Н А У Ч Н О - Т Е Х Н И Ч Е С К И Й

В Е С Т Н И К

П О В О Л Ж Ь Я

№5 2015

Направления:

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Казань

2015

УДК 60
ББК 30-1
Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №5 2015г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2015. – 356 с.

ISSN 2079-5920

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Журнал размещен в открытом бесплатном доступе на сайте www.ntvp.ru, и в Научной электронной библиотеке (участвует в программе по формированию РИНЦ).

Журнал включен ВАК РФ в перечень научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединенном каталоге «Пресса России» № 12025.

Главный редактор Р.Х. Шагимуллин

Редакционная коллегия

С.В. Анаников – д.т.н., проф.; *М.М. Арсланов* – д.ф-м.н., проф.; *Т.Р. Дебердеев* – д.т.н., проф.; *Б.Н. Иванов* – д.т.н., проф.; *В.С. Минкин* – д.х.н., проф.; *А.Н. Николаев* – д.т.н, проф.; *В.К. Половняк* – д.х.н., проф.; *П.П. Суханов* – д.х.н., проф.; *В.Ф. Тарасов* – д.ф-м.н., проф.; *Х.Э. Харлампиди* – д.х.н., проф.

В журнале отражены материалы по теории и практике технических, физико-математических и химических наук.

Материалы журнала будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам научных предприятий, организаций и учреждений, а также аспирантам, магистрантам и студентам.

УДК 60
ББК 30-1

ISSN 2079-5920 **© Научно-технический вестник Поволжья, 2015 г.**

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

В.В. Абрамова РЕШЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ПАРАМЕТРОМ ПРИ ПРОИЗВОДНОЙ 14
Н.Т. Валишин МЕТОД V-ФУНКЦИИ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ 18
Х.Ш. Джураев РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА 22
Х.Ш. Джураев, З.Д. Каримов, Б.И. Махсудов ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР 25
В.В. Дружинин ОБОБЩЕНИЕ МАЛОЙ ТЕОРЕМЫ ФЕРМА 28
В.В. Дружинин ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ЭЙЛЕРА В ТЕОРИИ СРАВНЕНИЙ 30
Д.Л. Еськин ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ ПРИ УСИЛЕНИИ ДВУХЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В ЛБВ М-ТИПА 33
Э.С. Сибгатуллин, О.Г. Новоселов, К.Э. Сибгатуллин ПОСТРОЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТРЕХОСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ 36
О.Ю. Сметанников, В.В. Зыков, К.А. Могильников ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА АВТОМОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ПАКЕТЕ ANSYS 39
О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ОБЛАСТИ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ 43
Н.С. Созонов, И.Н. Шардаков ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ 47
П.П. Сырников, Н.В. Зайцева, Е.Ю. Каптелов, С.В. Сенкевич, И.П. Пронин, Р.А. Кастро ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ – $KTaO_3$, ИХ СТРУКТУРНЫЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА 51
А.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТНОМ КАТОДЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТОКАХ РАЗРЯДА 55
Б.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ 58
М.Ю. Федотова О СХОДИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИРИХЛЕ 61

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

А.В. Быков, Г.Н. Демиденко, Л.Ж. Никошвили, Г.В. Самойлова ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ РУТЕНИЕВЫЙ КАТАЛИЗАТОР В ПРОЦЕССЕ N-АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ 64
О.В. Кислица, О.В. Манаенков, В.Г. Матвеева, А.Е. Филатова, В.Ю. Долуда, Э.М. Сульман, А.И. Сидоров, В.В. Шумилов, М.Б. Лебедева, Е.В. Ребров ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ 67
В.П. Молчанов, Е.В. Ребров, М.Е. Григорьев, И.П. Шкилева, О.В. Матвеева ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОКОНВЕРСИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНЫХ УДОБРЕНИЙ И КОРМОВЫХ ДОБАВОК 70

Н.А. Немыгина, Л.Ж. Никошвили, М.Г. Сульман, Э.М. Сульман, L. Kiwi-Minsker ПАЛЛАДИЙ СОДЕРЖАЩИЕ КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХСШИТОГО ПОЛИСТИРОЛА ДЛЯ РЕАКЦИИ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ СУЗУКИ 73

М.Ю. Ракитин, В.Ю. Долуда, А.И. Петрова, И.П. Шкилева, В.Г. Матвеева, Г.Н. Демиденко, Э.М. Сульман, А.А. Рубина ПРИМЕНЕНИЕ RU/СПС КАТАЛИЗАТОРОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АНИЛИНА В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА 76

А.А. Степачёва, Е.И. Шиманская, Е.С. Мигунова, В.Н. Сапунов, В.Г. Матвеева, А.М. Сульман, В.Ю. Долуда, Е.В. Ребров КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ КАРБОКСИЛЬНОЙ ГРУППЫ ЖИРНЫХ КИСЛОТ 79

В.А. Стригина, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева, А.С. Скворцов, М.Г. Сульман, Э.М. Сульман, Е.В. Ребров ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОФАЗНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУРФУРОЛА 82

Б.Б. Тихонов, А.И. Сидоров, П.Ю. Стадольникова, О.В. Матвеева, Н.В. Лакина ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МУЛЬТИФЕРМЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА И ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ 85

А.С. Торозова, Э.М. Сульман, П.В. Синицына, П. Мяки-Арвела, К.П. Волчо, Д.Ю. Мурзин, И.Ю. Тямина КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИОКСИНОЛА С ОБЕЗБОЛИВАЮЩИМ ЭФФЕКТОМ 88

Е.А. Фарберова, Е.А. Тиньгаева, А.Д. Чучалина, А.Р. Кобелева ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО АКТИВНОГО УГЛЯ 91

Н.М. Хлынова ИНВЕРСИОННО-ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОДА 96

Е.И. Шиманская, А.А. Степачёва, Ю.В. Луговой, Э.М. Сульман, А.Е. Филатова, М.Г. Сульман, Е.В. Ребров ПЕРЕРАБОТКА ЛИГНИНА И ЛИГНИН-СОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ЖИДКИЕ ТОПЛИВА 99

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

В.Н. Абузяров, И.А. Акимов МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСТАНОВКАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА 102

В.Н. Абузяров, И.А. Акимов ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ 105

А.И. Акимов ЗАДАЧА ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ПОЛОГО МНОГОСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ 108

В.В. Аникеев, С.В. Елесин, В.Н. Пермяков ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА РЕСУРС ДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН 112

А.В. Антонов, С.Г. Фомичев, Т.В. Бурнышева ОЦЕНКА УРОВНЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРОИЗВОДСТВОМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И НЕТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОСТОЕВ 115

Р.С. Ахметшин, А.Ф. Анчугова, А.З. Гумеров ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ПОМЕЩЕНИИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ 118

А.В. Базанов, В.И. Бауэр, Е.С. Козин, А.А. Мухортов ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ТО И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ НЕФТЕПРОВОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 121

Ф.Д. Байрамов, Б.Ф. Байрамов, А.Р. Фардеев МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ДИНАМИКИ 125
А.С. Баранов РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ТЕЛА 129
Л.В. Беляев, И.В. Волкова, А.В. Жданов ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИСКУССТВЕННЫХ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА ИЗ ГЕМОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ 132
Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов, М.В. Ильин, А.В. Евишев ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ПРОТИВО-ЭДС В НАГРУЗКЕ 135
Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов, М.В. Ильин, А.В. Евишев ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ВЕЛИЧИН ИНДУКТИВНОСТИ НАГРУЗКИ 138
Д.М. Бородин, В.В. Конев РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРОГРЕВОМ 141
Е.Ф. Бояркина, В.Г. Логачев ФАКТОР «МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ОБЩЕСТВА» ПРИ ИЗУЧЕНИИ УРОВНЯ АВТОМОБИЛИЗАЦИИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ 144
А.П. Буйносов, Д.С. Денисов БЛОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРАЦИИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА В ЭКСПЛУАТАЦИИ 147
А.П. Буйносов, А.В. Панфилов ВЫБОР ПРОФИЛЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6 150
А.П. Буйносов, И.О. Шепелева РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ БАНДАЖЕЙ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ 153
Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КОЛЕБАНИЯ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА В СИСТЕМЕ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ» 157
Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА НА СИСТЕМУ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ» 161
В.В. Бухтояров, А.К. Данилов, Н.В. Иванов, В.С. Тынченко НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ 164
Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин ГИБРИДНАЯ ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ 167
Р.О. Волошин, Ю.П. Ясьян ВЛИЯНИЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИСАДКИ ЦДП НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ 171
В.В. Воронин, В.И. Марчук, Н.В. Гапон, Р.А. Сизякин, Д.В. Фоломкин ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ СЦЕНАМИ 174
Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ – КОНСТРУКЦИЯ» НА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ 178
Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО ТЕЛА И СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ 181

