турбулентных затопленных струй. При этом изменяется частота их взаимодействия (рис. 2, а). Результат проявления их взаимодействия на поверхности жидкой среды представлен на рис. 2, б. Количество колец строго соответствует числу диаметральных рядов отверстий.



а)



б)

Рис. 2. Формирование турбулентных затопленных струи:
а) схема взаимодействия струй; б) результат взаимодействия струй

Для расчета кинематических характеристик рабочего органа (дисков ротора) аппарата с вибромешалкой было произведено компьютерное моделирование их виброперемещений. При этом были определены составляющие скорости движения жидкой среды при перемешивании, что позволило оценить траектории движения этой среды (рис. 3) [4].

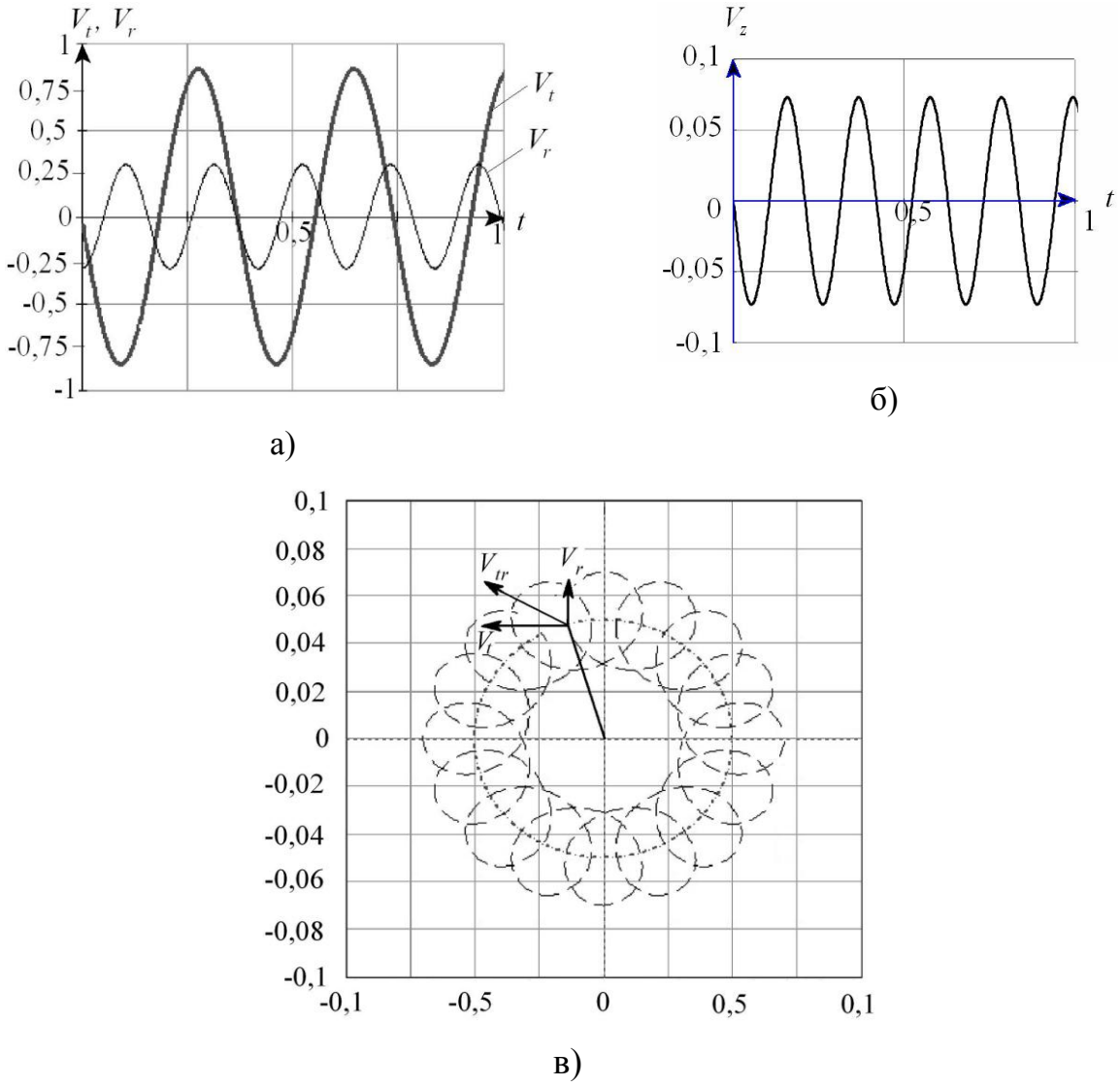


Рис. 3. Результаты моделирования в MathCAD виброперемещений рабочего органа: а) зависимости составляющих скорости движения ротора с дисками V_t, V_r и V_z от времени t; б) визуализация траектории движения ротора с дисками

Дальнейшее моделирование процесса перемешивания жидких сред при получении пищевых эмульсий осуществлялось в программной среде, написанной на языке DELPHI [5].

Результаты компьютерного моделирования показали, что использование данного роторного инерционного вибровозбудителя позволяет одновременно реализовать несколько физических эффектов [3]: повышение турбулизации жидкой среды, активного перемешивания жидкости (виброструйный эффект), эффект вибрационного поддержания вращения ротора машины (эффект хулахупа).

Результаты компьютерного моделирования показали, что применение принципиально нового способа возбуждения колебаний, реализованного в роторном инерционном вибровозбудителе, позволяет получить ряд физических эффектов, одновременная реализация которых позволяет усовершенствовать процесс получения пищевых эмульсий.

При проведении экспериментальных исследований наблюдалось изменение показателей дисперсности, вязкости, стабильности, расслаивания получаемых эмульсий. Это позволяет определять оптимальные режимы перемешивания компонентов эмульсий в целях получения заданных характеристик.