Ф.М. Гайсин, Р.Т. Насибуллин, А.Ш. Садриев, Р.Ш. Садриев, Л.Р. Саримов ПРИМЕНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ 184
И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов, М.А. Бобров ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ 187
Т.А. Деменкова, М.С. Побережный АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ 191
Т.Н. Иванова, Л.К. Шушкова, О.А. Чикишева ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ 194
В.А. Кондряков, Аль-Рубой Мудар, Е.А. Рубцов ВАРИАНТ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИСТЕМ VOR/DME В РЕСПУБЛИКЕ ИРАК 197
В.В. Конев, Д.М. Бородин ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН 200
Ю.А. Кузнецова ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ДОННОГО СЛОЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА 203
С.В. Леонтьев, В.А. Голубев, В.А. Шаманов, А.Д. Курзанов ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ГАЗОБЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ 206
Р.И. Ливеровский ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ 209
Р.И. Ливеровский, С.П. Шевырев РАЗНОСТНАЯ СХЕМА МЕТОДА ДАВЫДОВА ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА НА НЕРЕГУЛЯРНОЙ ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ 212
С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ–ВОЗДУХ» 217
Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНЕ 223
В.Х. Май, Н.Н. Черникова, А.И. Сердюк О НОВОМ ПОДХОДЕ К РАЗРАБОТКЕ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ 226
А.А. Мальцев, И.А. Мальцев ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ СВЕТОДИОДА МЕТОДОМ МНОГОВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА 229
В.Ю. Мельцов, А.С. Куваев ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА С БЛОКОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ УНИФИКАЦИИ 232
Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров, А.И. Плотников ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА В АЭРОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ 235
И.Ш. Мустафин, А.В. Волков, А.А. Попов АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ КЛЮЧАХ ИНВЕРТОРА 239
Р.В. Муцаев ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНУЛИНА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИФРУКТАНОВ 242
А.И. Новиков О ДИЛЕММЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК 246
А.Ю. Панов, М.С. Трофимова К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ ВНЕДРЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ «ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА» 249
С.А. Панфилов, О.В. Кабанов, М.А. Бобров, А.С. Хрёмкин РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ 253

П.В. Писарев, В.Я. Модорский АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЕРЕПУСКНОГО КАНАЛА И ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ВЫХОДНЫХ СЕЧЕНИЙ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ 257
П.В. Писарев, А.А. Паньков, А.Н. Аношкин ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРИ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 260
А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова РАЗМЫВ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ 263
М.В. Пономарёв АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГРАНИЧНОЙ МОДЕЛИ ИЗ ОБМЕННОГО ФАЙЛА STEP. ПОИСК СМЕЖНЫХ ГРАНЕЙ 266
А.П. Приходько РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ГРУНТОАРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ФОТОМЕТРИИ 269
Н.С. Сахарова АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУППЫ ЗАПРОСОВ К МОДЕЛИ МЕТАДАННЫХ 272
Т.А. Смирнова, Ю.С. Бутько, С.Ю. Киселев, Н.В. Княгичева АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕТИПИЧНОЙ СТОПЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ФОРМЫ ОБУВИ ДЛЯ КАТАНИЯ НА РОЛИКОВЫХ КОНЬКАХ 275
В.А. Соловьев, М.Н. Морозова ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОЛОРИМЕТРА, ПОСТРОЕННОГО НА ПРИНЦИПАХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ 278
А.В. Степенькин, И.В. Шинаков, А.В. Жданов КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛАСТИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РВМ 284
Д.А. Страбыкин, Д.В. Вожегов, А.И. Симонов ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ АБДУКТИВНОГО ВЫВОДА 287
Н.А. Труфанов, Л.Р. Шаяхметова ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКА 291
О.П. Уварова ДЕЯТЕЛЬНОЕ СОУЧАСТИЕ В АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОМ ФОРМИРОВАНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В СТРУКТУРЕ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ 295
Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ 298
Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТЫ ГАЗОПРОВОДОВ 301
Р.М. Хусаинов, И.И. Мубаракшин, А.Р. Сабиров ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ 304
М.А. Черноскутов, М.Л. Гольдштейн АНАЛИЗ ОБЪЕМА ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ АЛГОРИТМЕ ПОИСКА В ШИРИНУ НА ГРАФЕ 309
А.В. Широков, С.М. Козырева, Л.О. Широкова ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ 312
С.А. Шишлов, С.В. Щитов ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРИ ПУНКТИРНО-ПОЛОСНОМ СПОСОБЕ ПОСЕВА СОИ 315

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В КОМПРЕССОРЕ МОДЕЛЬНОГО СТЕНДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА 318
Б.В. Шогенов, А.М. Казиев, А.И. Сижажев, А.С. Ципинов ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМООБРАЗОВАНИЯ В ПЕРЕДАЧАХ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА 321
А.В. Шорохова АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ 324
Д.В. Штых, И.В. Шинаков, В.В. Морозов АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РОЛИКОВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ 328

АННОТАЦИИ 331

THE RELEASE MAINTENANCE

PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

V.V. Abramova SOLUTION FOR PERIODIC BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR FIRST ORDER DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH PARAMETER IN DERIVATIVE 14
N.T. Valishin V-FUNCTIONS METHOD AND OPTICAL-MECHANICAL ANALOGY 18
Kh.Sh. Dzhuraev REGULARIZATION OF CAUCHYS PROBLEMS FOR THE HELMHOLTZS EQUATION 22
Kh.Sh. Dzhurayev, Z.D. Karimov, B.I. Makhsudov INVERSE PROBLEMS IN THE STUDY OF WAVEGUIDE PROPERTIES OF MULTILAYER QUANTUM-DIMENSIONAL HETEROSTRUCTURES 25
V.V. Druzhinin GENERALIZATION OF THE LITTLE FERMAT'S THEOREM 28
V.V. Druzhinin GENERALIZATION OF EULER'S THEOREM IN THE THEORY OF CONGRUENCES 30
D.L. Eskin THE COMBINATIONAL FREQUENCES WAVES EXITATION BY DUAL-FREQUENCY SIGNAL AMPLIFICATION IN A TWT M-TYPE 33
E.S. Sibgatullin, O.G. Novoselov, K.E. Sibgatullin CROSS SECTIONS LIMITING SURFACE DURABILITY FOR VOLUMETRIC FINITE ELEMENTS UNDER TRIAXIAL STATE OF STRESS 36
O.Yu. Smetannikov, V.V. Zykov, K.A. Mogilnikov DESIGN OPTIMIZATION OF THE AUTOMOBILE PLATFORM SUPPORT ELEMENTS IN ANSYS PROGRAM 39
O.Yu. Smetannikov, G.V. Ilinykh A METHOD OF THE INVESTIGATION OF HIGH-SPEED GAS FLOW IN THE REGION WITH MOVING WALLS 43
N.S. Sozonov, I.N. Shardakov ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING THE FIBER OPTIC SENSOR FOR NONUNIFORM STRAIN REGISTRATION 47
P.P. Syrnikov, N.V. Zaytseva, E.Y. Kaptelov, S.V. Senkevich, I.P. Pronin, R.A. Castro SYNTHESIS OF $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ – $KTaO_3$ SINGLE CRYSTALS, THEIR STRUCTURAL, DIELECTRIC AND OPTICAL PROPERTIES 51
A.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva STUDY OF HEAT EFFECTS ON FLOWING ELECTROLYTIC CATHODE AT HIGH DISCHARGE CURRENTS 55
B.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva MATHEMATICAL DESCRIPTION OF GAS DISCHARGE WITH LIQUID ELECTRODE 58
M.Yu. Fedotova ON THE CONVERGENCE OF EIGENVALUES OF SINGULARLY PERTURBED BOUNDARY – VALUE DIRICHLET PROBLEM 61

CHEMICAL SCIENCE

A.V. Bykov, G.N. Demidenko, L.Zh. Nikoshvili, G.V. Samoilova THE POLIMERSTABILIZED RUTHENIC CATALYST IN THE REDUCTIVE N-ALKYLATION OF AROMATIC AMINES 64
O.V. Kislitza, O.V. Manaenkov, V.G. Matveeva, A.E. Filatova, V.Yu. Doluda, E.M. Sulman, A.I. Sidorov, V.V. Shumilov, M.B. Lebedev, E.V. Rebrov HYDROLYTIC HYDROGENATION OF CELLULOSE WITH USE OF THE POLYMERIC CATALYSTS 67
V.P. Molchanov, E.V. Rebrov, M.E. Grigoriev, I.P. Shkileva, O.V. Matveeva PHYSICO-CHEMICAL STUDY OF THE PROCESSES OF BIOCONVERSION OF PLANT RAW MATERIAL AND ORGANIC WASTE TO PRODUCE EFFECTIVE FERTILIZERS AND FODDER ADDITIVES 70
N.A. Nemygina, L.Zh. Nikoshvili, M.G. Sulman, E.M. Sulman, L. Kiwi-Minsker PALLADIUM-CONTAINING CATALYSTS BASED ON FUNCTIONALIZED HYPERCROSSLINKED POLYSTYRENE FOR SUZUKI CROSS-COUPLING REACTION 73

M.Yu. Rakitin, V.Yu. Doluda, A.I. Petrova, I.P. Shkileva, V.G. Matveeva, G.N. Demidenko, E.M. Sulman, A.A. Rubina APPLICATION OF RU/HPS CATALYSTS IN RECEIVING ANILINE IN MEDIUM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE 76
A.A. Stepacheva, E.I. Shimanskaya, E.S. Migunova, V.N. Sapunov, V.G. Matveeva, A.M. Sulman, V.Yu. Doluda, E.V. Rebrov CATALYTIC HYDROGENATION OF CARBOXYLIC GROUP OF FATTY ACIDS 79
V.A. Strigina, V.Yu. Doluda, V.G. Matveeva, A.S. Skvortsov, M.G. Sulman, E.M. Sulman, E.V. Rebrov RESEARCH LIQUID-PHASE CATALYTIC FURFURAL REDUCTION 82
B.B. Tihonov, A.I. Sidorov, P.Yu. Stadolnikova, O.V. Matveeva, N.V. Lakina INVESTIGATION OF MULTIENZYME SYSTEMS BASED ON GLUCOSE OXIDASE AND HORSERADISH PEROXIDASE 85
A.S. Torozova, E.M. Sulman, P.V. Sinitsyna, P. Mäki-Arvela, K.P. Volcho, D.Yu. Murzin, I.Yu. Tiamina CATALYTIC SYNTHESIS OF DIOXINOL WITH ANTICONVULSANT ACTIVITY 88
E.A. Farberova, E.A. Tingaeva, A.D. Chuchalina, A.R. Kobeleva THE INFLUENCE OF COAL DUST GRANULOMETRIC COMPOSITION ON EXTRUDED ACTIVATED CARBON QUALITY 91
N.M. Khlinova STRIPPING VOLTAMMETRIC DETERMINATION OF THE FRACTAL DIMENSION OF THE SURFACE SOLID ELECTRODE 96
E.I. Shimanskaya, A.A. Stepacheva, Yu.V. Lugovoj, E.M. Sulman, A.E. Filatova, M.G. Sulman, E.V. Rebrov PROCESSING OF LIGNIN AND LIGNIN CONTAINING RAW MATERIAL INTO LIQUID FUELS 99