Библиографический список

1. Васильцев, З.А. Аппараты для перемешивания жидких сред: справочное пособие / З.А. Васильцев, В.Г. Ушаков. – Л.: Машиностроение, 1989. – 271 с.

2. Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. – М.: Физматлит, 1994. – 400 с.

3. А.с. № 1664412. Способ возбуждения круговых колебаний и устройство для его осуществления / С.Г. Лакирев, Я.М. Хилькевич, С.В. Сергеев. – Опубл. в Б. И., 1991, Бюл. № 27.

4. Некрутов, В.Г. Компьютерное моделирование процесса перемешивания технологических сред в пищевой промышленности / В.Г. Некрутов // Известия вузов. Пищевая технология. – 2011. – № 2–3. – С. 71–73.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617664. Система моделирования подбора параметров настройки приводов вибрационных устройств / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Р.Г. Закиров, В.Г. Некрутов, А.В. Иршин. – 30.09.2011. – М.: Роспатент, 2011.

К содержанию

УДК 615.47.002.68:658.567.1 + 62-752

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ ВО ВТОРИЧНОЕ СЫРЬЁ

С.В. Сергеев, А.В. Иршин, Е.Н Селивёрстова

В статье затрагивается проблема утилизации медицинских отходов. Предлагается решение данной проблемы – переработка медицинских отходов в качественное вторичное сырье с помощью установки с роторным инерционным вибропривода, что позволит в дальнейшем использовать вторичное сырье в различных сферах деятельности.

Ключевые слова: роторные инерционные вибропривода, размерное измельчение, медицинские отходы, вторсырье.

В процессе перехода медицины к применению одноразового инструмента, возникла острая проблема его утилизации и переработки. В мировой практике эта проблема решается тремя способами:

1) захоронение вместе с другими видами медицинских отходов на полигонах, вследствие чего отчуждаются большие территории;

2) сжигание использованного инструмента в специализированных печах, что наносит непоправимый вред окружающей среды продуктами горения;

3) обеззараживание и переработка использованного инструмента одноразового применения во вторичное сырье.