ENGINEERING SCIENCE

V.N. Abuzyarov, I.A. Akimov MATHEMATICAL MODELING OF INTERFERENCE TO THE MANAGEMENT PROCESSES OF COMPOSITE MATERIALS IN THE INSTALLATION OF AUTOMATIC BUSINESS PROCESS 102
V.N. Abuzyarov, I.A. Akimov MANAGEMENT PROCESSES WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN CLOSED SYSTEM 105
A.I. Akimov THE PROBLEM OF THE COOLING OF THE HOLLOW MULTILAYER CYLINDRICAL BODY MADE OF COMPOSITE MATERIALS TO THE TEMPERATURE OF POLYMERIZATION TO A TEMPERATURE OF THE ENVIRONMENT 108
V.V. Anikeev, S.V. Elesin, V.N. Permyakov THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE RESOURCE OF ENGINES OF WHEELED AND TRACKED VEHICLES 112
A.V. Antonov, S.G. Fomichev, T.V. Burnysheva EVALUATING THE CONTROLLABILITY OF PRODUCTION LEVEL TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL AND NON-TECHNOLOGICAL DOWNTIME 115
R.S. Akhmetshin, A.F. Anchugova, A.Z. Gumerov THE MOVEMENT OF DUST PARTICLES IN THE ROOM WITH THE ELECTROMAGNETIC FIELD 118
A.V. Bazanov, V.I. Bauer, E.S. Kozin, A.A. Muhortov INFLUENCE OF PRODUCTION TECHNOLOGY FACTORS ON THE ORGANIZATION THE MAINTENANCE AND CAR REPAIRS AT REPAIR OF OIL PIPELINES OF WESTERN SIBERIA 121
F.D. Bairamov, B.F. Bairamov, A.R. Fardeev MODERNISED SYSTEM OF GREASING-COOLING TECHNOLOGICAL SUBSTANCES DELIVERING OF METAL-CUTTING MACHINES AND THE INVESTIGATION OF ITS DYNAMICS 125
A.S. Baranov THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION AND THE ANALYSIS OF USE CONDITIONS FOR LABORATORY TESTING THE STAND DETERMINING THE RESISTANCE FORCE TO A BODY MOVEMENT 129

L.V. Belyaev, I.V. Volkova, A.V. Zhdanov MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF COMPONENTS OF ARTIFICIAL HEART VENTRICLES FOR PULSATIVE ASSIST AND ARTIFICIAL HEART SYSTEMS FROM HEMOCOMPATIBLY MATERIALS 132
N.N. Bespalov, S.S. Kapitonov, M.V. Ilyin, A.V. Evishev RESEARCH OF OPERATING MODES OF THYRISTOR CONVERTERS IN DC ELECTRIC DRIVE WITH VARIATION OF BACK-EMF IN LOAD 135
N.N. Bespalov, S.S. Kapitonov, M.V. Ilyin, A.V. Evishev RESEARCH OF OPERATING MODES OF THYRISTOR CONVERTERS IN DC ELECTRIC DRIVE WITH VARIATION OF LOAD INDUCTANCE 138
D.M. Borodin, V.V. Konev DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION CYLINDER EARTHMOVER WITH LOCAL WARMING 141
E.F. Boyarkina, V.G. Logachev THE FACTOR “SOCIETY BEHAVIOR MODEL” IN THE RESEARCHING OF CAR OWNERSHIP IN RUSSIA AND ABROAD 144
A.P. Buinosov, D.S. Denisov THE BLOCK FOR PILOT STUDIES OF VIBRATION OF KNOTS OF THE ELECTRIC TRAIN IN OPERATION 147
A.P. Buinosov, A.V. Panfilov CHOICE OF THE CROSS-SECTION OF BANDAGES OF WHEELPAIRS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6 150
A.P. Buinosov, I.O. Shepeleva RESULTS OF MODELLING OF HARDENING OF STEEL OF BANDAGES AT HEAT TREATMENT OF WHEELPAIRS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES 153
L.N. Butymova, V.YA. Modorskiy, V.YU. Petrov NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF THE KINEMATIC PARAMETERS TO FLUCTUATIONS BLADES MODEL COMPRESSION SYSTEM "GAZ-CONSTRUCTION" 157
L.N. Butymova, V.YA. Modorskiy, V.YU. Petrov NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF FLUCTUATIONS IN THE COMPRESSOR BLADES ON THE MODEL SYSTEM "GAS-CONSTRUCTION" 161
V.V. Bukhtoyarov, A.K. Danilov, N.V. Ivanov, V.S. Tynchenko SYSTEM DIAGNOSTICIANS OF OIL PUMPING EQUIPMENT 164
D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin HYBRID SOFTWARE SYSTEMS OF INFERENCE WITH FACTS DETERMINATION 167
R.O. Voloshin, Y.P. Yasyan INFLUENCE OFMULTIFUNCTIONAL ADDITIVES CDP ON ANTI-WEAR PROPERTIES OFDIRSEL FUELS 171
V.V. Voronin, V.I. Marchuk, N.V. Gapon, R.A. Sizyakin, D.N. Folomkin RECOVERY OF VIDEO SEQUENCE WITH DYNAMIC SCENES 174
D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorsky, V.Yu. Petrov DEVELOPMENT OF TECHNIQUES OF EXPERIMENTS ON ESTIMATION OF PARAMETERS OF FAST PROCESSES IN DYNAMICAL SYSTEMS "LIQUID - GAS - STRUCTURE" ON MODEL STAND 178
D.F. Gainutdinova, V.Ya. Modorsky, V.Yu. Petrov NUMERICAL SIMULATION MUTUAL MOVABLE BODY AND SQUEEZES LIQUID BY METHOD LARGE PARTICLES 181
F.M. Gaysin, R.T. Nasibullin, A.Sh. Sadriev, R.Sh. Sadriev, L.R. Sarimov THE PRACTICE OF FEATURES OF HIGH-FREQUENCY DISCHARGES IN THE TECHNOLOGICAL CYCLE 184
I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov, M.A. Bobrov VECTOR CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR 187
T.A. Demenkova, M.S. Poberezny HARDWARE REALIZATION OF ALGORITHM OF PROCESSING IMAGE 191
T.N. Ivanova, O.A. Chikisheva, L.K. Shushkova IMPROVING THE EFFICIENCY OF ROTATIONALLY SYMMETRIC PARTS 194
V.A. Kondryakov, Al-Rubaye Mudher, E.A. Rubtsov VARIANT OF RATIONAL ALLOCATION OF VOR/DME IN THE REPUBLIC OF IRAQ 197
V.V. Konev, D.M. Borodin EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL STATE ROAD CONSTRUCTION MACHINERY 200

Yu.A. Kuznetsova ENERGY MODEL OF BOTTOM LAYER DEFORMATION IN HYDROSYSTEM TAILRACE 203
S.V. Leontev, V.A. Golubev, V.A. Shamanov, A.D. Kurzanov THE RESEARCH OF INFLUENCE OF VARIOUS BLOWING AGENTS ON THE STRUCTURE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE WITH LOW DENSITY 206
R.I. Liverovskiy NUMERICAL SIMULATION OF SUPERSONIC THREE-DIMENSIONAL GAS DYNAMICS PROBLEMS ON A TETRAHEDRAL GRID 209
R.I. Liverovskiy, S.P. Shevirev DIFFERENTIAL SCHEME OF DAVIDOV'S METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL FLOW OF COMPRESSIBLE GAS ON AN IRREGULAR TETRAHEDRAL GRID 212
S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin, G.V. Leonov DETERMINATION OF OPTICAL RADIATION ATTENUATION IN DISPERSED SYSTEM «COAL DUST-AIR» 217
D. Litvina, L. Strogonova MATHEMATICAL METHODS OF THE THEORY OF DECISION SUPPORT IN MEDICINE 223
V.H. May, N.N. Chernikova, A.I. Serdyuk A NEW APPROACH TO CAD DESIGN TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MACHINING 226
A.A. Maltsev, I.A. Maltsev ANALYSIS OF THERMAL EQUIVALENT CIRCUITS LED BY MULTIVARIATE ANALYSIS 229
V.U. Meltsov, A.S. Kuvaev DESIGN EXECUTIVE PROCESSOR WITH SUCCESSIVE BLOCKS UNIFICATION 232
E.V. Mekhonoshina. V.Ya. Modorskii, V.Yu. Petrov, A.I. Plotnikov NUMERICAL EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPRESSOR BLADE IN THE AEROELASTIC FORMULATION 235
I.Sh. Mustafin, A.V. Volkov, A.A. Popov ANALYSIS SWITCHING LOSSES IN THE POWER SWITCHES INVERTER 239
R.V. Mucaev DEFINITION OF RATIONAL REGIME PARAMETERS IN THE MANUFACTURE OF INULIN IN POLYFRUCTANES TECHNOLOGY 242
A.I. Novikov DILEMMA OF EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY AUTOMOTIVE ENGINE 246
A.Y. Panov, M.S. Trofimova TO THE QUESTION OF THE DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF THE PROJECT OF INTRODUCTION OF THE PROCEDURE "ADVANCED PRODUCT QUALITY PLANNING" 249
S.A. Panfilov, O.V. Kabanov, M.A. Bobrov, A.S. Hremkin DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF OBJECTS 253
P.V. Pisarev, V.Ya. Modorskiy ANALYSIS OF INFLUENCE OF LENGTH OF THE BYPASS AND RELATIONS OF THE AREAS OF OUTPUT SECTIONS ON OSCILLATORY PROCESSES IN THE TWO-LEVEL CENTRIFUGAL PUMP 257
P.V. Pisarev, A.A. Pankov, A.N. Anoshkin NUMERICAL CALCULATION OF SOUND PRESSURE LOSS IN MODEL CHANNEL WITH CYLINDRICAL HELMHOLTZ RESONATOR 260
A.G. Pozdeev, Yu.A. Kuznetsova TURBULENT FLOW EROSION OF HYDRAULIC FACILITY TAILRACES 263
M.V. Ponomarev AUTOMATED ANALYSIS OF B-REP MODEL GEOMETRIC DATA FROM STEP EXCHANGE FILE. SEARCH OF ADJACENT FACES 266
A.P. Prikhodko THE RESULTS OF STUDIES OF THE SOIL REINFORCED BASES USING THE METHOD OF PHOTOMETRY 269
N.S. Sakharova ANALYSIS OF INFORMATION SUPPORT BUSINESS PROCESSES USING GROUPS REQUEST TO THE METADATA MODEL 272