Выбор способов утилизации, применяемых в медицинских учреждениях, обусловлен влиянием ряда факторов: спецификой территории (город-село), удаленностью перерабатывающего предприятия, объёмом медицинских отходов, экономическими затратами на их утилизацию, в том числе транспортными расходами. Учитывая высокую значимость решения проблемы безопасности для медицинских работников и населения, а также экологической безопасности наиболее целесообразным с экономической точки зрения является третий способ.

К сожалению, в России вопрос утилизации медицинских отходов является достаточно проблематичным и болезненным – нет надлежащего малогабаритного оборудования, в результате чего около 90 % процентов отходов подвергаются захоронению на полигонах, не соответствующих элементарным санитарно-гигиеническим требованиям. Медицинские отходы являются вторичными источниками загрязнения окружающей среды – в них скрывается опасность для здоровья населения, обусловленная, прежде всего, постоянным наличием в их составе возбудителей опасных инфекционных заболеваний, токсических, а нередко и радиоактивных веществ.

Таким образом, выходом из сложившейся ситуации может быть создание малогабаритного энергоэффективного оборудования для переработки использованного инструмента одноразового применения во вторичное сырье, непосредственно в медицинских учреждениях.

Перед переработкой медицинских отходов предлагается проводить обеззараживание физическим методом, путем воздействия электромагнитного излучения сверхвысокой частоты и влажного пара при температуре 100 °С в течение 60 минут в установке УОМО-01/150 (УОМО-02/90).

После обеззараживания и переработки вторичное сырье можно использовать, например, в судостроении – для изготовления корпусов судов и корпусных конструкций (главным образом стеклопластики), в производстве деталей судовых механизмов, приборов, для отделки помещений, их тепло-, звуко и гидроизоляциии; в машиностроительном производстве – для изготовления кабин, кузовов и их крупногабаритных деталей. Следовательно, необходимо повысить качество вторсырья – измельченный материал должен обладать заданными размерами, поскольку его неравномерный гранулометрический состав приводит к браку и ухудшению физико-механических свойств получаемого из него изделия, поэтому, процесс измельчения должен быть усовершенствован.

Получение элементов стружки упорядоченного размера при размерном измельчении фрезерованием возможно за счет изменения кинематических перемещений режущего инструмента, посредством принудительного наложения на него поперечных колебаний (в частности посредством эксцентрикового вибропривода). Но, для повышения производительности измельчения и управления процессом отделения элементов стружки необходимо, в созданных нами станках для измельчения [1], во внешней и внутренней связях использовать вибропривод с регулируемыми параметрами возбуждаемых колебаний с частотой, значительно превышающей частоту вращения фрезы. Такими возможностями обладают роторные инерционные виброприводы [2], основанные на принципиально новом способе возбуждения колебаний [3].

В качестве виброприводов станков для измельчения малопрочных материалов предлагается использовать роторный инерционный вибропривод с вращаемым контртелом (рис. 1а). В общем случае такой вибропривод содержит корпус 1, в котором посредством подшипников качения 2 размещены ротор 3 и контртело 4. Ротор и контртело связаны через приводные валы 5 с приводами вращения М. При этом ротор связан с приводом вращения через жесткую муфту, либо упругий элемент качания 6, и имеет сменную тарелку 7 на конце.