T.A. Smirnova, Y.S. Butko, S.Y. Kiselev, N.V. Knyagicheva, ANTHROPOMETRIC RESEARCH TO DETERMINE THE PARAMETERS OF AVERAGE TYPICAL FOOT FOR DESIGN OF INNER FORM OF SHOES FOR ROLLER-SKATES 275
V.A. Soloviev, M.N. Morozova THE MEASURING SYSTEM OF THE COLORIMETER, BASED ON THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS PRINCIPLES 278
A.V. Stepenkin, I.V. Shinakov, A.V. Zhdanov FINITE ELEMENT ANALYSIS ELASTIC MEMBER OF ROLLER SCREW MECHANISM 284
D.A. Strabykin, D.V. Vozhegov, A.I. Simonov INTELLIGENT SYSTEM OF LOGIC FORECASTING OF SITUATIONS DEVELOPMENT BASED ON THE ABDUCTIVE LOGICAL INFERENCE 287
N.A. Trufanov, L.R. Shayahmetova NUMERICALLY-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE INGOT CRYSTALLIZATION PROCESS 291
O.P. Uvarova MAKING PARTICIPATION IN ARCHITECTURE AND LANDSCAPE FORMATION OF URBAN OPEN SPACES IN RESIDENTIAL STRUCTURE 295
D.I. Fedorovtsev, P.V. Pisarev THE NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF THE THERMOELECTRIC GENERATOR 298
D.I. Fedorovtsev, P.V. Pisarev THE DEVELOPMENT OF THE THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTER BASED ON THE PELTIER ELEMENT FOR ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF GAS PIPELINE 301
R.M. Khusainov, I.I. Mubarakshin, A.R. Sabirov RESEARCHING THE ELASTIC DEFORMATIONS DURING THE PROCESSING ON VERTICAL MILLING MACHINE 304
M.A. Chernoskutov, M.L. Goldshtein ANALYSIS OF AMOUNT OF DATA TRANSFER IN PARALLEL BREADTH-FIRST SEARCH ALGORITHM 309
A.V. Shirokov, C.M. Kozyreva, L.O. Shirokova STUDY OF COMBINED POWDER PRODUCTS BASED ON RECYCLED RAW MATERIALS ON THE QUALITY OF BAKERY PRODUCTS 312
S.A. Shishlov, S.V. Schitov THE FORMATION OF BANDS WHEN USED DOTTED-BAND METHOD OF SOWING SOYA 315
A.F. Shmakov, V.Ya. Modorskiy, V.Yu. Petrov NUMERICAL MODELING OF GASDYNAMIC PROCESSES AND PROCESSES OF DEFORMATION IN COMPRESSOR OF MODEL TEST BENCH OF THE GAS-DISTRIBUTING UNIT 318
B.V. Shogenov, A.M. Kaziev, A.B. Sizhazhev, A.S. Tsipinov OPTIMIZATION OF NOISE GENERATION IN THE PROGRAMS WITH A FLEXIBLE CONNECTION METHOD OF MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANNING 321
A.V. Shorokhova ALGORITHM MODELLING OF PROCESSES OF PROCESSING OF WASTE WITH THE SUBSEQUENT RECULTIVATION OF THE BROKEN TERRITORIES OF COAL-MINING REGIONS 324
D.V. Shtih, I.V. Shinakov, V.V. Morozov ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF ROLLER SCREW MECHANISMS 328

ABSTRACTS 331

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

01.01.01

В.В. Абрамова

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, кафедра математики, Набережные Челны, vervikab@yandex.ru

РЕШЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ПАРАМЕТРОМ ПРИ ПРОИЗВОДНОЙ

Доказана теорема существования и единственности решения периодической краевой задачи для дифференциального уравнения первого порядка с параметром при производной (в том числе и малым) на основе теории положительных операторов, а также приводится теоретическое обоснование итерационного метода для рассматриваемого уравнения.

Ключевые слова: *краевая задача, обратный оператор, итерационный метод, ряд Фурье.*

Введение.

Дифференциальные уравнения с малым параметром при старшей производной часто встречаются в приложениях (теория нелинейных колебаний, квантовая механика, кинематика и т.д.). В отличие от уже имеющихся результатов в данной работе основное внимание уделяется теоремам существования и единственности решения, полученным на основе теории положительных операторов с использованием теории рядов Фурье и теории приближения функций. Для теоретического обоснования используется методика исследований, разработанная в главе 1 монографии Б.Г. Габдулхаева [1].

1. Теоремы существования и единственности решения.

Рассмотрим периодическую краевую задачу вида

$$Kx \equiv \varepsilon x'(s) + a(s)x(s) = y(s), \quad -\infty < s < \infty, \tag{1}$$

$$x(0) = x(2\pi), \tag{2}$$

где $a(s) \in C_{2\pi}$ и $y(s) \in L_2(0,2\pi)$ — данные вещественные 2π–периодические функции, а ε — произвольный (в том числе малый) отличный от нуля вещественный параметр. Функция $x = x(s)$ ищется в лебеговом пространстве 2π–периодических функций $L_2 = L_2(0,2\pi)$ с обычными нормой и скалярным произведением (см., напр., [2], с.25).

В этой работе докажем теоремы об ограниченной (т.е. непрерывной) обратимости оператора $K: L_2 \to L_2$; они обеспечивают существование, единственность и в определённом смысле устойчивость решения краевой задачи (1)–(2).

С этой целью нам понадобятся свойства вспомогательной краевой задачи: (2),

$$Gx \equiv \varepsilon x'(s) + \alpha x(s) = y(s), \quad -\infty < s < \infty, \tag{3}$$

где α — положительная вещественная постоянная, выбираемая ниже в зависимости от свойств функции $a(s) \in C_{2\pi}$ из (1). Для вспомогательной задачи (3), (2) справедливы следующие леммы

Лемма 1. *Оператор $G: L_2 \to L_2$ имеет обратный $G^{-1}: L_2 \to L_2$, который можно определить по формуле*

$$G^{-1}(y;s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{c_k(y)}{\alpha + ik\varepsilon} e^{iks}, \tag{4}$$

причём для любых $\varepsilon \in \boldsymbol{R}$ *справедливы неравенства*

$$\| G^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \leq \max_{k \in \boldsymbol{Z}} \sqrt{\frac{1}{\alpha^2 + k^2\varepsilon^2}} \leq \frac{1}{\alpha} < \infty, \tag{5}$$

где $c_k(y)$, $k \in \boldsymbol{Z}$, — коэффициенты Фурье в комплексной форме функции $y(s) \in L_2$.

Доказательство. Функции $x(s)$ и $y(s) \in L_2$ представим в виде рядов Фурье в комплексной форме:

$$x(s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(x) e^{iks}, \quad y(s) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k(y) e^{iks}. \tag{6}$$

Подставляя (6) в (3), получаем

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty}(\alpha+ik\varepsilon)c_k(x)e^{iks}=\sum_{k=-\infty}^{\infty}c_k(y)e^{iks}.$$

Отсюда, учитывая полноту линейно независимой системы функций e^{iks}, где $k=0,\pm1,...$, находим

$$c_k(x)=\frac{c_k(y)}{\alpha+ik\varepsilon},\quad k=0,\pm1,.... \tag{7}$$

Из соотношений (6) и (7) следует обратимость оператора $G:L_2\to L_2$ и справедливость формулы (4).

Далее из (4) с помощью равенства Парсеваля для любой $y(s)\in L_2$ находим

$$\|G^{-1}y\|_{L_2}^2=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|\frac{c_k(y)}{\alpha+ik\varepsilon}\right|^2=\sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{|c_k(y)|^2}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\le$$

$$\le\max_{k\in Z}\frac{1}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\sum_{k=-\infty}^{\infty}|c_k(y)|^2=\frac{1}{\alpha^2}\|y\|_{L_2}^2. \tag{8}$$

Отсюда следуют неравенства (5).