Для возбуждения колебаний ротор перемещают в осевом направлении и поджимают тем самым с требуемым тарированным осевым усилием $P_{ос}>0$ к контртелу. Затем от приводов M вращения осуществляется независимое вращение ротора с частотой вращения $\omega_{врр}$ и вращение в различных направлениях контртела с частотой вращения $\omega_{врк}$. При этом самопроизвольно происходит смещение продольной оси ротора (рис. 1б) в поперечном направлении и начинается планетарное обкатывание тарелки ротора

по поверхности сопряженного с ним контртела. Центр масс ротора при выбеге начинает движение по спиралевидной траектории (рис. 2а) с плавным переходом через доли секунды на круговую траекторию радиусом ρ в установившемся режиме. Таким образом, кинематически неуравновешенный центр масс ротора будет совершать круговые радиальные колебания (поперечные автоколебания) вокруг оси поворотной симметрии и создавать вынуждающую центробежную силу F, которая вызовет возбуждение всей колебательной системы.

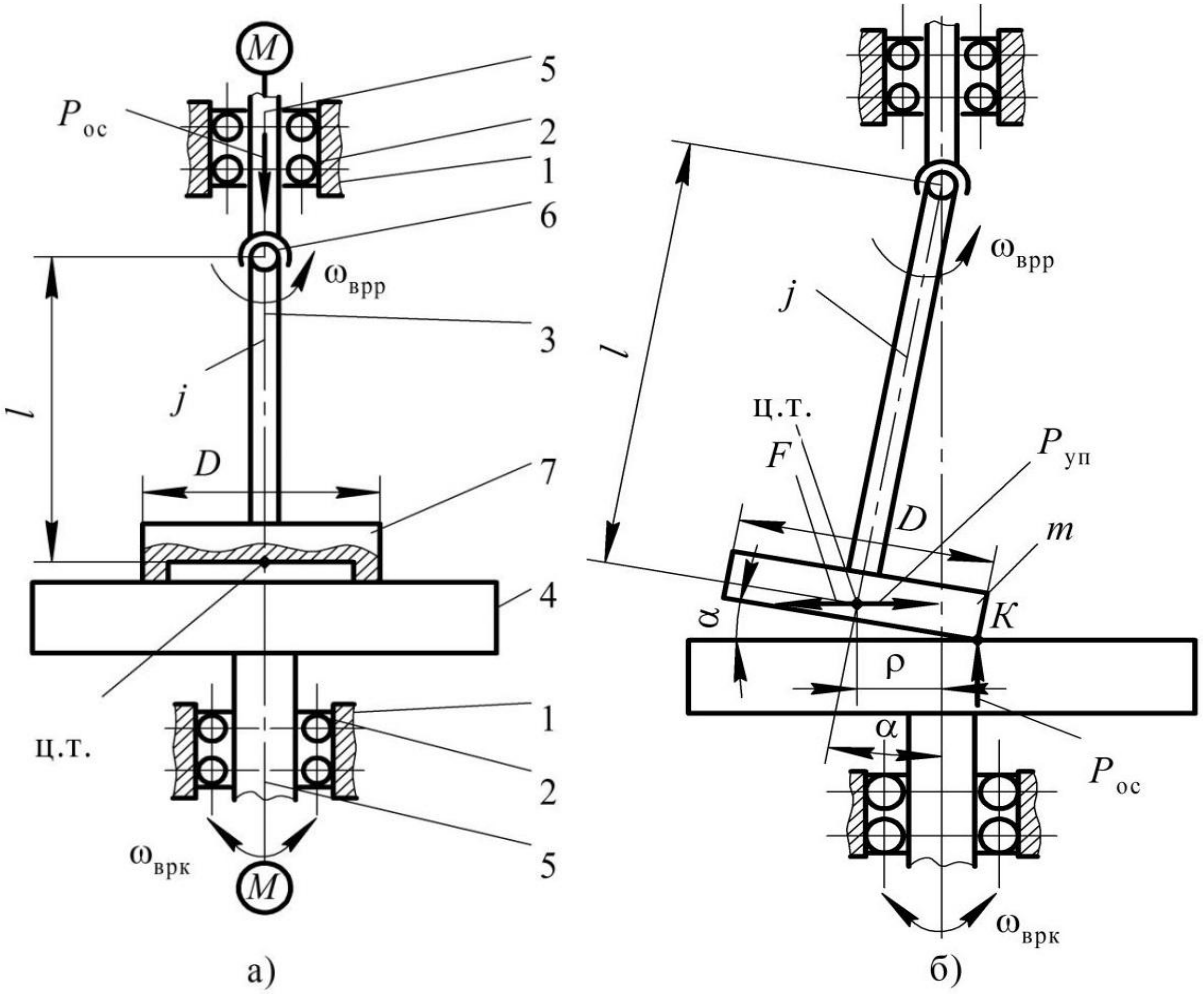


Рис. 1. Роторный инерционный вибропривод с вращающимся контртелом:
а) положение при пуске; б) положение в установившемся режиме;
($\omega_{ВРР}$ – частота вращения ротора; l – вылет вращаемого тела;
ω – частота колебаний; ρ – амплитуда колебаний)

Рассмотрим колебательную систему с ротором массы m в установившемся режиме (рис. 1б). На систему действуют регулируемая осевая сила $P_{ос}$ прижатия ротора к контртелу, а также возникающие в установившемся режиме сила упругости $P_{уп}$ ротора и центробежная вынуждающая сила F, зависящая от параметров круговых колебаний центра тяжести (ц.т.) ротора:

$$P_{\text{уп}} = \rho j; \quad F = m\rho\omega^2. \tag{1}$$

где ρ, ω– амплитуда и частота круговых колебаний ротора, соответственно;

j – изгибная жесткость ротора.

Учитывая, что отношение амплитуды колебаний ротора к его длине ρ/l мало, при рассмотрении статического равновесия ротора можно величиной угла α отклонения осей вращения роторов пренебречь. Тогда вынуждающая сила будет равна:

$$F = P_{\text{уп}} + P_{\text{ос}} \frac{D}{2l}. \tag{2}$$

где l – вылет ротора; D – диаметр тарелки ротора.

С учетом (1) и (2) получим следующее статическое уравнение системы:

$$m\rho\omega^2 = j\rho + P_{\text{ос}} \frac{D}{2l}. \tag{3}$$

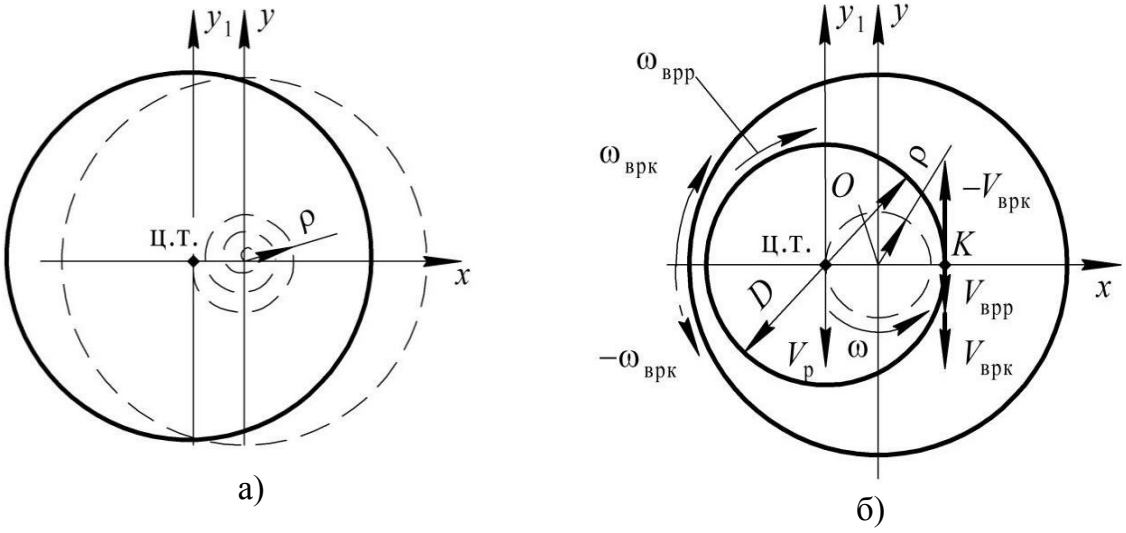


Рис. 2. Схема движения ротора: а) при выбеге; б) в установившемся режиме

Теперь рассмотрим кинематическую схему движений ротора и контртела (рис. 2,б). В этой схеме уже учитываются отклонение оси вращения ротора и направления вращения ротора и контртела. Скорость тарелки ротора $V_{\text{р}}$ и скорости в точках Kконтакта тарелки ротора $V_{\text{врр}}$ и контртела $V_{\text{врк}}$ относительно неподвижной точки O будут равны:

$$V_{\text{р}} = \rho\omega; \quad V_{\text{врр}} = \omega_{\text{врр}} \frac{D}{2}; \quad V_{\text{врк}} = \omega_{\text{врк}} \frac{D}{2}. \tag{4}$$

Тогда уравнение скоростей для ротора относительно неподвижной точкиO будет:

$$V_{\text{р}} = V_{\text{врр}} \pm V_{\text{врк}}. \tag{5}$$

где знак «+» применяется при одностороннем, а знак «–» при противоположном направлении вращения ротора и контртела.

Уравнение скоростей (5) с учетом (4) будет иметь вид:

$$\rho\omega = \frac{D}{2}\left(\omega_{врр} \pm \omega_{врк}\right). \quad (6)$$

Уравнение (6) может использоваться только при условии, что $\omega_{врр} > \omega_{врк}$.

С введением обозначения $\omega_{вр} = \omega_{врр} \pm \omega_{врк}$, уравнение (6) упростится:

$$\rho\omega = \frac{D\omega_{вр}}{2}. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (3) и (7), получим выражения для частоты ω и амплитуды колебаний ротора ρ:

$$\omega = \frac{P_{ос}}{2ml\omega_{вр}} + \sqrt{\frac{P_{ос}^2}{4m^2l^2\omega_{вр}^2} + \frac{j}{m}}; \quad (8)$$

$$\rho = \frac{D\omega_{вр}}{2\omega}. \quad (9)$$

Для экспериментального подтверждения полученных зависимостей была разработана и изготовлена универсальная установка, позволяющая воссоздавать колебательные процессы в роторных инерционных виброприводах с вращающимся контртелом. В результате, стало возможным производить размерное измельчение медицинских отходов, тем самым перерабатывая их в качественное вторичное сырье. В ходе эксперимента были определены значения частоты ω и амплитуды ρ колебаний ротора вибропривода с вращающимся контртелом при различных режимах настройки, и произведено сравнение с соответствующими им теоретическими значениями. Отмечена высокая сходимость результатов.

Библиографический список

1. Сергеев, С.В. Совершенствование процесса измельчения отходов металлов и пластмасс при их переработке: монография / С.В. Сергеев, Е.Н. Гордеев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 110 с.

2. Сергеев, С.В. Вибрационные роторные приводы машин: монография / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Р.Г. Закиров. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2007. – 242 с.

3. Пат. 2347627 Российская Федерация, МПК[7] B06B 1/16. Способ возбуждения колебаний и устройство для его осуществления / С.В. Сергеев, Б.А. Решетников, Р.Г. Закиров, Е.Н. Гордеев, Ю.С. Сергеев. – № 2007136688/28; заявл. 04.10.2007; опубл. 27.02.2009. – Бюл. № 6.

К содержанию

НАУКА ЮУрГУ

Материалы 66-й научной конференции

СЕКЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Текстовое электронное издание

46,3 Мб
1 оптический компакт-диск

Компьютерная верстка электронной версии *Е.В. Федоровой*
Дизайн обложки диска *А.С. Шахрай*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано к использованию 06.08.2014.
Тираж 100 экз. Заказ 321.

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76