Лемма 2. *Справедливы неравенства*

$$\|G^{-1}\|_{L_2\to C_{2\pi}}\le\frac{1}{\alpha}+\frac{\pi}{\varepsilon}<\infty. \tag{9}$$

Доказательство. Воспользуемся формулой (4), рассматривая G^{-1} как оператор из L_2 в $C_{2\pi}$. Тогда, используя неравенство Коши–Буняковского для сумм и равенство Парсеваля, равномерно относительно $s\in(-\infty,\infty)$ находим

$$|G^{-1}(y;s)|\le\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|\frac{c_k(y)}{\alpha+ik\varepsilon}\right|\le\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{1}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\right\}^{1/2}\left\{\sum_{k=-\infty}^{\infty}|c_k(y)|^2\right\}^{1/2}=$$

$$=\left\{\frac{1}{\alpha^2}+2\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\right\}^{1/2}\|y\|_{L_2}\le\left(\frac{1}{\alpha}+\frac{\pi}{\varepsilon}\right)\|y\|_{L_2},\quad y\in L_2. \tag{10}$$

Из соотношений (10) следуют неравенства (9).

Лемма 3. *Справедливы неравенства*

$$\|G^{-1}\|_{L_2\to W_2^1}\le\max\left(\frac{1}{\alpha};\frac{1}{\varepsilon}\right), \tag{11}$$

где $W_2^1=W_2^1(0,2\pi)$ *— пространство Соболева с нормой*

$$\|f\|_{W_2^1}=\|f\|_{L_2}+\|f'\|_{L_2},\quad f\in W_2^1. \tag{12}$$

Доказательство. Для любой функции $y(s)\in L_2$ из (4) находим

$$\frac{d}{ds}G^{-1}(y;s)=\sum_{\substack{k=-\infty\\k\neq0}}^{\infty}\frac{ik\,c_k(y)}{\alpha+ik\varepsilon}e^{iks}.$$

Тогда, в силу равенства Парсеваля, имеем

$$\left\|\frac{d}{ds}G^{-1}(y;s)\right\|_{L_2}^2=\sum_{\substack{k=-\infty\\k\neq0}}^{\infty}\left|\frac{k}{\alpha+ik\varepsilon}\right|^2|c_k(y)|^2=\sum_{\substack{k=-\infty\\k\neq0}}^{\infty}\frac{k^2}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}|c_k(y)|^2\le$$

$$\le\max_{k\in N}\frac{k^2}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\sum_{\substack{k=-\infty\\k\neq0}}^{\infty}|c_k(y)|^2\le\frac{1}{\varepsilon^2}\|y\|_{L_2}^2,\quad y\in L_2. \tag{13}$$

Из соотношений (5), (12) и (13) следуют требуемое неравенство (11).

Обозначим через x_ε решение краевой задачи (2), (3), а через x_0 — решение вырожденной задачи (2), (3) при $\varepsilon=0$. Тогда имеем

$$x_\varepsilon=G^{-1}y,\quad x_0=\frac{y}{\alpha}. \tag{14}$$

Лемма 4. *Справедливо предельное соотношение*

$$\lim_{\varepsilon\to0}x_\varepsilon(s)=x_0(s)\ \text{в}\ L_2(0,2\pi) \tag{15}$$

равномерно относительно $\varepsilon\in\boldsymbol{R}$.

Доказательство. Из соотношений (4) и (14) находим

$$\|x_\varepsilon - x_0\|_{L_2}^2 = \left\|G^{-1}y - \frac{y}{\alpha}\right\|_{L_2}^2 = \left\|\sum_{k=-\infty}^{\infty}\left(\frac{1}{\alpha+ik\varepsilon}-\frac{1}{\alpha}\right)c_k(y)e^{iks}\right\|_{L_2}^2 =$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty}\left|\frac{1}{\alpha+ik\varepsilon}-\frac{1}{\alpha}\right|^2|c_k(y)|^2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{\varepsilon^2k^2}{\alpha^2(\alpha^2+k^2\varepsilon^2)}|c_k(y)|^2 =$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty}\left(\frac{1}{\alpha^2}-\frac{1}{\alpha^2+k^2\varepsilon^2}\right)|c_k(y)|^2 \equiv \Theta(\alpha,\varepsilon).$$

Ряд для $\Theta(\alpha,\varepsilon)$ сходится равномерно относительно $\varepsilon \in \boldsymbol{R}$:

$$\Theta(\alpha,\varepsilon) = \sum_{k=-\infty}^{\infty}\frac{\varepsilon^2k^2}{\alpha^2(\alpha^2+k^2\varepsilon^2)}|c_k(y)|^2 \le$$

$$\le \max_{k\in\boldsymbol{N}}\frac{\varepsilon^2k^2}{\alpha^2(\alpha^2+k^2\varepsilon^2)}\sum_{k=-\infty}^{\infty}|\,c_k(y)|^2 \le \frac{1}{\alpha^2}\,\|\,y\,\|_{L_2}^2, \quad y\in L_2; \tag{16}$$

поэтому из (16) следует формула (15).

Заметим, что соотношение (15) в пространстве W_2^1 уже не имеет места.

Для периодической краевой задачи (1)–(2) справедлива следующая

Теорема 1. *Пусть для краевой задачи (1)–(2). выполняется условие*

$$a(s) \ge \gamma^2 = const > 0, \quad -\infty < s < \infty. \tag{17}$$

Тогда оператор $K\colon L_2 \to L_2$ *имеет непрерывный обратный и*

$$\|\,K^{-1}\,\| \le \min\{\gamma^{-2}, (\|\,a\,\|_{C_{2\pi}} - \|\,a\,\|_{C_{2\pi}} - a\,\|_{C_{2\pi}})^{-1}\}. \tag{18}$$

Доказательство. Для любой функции $x \in D(K) \subset L_2(0,2\pi)$ с учётом периодичности находим

$$(Kx,x) = (\varepsilon x',x) + (ax,x) = \varepsilon(x',x) + (a,|x|^2) = \frac{\varepsilon}{2\pi}\int_0^{2\pi} x'(s)x(s)ds +$$

$$+\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} a(s)|x(s)|^2ds = \frac{\varepsilon}{2\pi}\frac{x^2(s)}{2}\Big|_0^{2\pi} + \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} a(s)|x(s)|^2ds =$$

$$= \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} a(s)|x(s)|^2ds \ge \gamma^2\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}|\,x(s)|^2ds = \gamma^2\,\|\,x(s)\,\|_{L_2}^2, \quad x\in D(K)\subset L_2.$$

Отсюда следует неравенство

$$\|\,Kx\,\| \ge \gamma^2\,\|\,x\,\|, \quad x\in D(K)\subset L_2, \tag{19}$$

которое обеспечивает существование ограниченного левого обратного оператора $K_l^{-1}\colon L_2 \to L_2$ и справедливость оценки

$$\|\,K_l^{-1}\,\| \le \gamma^{-2} < \infty. \tag{20}$$

Оператор K из (1)–(2) представим в виде

$$Kx \equiv Gx + Tx = y \quad (x,y\in L_2), \tag{21}$$

где

$$Gx \equiv \varepsilon x'(s) + \alpha x(s), \quad Tx \equiv [a(s)-\alpha]x(s). \tag{21_1}$$

В силу леммы 1 уравнение (21) эквивалентно уравнению

$$Ax \equiv x + G^{-1}Tx = G^{-1}y \quad (x, G^{-1}y \in L_2), \tag{22}$$

причём в силу (5) и (21_1) для любого $x \in L_2$ имеем

$$\|\,G^{-1}Tx\,\|_{L_2} \le \|\,G^{-1}\,\|_{L_2\to L_2}\|\,Tx\,\|_{L_2\to L_2} \le$$

$$\le \frac{1}{\alpha}\,\|\,(a-\alpha)x(s)\,\|_{L_2} \le \frac{\|\,a(s)-\alpha\,\|_{C_{2\pi}}}{\alpha}\,\|\,x\,\|_{L_2}.$$

Отсюда следует, что

$$\|\,G^{-1}T\,\|_{L_2\to L_2} \le \frac{\|\,a(s)-\alpha\,\|_{C_{2\pi}}}{\alpha} = \left\|1-\frac{a(s)}{\alpha}\right\|_{C_{2\pi}}. \tag{23}$$

Поскольку $\alpha \neq 0$ — произвольный параметр, то, полагая $\alpha = \|\,a\,\|_{C_{2\pi}} = \max_s|\,a(s)|$, из (23) и (17) находим

$$\|\,G^{-1}T\,\|_{L_2\to L_2} \le \left\|1-\frac{a(s)}{\|\,a\,\|_{C_{2\pi}}}\right\|_{C_{2\pi}} \equiv q < 1. \tag{24}$$

Из (22) и (24) с учётом принципа сжатых отображений в полном линейном нормированном

пространстве $L_2 = L_2(0,2\pi)$ следует, что оператор $A: L_2 \to L_2$ непрерывно обратим и

$$\| A^{-1} \| \leq (1-q)^{-1} < \infty, \quad A^{-1}: L_2 \to L_2. \tag{25}$$

Поскольку $A = G^{-1}K$, то $K^{-1} = A^{-1}G^{-1}$ и в силу (5) и (25)

$$\| K^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \leq \| A^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \| G^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \leq \frac{1}{\alpha(1-q)} = \frac{1}{\| a \|_{C_{2\pi}} (1-q)} < \infty. \tag{26}$$

Из неравенств (20) и (26) следует требуемое утверждение.

2. Итерационный метод.

В условиях теоремы 1 периодическая краевая задача (1)–(2) имеет единственное периодическое решение $x^* \in L_2(0,2\pi)$. Его будем искать итерационным методом

$$Gx_k + Tx_{k-1} = y, \quad k = 1,2, \ldots, \tag{27}$$

где $x_0 \in L_2(0,2\pi)$ — произвольное начальное приближение.

Справедлива следующая

Теорема 2. *В условиях теоремы 1 итерационный метод (27) сходится к единственному решению x^* задачи (1)–(2) со скоростью*

$$\| x^* - x_k \| \leq q^k \| x^* - x_0 \| \leq \frac{q^k}{1-q} \| x_1 - x_0 \|, \quad k = 1,2, \ldots, \tag{28}$$

где

$$q = \left\| 1 - \frac{a(s)}{\| a \|_{C_{2\pi}}} \right\|_{C_{2\pi}} < 1. \tag{29}$$

Если же начальное приближение $x_0 \in L_2$ выбирается по формуле $x_0 = G^{-1}y$, то погрешность k–го приближения оценивается неравенством

$$\| x^* - x_k \| \leq \frac{q^{k+1}}{\| a \|_{C_{2\pi}} (1-q)} \| y \|_{L_2}, \quad k = 1,2, \ldots. \tag{30}$$

Доказательство. В силу леммы 1 краевая задача (1)–(2) и итерационный метод (27) эквивалентны соответственно уравнению (22) и итерационному методу

$$x_k + G^{-1}Tx_{k-1} = G^{-1}y, \quad k = 1,2, \ldots, \tag{31}$$

точнее,

$$x_k(s) = G^{-1}(y;s) - G^{-1}([a(s) - \alpha]x_{k-1}(s);s) \tag{31_1}$$

Очевидно, что метод (31) является методом простой итерации для уравнения второго рода (22), эквивалентного краевой задаче (1)–(2). При доказательстве теоремы 1 показано, что оператор $G^{-1}T: L_2 \to L_2$ является оператором сжатия (см. неравенства (24)). Поэтому требуемое утверждение с оценками (28) следует из известных результатов по методу последовательных приближений для операторных уравнений второго рода в полных пространствах (см., напр., стр.213–214 книги [3]).

Для получения оценок (30) заметим, что в силу (31), леммы 1 и теоремы 1 имеем

$$\| x_1 - x_0 \| = \| G^{-1}Tx_0 \| = \| G^{-1}TG^{-1}y \| \leq \| G^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \| T \|_{L_2 \to L_2} \times$$
$$\times \| G^{-1} \|_{L_2 \to L_2} \| y \|_{L_2} \leq \frac{\| a(s) - \alpha \|_{C_{2\pi}} \| y \|_{L_2}}{\| a \|^2_{C_{2\pi}}} \leq \frac{q}{\| a \|_{C_{2\pi}}} \| y \|_{L_2}. \tag{32}$$

Из (28), (29) и (32) следует оценка (30).

Теорема 2 доказана. Относительно неё следует отметить, что, как видно из соотношений (28)–(30), итерационный метод (27) или, что одно и то же, метод (31), (31_1), сходится к единственному решению x^* краевой задачи (1)–(2) равномерно относительно $\varepsilon \in \boldsymbol{R}$ (см. лемму 4).

Заметим также, что если $a(s) < 0$ для всех $s \in (-\infty, \infty)$, то в теоремах 1 и 2 в качестве α следует брать $\alpha = -\| a \|_{C_{2\pi}}$.

Список литературы

1. *Габдулхаев Б.Г.* Оптимальные аппроксимации решений линейных задач. – Казань: Изд–во Казан. ун–та, 1980. – 232 с.

2. *Абрамова В.В.* Решение периодических интегральных уравнений типа свёртки с положительными операторами. Научно-технический вестник Поволжья – №3,2015.–С. 25-28.

3. *Канторович Л.В., Акилов Г.П.* Функциональный анализ в нормированных пространствах. – М.: Физматгиз, 1959. – 684 с.

01.04.02

Н.Т. Валишин к.ф-м.н.

Казанский национальный исследовательский технический университет-КАИ им. А.Н. Туполева, кафедра специальной математики, Казань, vnailt@yandex.ru

МЕТОД V-ФУНКЦИИ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ

На базе метода V-функции проводится оптико-механическая аналогия на уровне волной оптики. Показывается, что оптико-механическая аналогия получает новое продолжение по сравнению с известными оптико-механическими аналогиями. Полученные результаты сравниваются с известными результатами Луи де Бройля и Шредингера.

Ключевые слова: *вариационный принцип, волновое движение, волновое уравнение, оптико-механическая аналогия.*

На аналогию движения механических консервативных систем и распространения световых лучей в оптически неоднородной среде первым обратил внимание Гамильтон [1]. Так из стационарного уравнения Гамильтона-Якоби, записанного для одной частицы:

$$\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial W}{\partial q_i}\right)^2 = 2m(E-U), \tag{1}$$

где $U(q)$ – потенциальная энергия частицы, E – полная энергия частицы, m – масса частицы; и уравнения эйконала, описывающего распространение светового луча:

$$\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{\partial \varphi}{\partial q_i}\right)^2 = \frac{\nu^2 n^2}{c^2} = \frac{1}{\lambda^2}, \tag{2}$$

где $\varphi(q)$ – функция эйконала – фаза световой волны, ν – частота монохроматической световой волны, n – показатель преломления среды, c – скорость света, λ – длина световой волны, следует, что эти уравнения сходны по внешнему виду.

Аналогия на уровне геометрической оптики дает право рассматривать элемент траектории движения частицы как нормаль к некоторой волновой поверхности - поверхности, так называемых, "волн действия". Такое название исходит из того, что поверхность равного действия $W(q) = const$, которую можно отождествить поверхностью равной фазы $\varphi(q) = const$ световой волны, перемещается с некоторой скоростью u , что и дает возможность рассматривать ее движение как волнообразное распространение действия. Для определения скорости распространения такой волны, рассмотрим некоторую поверхность равного действия $S(q,t) = const$. Для такой поверхности будем иметь:

$$dS = Edt - dW = Edt - \left|\frac{\partial W}{\partial q}\right| ds = 0 \tag{3}$$

Из (3) следует:

$$u = \frac{ds}{dt} = \frac{E}{\left|\frac{\partial W}{\partial q}\right|} = \frac{E}{\sqrt{2m(E-U)}} = \frac{E}{|p|} \tag{4}$$

т.е. скорость распространения “волны действия” обратно пропорционально величины скорости частицы.

Новый свет пролил в оптико-механическую аналогию Л. де Бройль, рассматривая соответствие волны и частицы на основе уравнений (1) и (2), и на основе вариационных принципов Мопертюи и Ферма [2]. Именно оптико-механическая аналогия на уровне геометрической оптики позволила Л.де Бройлю установить волновые свойства материи, а Шредингеру - постулировать свое волновое уравнение [3].

В данной работе задача оптико-механической аналогии рассматривается на базе метода V-функции, который состоит из локального вариационного принципа (ЛВП), базовых теорем и

новой постановки прямой и обратной задачи динамики. Метод V-функции в свою очередь опирается на концепцию процесса-состояния [4], где состояние определяется траекторными уравнениями движения объекта, а процесс перехода из одного состояния в другое принимает волновой характер.

Формулировка локального вариационного принципа (ЛВП) [5-7]:

Из всех возможных переходов в новое состояние осуществляется тот, при котором в каждый момент времени быстрота изменения волновой функции V(x,t) принимает стационарное значение

$$\delta\left(\frac{dV}{dt}\right) = 0 \tag{5}$$

где $\delta(.)$ - операция изохронной вариации; волновая функция есть кусочно-непрерывная *V*-функция, удовлетворяющая уравнению:

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} - \sum_{i,j=1}^{n} \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x_i \partial x_j} f_i(x) f_j(x) = \sum_{i=1}^{n} \frac{\partial V(x,t)}{\partial x_i} \frac{df_i(x)}{dt} \tag{6}$$

$f(x)$ — *n*-мерный вектор правых частей уравнений движения объекта:

$$\dot{x} = f(x) \tag{7}$$

где *x* - *n*-мерный вектор фазовых координат.

Теорема I. *Для перехода в новое состояние необходимо и достаточно существование V-функции, удовлетворяющей условию:*

$$\Delta\left(\frac{dV}{dt}\right) = 0. \tag{8}$$

где $\Delta(.) = \delta(.) + \frac{d}{dt}(.)\Delta t,$ – операция полной вариации.

Теорема II *Движение объекта (7) происходит так, что в каждый момент времени вектор фазовой скорости сонаправлен с градиентом волновой функции т.е.*

$$\frac{\partial V}{\partial x}^T f = \left|\frac{\partial V}{\partial x}\right| |\dot{x}|. \tag{9}$$

Рассмотрим свободное прямолинейное движение частицы со скоростью $\dot{x} = \vartheta$, т.е. частный случай уравнений движения (7). Траекторному движению частицы, как следует из (6) соответствует волновое движение, удовлетворяющее волновому уравнению:

$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} \vartheta^2 = 0. \tag{10}$$

Получается волновое уравнение, встречаемое нами в теории упругости, акустике, электродинамике. Здесь ϑ – скорость движения частицы и скорость распространения волны одновременно.

Начальные и граничные условия для (6) определяются из теорем I, II и из условия связанности волновой функции *V(x,t)* с траекторией движения динамической системы(7). Условия связанности дают начальное и граничное условия для волновой функции:

$$V(x,t)\big|_{t=0} = V(x,0) = 0; \quad V(x,t)\big|_{x=0} = V(0,t) = 0 \tag{11}$$

Из теорем I и II следуют два других условия. Из условия теоремы I

$$\Delta\left(\frac{dV}{dt}\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial x}^{\mathrm{T}} \delta x\right) + \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x}^{\mathrm{T}} \dot{x}\right) dt = 0 \tag{12}$$

с учетом того, что

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial x}^T \delta x\right) = \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial V}{\partial x}^T \dot{x}\varepsilon\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial V}{\partial x}^T \dot{x} = const. \tag{13}$$

следует равенство:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = const \tag{14}$$

Тогда второе начальное условие для уравнения (10) будет иметь вид:

$$\left.\frac{\partial V(x,t)}{\partial t}\right|_{t=0} = \frac{\partial V(x,0)}{\partial t} = const \tag{15}$$

Из условия теоремы II следует

$$\frac{\partial V}{\partial x} = k^{-1}\dot{x}, \tag{16}$$

Отсюда получается второе краевое условие:

$$\left.\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}\right|_{x=0} = \frac{\partial V(0,t)}{\partial x} = k^{-1}\dot{x}(t) = k^{-1}f(x), \tag{17}$$

Для случая $\dot{x} = \vartheta$ получаем решение уравнения (10) с учетом (11), (15), (17) в следующем виде:

$$V(x,t) = \pm\frac{\vartheta K_2 K_1}{\omega^2} e^{\pm i(\frac{\omega}{\vartheta}x-\omega t)} = \pm A e^{\pm i(\frac{\omega}{\vartheta}x-\omega t)} \tag{18}$$

где $K_1 = const, \quad K_2 = k^{-1}\vartheta$.

Решение (18) должно удовлетворять также условию (14), т.е.

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial t} = \mp iA\omega e^{\pm i(\frac{\omega}{\vartheta}x-\omega t)} = const\cdot \tag{19}$$

Постоянная в правой части (14) есть действительное число. Поэтому для того, чтобы удовлетворить условию (14) фаза должна принимать значения:

$$\varphi = \left(\frac{\omega}{\vartheta}x - \omega t\right) = \omega\left(\frac{x}{\vartheta} - t\right) = \omega(t_1 - t) = \frac{\pi}{2} + \pi n \text{ , } (n=0,1,2,3....) \tag{20}$$

Так как скорость распространения волны ϑ постоянна для всех частот ω, то из (20) следует, что $t_1 - t = const_1 \quad \forall\omega$. Значит равенство (20) можно представить в виде:

$$\varphi = \omega\left(\frac{x}{\vartheta} - t\right) = \omega(t_1 - t) = \omega const_1 = \frac{\pi}{2}(1+2n), \tag{21}$$

Отсюда следует, что

$$\omega = \frac{\omega_0}{2}(1+2n) \tag{22}$$

Тогда (19) с учетом (20) и (22) будет иметь вид:

$$A\omega = A\frac{\omega_0}{2}(1+2n) = const \tag{23}$$

Это значит, что равенство (23) принимает только дискретные значения и движение частицы будет происходить вдоль направления перемещения фронта волны.

А из равенства (16) с учетом (18) следует

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x} = \pm i\frac{A\omega}{\vartheta} e^{\pm i(\frac{\omega}{\vartheta}x-\omega t)} = k^{-1}\vartheta, \tag{24}$$

Отсюда с учетом (19) получаем

$$\frac{\partial V(x,t)}{\partial x}\vartheta = k^{-1}\vartheta^2 = const\cdot \tag{25}$$

Пусть в (18) $A = \frac{h}{2\pi} = \hbar$, где h - постоянная Планка. Тогда из (23) следует правило квантования энергии, такое же, как у Шредингера в случае планковского осциллятора. При этом из (24) с учетом (20) получаем

$$\frac{\hbar\omega}{\vartheta} = k^{-1}\vartheta. \tag{26}$$

Отсюда с учетом размерности действия $[кг][м/с][м]$ следует, что $k^{-1} = m$, где m - масса частицы.

Используя полученные результаты, можно провести такие соответствия между волной и частицей

$$\vartheta = \vartheta; \qquad \lambda = \frac{h}{m\vartheta}; \qquad \omega = \frac{m\vartheta^2}{\hbar}; \qquad A = \hbar. \tag{27}$$

При этом волновые и траекторные измерения можно описать одной волновой функцией:

$$V(x,t) = \hbar e^{\pm i\frac{\hbar}{\hbar}(\frac{\omega}{\vartheta}x-\omega t)} = \hbar e^{\pm i\frac{1}{\hbar}(\frac{\hbar\omega}{\vartheta}x-\hbar\omega t)} = \hbar e^{\pm i\frac{1}{\hbar}(m\vartheta x-Et)} \tag{28}$$

В соотношениях (27) основным является равенство фазовой скорости волны и скорости частицы, в то время как в квантовой механике скорость частицы равна групповой скорости волн Л. де Бройля [8]. Условие же квантования энергии (23) получается естественным образом в результате удовлетворения решения (19) условиям теорем I и II.

Следует также отметить, что желание Л.де Бройля преодолеть дуализм волны-частицы через концепцию волна-пилот, здесь находит обоснование через продолжение оптико-механической аналогии. При этом сама волновая функция *V(x,t)* не только как-то связана с движением частицы, а непосредственно выражает само движение, которое всегда имеет волновой характер.

Список литературы

1. *Полак Л.С.* Вариационные принципы механики и их развитие в физике. М.: Гос.издат. физ.-мат.лит.,1960. 599с.

2. *Л.де Бройль* Исследования по теории квантов. // Вариационные принципы механики. Сборник статей. М.: Гос.издат. физ.-мат.лит.,1959. С.641-667.

3. *Шредингер Э.* Квантование как задача о собственных значениях // Вариационные принципы механики. Сборник статей. М.: Гос.издат. физ.-мат.лит., 1959. С.668-704.

4. *Валишин Ф.Т.* Проблема методологии в концепции динамизма. // Методологические концепции и школы в СССР. Новосибирск 1992. С.151-154.

5. *Валишин Н.Т.* Локальный вариационный принцип: к новой постановке прямой и обратной задачи динамики. Дисс. канд. физ.-мат. наук, Казань, 1998. 111с.

6. *Valishin N.T, Valishin F.T., Moiseev S.A.* Trajectory-Wave Approach to Electron Dynamics in Hydrogen Atom. // Cornell University Library, 2011, arXiv: quant-ph/1102.1654v1.

7. *Валишин Н.Т.* Вариационный принцип и задачи траекторно-волновой динамики. // Вестник КНИТУ-КАИ – 2014. №2. С.181-190.

8. *Л. де Бройль.* Соотношения неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. М.: Мир, 1986. 344с.

01.01.02

Х.Ш. Джураев

Таджикский национальный университет,
физический факультет, кафедра вычислительные машины, системы и сети,
Таджикистан, Душанбе, hayrullo_58@mail.ru

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Рассматривается проблема устойчивости задачи Коши для уравнения Гельмгольца с применением преобразования Фурье. Построен класс приближенного решения в виде регуляризирующего оператора, обладающего свойством устойчивости к малым отклонениям исходных данных. При этом важную роль играют выбор сглаживающей функции и условия согласования параметра регуляризации с погрешностью.

Ключевые слова: *сглаживающая функция; параметр регуляризации; устойчивость; семейство регуляризирующих операторов; некорректность.*

1. Рассмотрим задачу построения решения уравнения

$$\Delta u + \lambda^2 u = 0\,,\ \lambda = const \qquad (1)$$

в $D = \{(x, y) : x \in R = (-\infty, \infty),\ y > 0\}$, удовлетворяющего следующим условиям:

$$u(x,0,\lambda) = \varphi(x),\quad \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{y=0} = \psi(x)\,. \qquad (2)$$

Здесь $\Delta = \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + \dfrac{\partial^2}{\partial y^2}$ -оператор Лапласа, а $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ -заданные функции.

Уравнение (1) определяет класс эллиптических уравнений, для которых задача (1)-(2) может быть решена методом, сводящим задачу Коши к задаче «аналитического продолжения». Если $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ аналитические функции и аналитически продолжимы, то согласно фундаментальной теории уравнений в частных производных (см. [1], стр. 19-29), аналитическое продолжение осуществимо и единственно. Однако можно построить пример, подобный примеру Адамара для уравнения Лапласа, который показывает, что полученное продолжение будет неустойчивым к малым изменениям исходных данных. Поэтому задача (1)-(2) относится к числу некорректно поставленных задач.

Формула, позволяющая находить решения эллиптического уравнения в случае, когда начальные данные известны лишь на части границы области, получили название формул типа Карлемана. Формула типа Карлемана, в которой используется фундаментальное решение дифференциального оператора со специальными свойствами (функция Карлемана), была получена М.М.Лаврентьевым [2]. Применяя этот метод, в [3] рассмотрено решение задачи Коши для уравнения Гельмгольца и для построения регуляризирующего алгоритма использовании классической формулы Грина.

В настоящей заметке, которая примыкает к [4-6], в пространстве Шварца исследована задача Коши для уравнения Гельмгольца в полуплоскости. Методом преобразования Фурье в пространстве Шварца получены необходимые и достаточные условия разрешимости, связывающие начальные функции. Построены семейства регуляризирующих алгоритмов решения, обладающих свойством устойчивости к малым изменениям исходных данных на основе метода регуляризации [7].

2. Пусть мы имеем задачи (1)-(2) и функци $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ удовлетворяют следующим условиям: а) $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ бесконечно дифференцируемые функции; б) производные $\varphi^{(k)}(x)$ и $\psi^{(k)}(x)$ $(k = 0, 1, 2, \cdots)$ стремятся к нулю при $|x| \to \infty$ быстрее любой отрицательной степени $|x|$.

В общем случае, когда $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ только ограничены, мы будем рассматривать их как функционал над пространством $S(R)$ ($S(R)$ – пространства Шварц).

Выполним в (1)-(2) преобразование Фурье по x. В силу условий а)-б) и свойства преобразования Фурье в пространства Шварца, аналогично [8], будем иметь решение в виде:

$$u(x,y,\lambda)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\left(\Phi(s)Ch(y\sqrt{s^2-\lambda^2})+\Psi(s)\frac{Sh(y\sqrt{s^2-\lambda^2})}{\sqrt{s^2-\lambda^2}}\right)\exp(ixs)ds. \qquad (3)$$

Здесь $\Phi(s)$ и $\Psi(s)$ -преобразования Фурье функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ соответственно.

Если $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ из класса $S(R)$, то $u(x,y,\lambda)$ вида (3) дает искомое решение в пространстве $S(R)$. Однако можно указать начальные условия, то есть функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$, которые не обладают свойствами а)-б). Например, зададим графики начальной функции в виде ломаной линии. Она не обладает свойством бесконечной дифференцируемости. Следуя методу регуляризации В.Я. Арсенина (см. [7]), построим класс устойчивых решений задачи (1)-(2).

Для каждой заданной сглаживающей функции $g(s,\alpha)$ рассмотрим функцию вида

$$u_\alpha(x,y,\lambda)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}g(s,\alpha)\vartheta(s,y,\lambda)\exp(ixs)ds, \qquad (4)$$

где $\vartheta(s,y,\lambda)$ – преобразование Фурье функции $u(x,y,\lambda)$ по x, и имеет вид подынтегральной функции (3).

Понятие условия стабилизации и согласования параметра регуляризации α для задачи (1)-(2) введем следующим образом.

Определение 1. *Функция $u_\alpha(x,y,\lambda)$ называется приближенным решением задачи Коши для уравнения Гельмгольца в окрестности заданной точности условия Коши в $S(R)$, если существует функционал $p(y,\lambda,\alpha)$ из $C^{\infty,2}(D,q)$, удовлетворяющий условию*

$$|u_\alpha(x,y,\lambda)-u(x,y,\lambda)|\le p(y,\lambda,\alpha)$$

для любого $\alpha\in(o,\alpha_0]$ и $p(y,\lambda,\alpha)\to 0$ при $\alpha\to 0$ для всякого $y>0$ и $\lambda\ne 0$.

Здесь α - параметр регуляризации, а $u(x,y,\lambda)$ - точное решение задачи Коши для уравнения Гельмгольца, α_0 и y - заданные числа ($\alpha_0>0$).

Определение 2. *Функция $\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)$ называется вполне приближенным решением задачи Коши для уравнения Гельмгольца в δ-окрестности заданной точности условия Коши в $S(R)$, если существует функционал $c(y,\lambda,\alpha,\delta)$ из $C^{\infty,2}(D,q)$ удовлетворяющий условию*

$$|\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)-u_\alpha(x,y,\lambda)|\le c(y,\lambda,\alpha,\delta)$$

для любого $\alpha\in(o,\alpha_0]$ и $c(y,\lambda,\alpha,\delta)\to 0$, $\alpha(\delta)\to 0$ при $\delta\to 0$ для всякого $y>0$ и $\lambda\ne 0$. Здесь $\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)$ функция с заменой начальных данных $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ на их δ-приближения $\tilde{\varphi}(x)$ и $\tilde{\psi}(x)$ соответственно.

Предположим, что $g(s,\alpha)$ - некоторая заданная функция, обладающая свойствами: 1) $g(s,\alpha)$ определена в области $\{\alpha\ge 0,-\infty<s<\infty\}$; 2) $0\le g(s,\alpha)\le 1$ для всех значений $\alpha\ge 0$ и $s\in(-\infty,\infty)$; 3) $g(s,0)\equiv 1$; 4) для всякого $\alpha>0$ $g(s,\alpha)$ четная по s и $g(s,\alpha)\in L_2(-\infty,\infty)$; 5) для любого $\alpha>0$ $g(s,\alpha)\to 0$ при $|s|\to\infty$; 6) при $\alpha\to 0$ $g(s,\alpha)\to 1$, не убывая, причем на всяком отрезке $|s|\le s_1$, эта сходимость равномерная; 7) для любого $s\ne 0$ $g(s,\alpha)\to 0$ при $\alpha\to\infty$ и эта сходимость равномерная на каждом отрезке $[s_1,s_2]$; 8) для всякого $\alpha>0$ $g(s,\alpha)Ch\left(y\sqrt{s^2-\lambda^2}\right)$, $g(s,\alpha)\frac{Sh\left(y\sqrt{s^2-\lambda^2}\right)}{\sqrt{s^2-\lambda^2}}$ принадлежат $L_2(-\infty,\infty)$ при любом фиксированном $y>0$.

Этим условиям отвечает, например, стабилизирующий множитель (фактор) $g(s,\alpha)=\exp\left(-(\alpha\cdot s)^{2n}\right)$, $g(s,\alpha)=\exp\left(-\alpha\left(\sqrt{s^2-\lambda^2}\right)^n\right)$ $(n\geq 1)$.

Теорема 1. *Если стабилизирующий множитель* $g(s,\alpha)$ *удовлетворяет свойством 1)-8), то для любого фиксированного* $y>0$ *и* $\lambda\neq 0$ *функция* $u_\alpha(x,y,\lambda)$ *вида (4) является регуляризирующим решением для задачи (1)-(2) и имеет место оценка*

$$\left|u_\alpha(x,y,\lambda)-u(x,y,\lambda)\right|\leq\frac{2\varepsilon}{3},$$

где $u(x,y,\lambda)$ *- точное решение задачи (1)-(2) вида (3).*

Теорема 2. *Пусть вместо функций* $\varphi(x)$ *и* $\psi(x)$ *известны их* δ *-приближения* $\tilde{\varphi}(x)$ *и* $\tilde{\psi}(x)$ *из* $S(R)$ $(L_2(R))$ *и* $y>0$, $\lambda\neq 0$ *заданное число. Тогда имеет место оценка*

$$\left|\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)-u_\alpha(x,y,\lambda)\right|\leq c(y,\lambda,\alpha,\delta).$$

Здесь $c(y,\lambda,\alpha,\delta)=\delta\cdot\left(\sqrt{\omega(y,\lambda,\alpha)}+\sqrt{l(y,\lambda,\alpha)}\right)$, *а* $\omega(\alpha,y,\lambda)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\left|g(s,\alpha)Ch\left(y\sqrt{s^2-\lambda^2}\right)\right|^2 ds$,

$l(\alpha,y,\lambda)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\left|g(s,\alpha)\dfrac{Sh\left(y\sqrt{s^2-\lambda^2}\right)}{\sqrt{s^2-\lambda^2}}\right|^2 ds.$

Теорема 3. *Если* $\alpha=\alpha(\delta)$ *есть корень уравнения*

$$\sqrt{\omega(\alpha,y,\lambda)}+\sqrt{l(\alpha,y,\lambda)}=\frac{\varepsilon}{3\sqrt{\delta}},$$

то имеет место сходимость приближенного решения $\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)$ *вида (4) задачи (1)-(2) к точному решению* $u(x,y,\lambda)$ *вида (3) при* $\delta\to 0$, *то есть выполняется равенство* $\lim\limits_{\delta\to 0}\tilde{u}_\alpha(x,y,\lambda)=u(x,y,\lambda)$.

Доказательство этих теорем не приводим, поскольку в идейном отношении повторяют схему доказательствах аналогичных теоремах 1-3 работах [4,6].

Список литературы

1. *Михайлов В.П.* Дифференциальные уравнения в частных производных. –М.: Наука, 1976, – 392 с.

2. *Лаврентьев М.М.* О некоторых некорректных задачах математических физики. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962, –93 с.

3. *Исломов И.О.* О задаче Коши для уравнения Гельмгольца //Автореф. дис. канд.физ.мат.наук. –Новосибирск. 1986, –16 с.

4. *Джураев Х.Ш.* Об одном подходе к проблеме регуляризации задачи Коши для уравнения Эйлера-Пуассона-Дарбу // Дифференциальные уравнения, -2007, -Т.43, №5. –С.726-733.

5. *Джураев Х.Ш.* Регуляризация краевых задач для гиперболического уравнения. //Научно-технический вестник Поволжья, 2011, № 6. –С.33-36.

6. *Джураев Х.Ш.* Регуляризация граничных задач для гиперболического уравнения. //Математические заметки, 2013, выпуск 2, № 1. –С.202-209

7. *Арсенин В.Я.* Об одном способе приближенных решений интегральных уравнений первого рода типа сверток. // Математическая логика, теория алгоритмов и теория множеств. –Труды МИ АН СССР. –М.: Наука, 1973. –Т.133. –С. 33-51.

8. *Джураев Х.Ш.* Об одном регуляризирующем алгоритме построения приближенных решений задачи Коши для уравнения Гельмгольца. //Докл. АН ТаджССР, 1991, № 2. –С. 77-79.

01.00.00

Х.Ш. Джураев, З.Д. Каримов, Б.И. Махсудов

Таджикский национальный университет,
физический факультет, кафедра вычислительные машины, системы и сети,
Таджикистан, Душанбе, hayrullo_58@mail.ru

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

В работе на основе математических методов решения уравнения математической физики, изучаются волноводные свойства многослойных квантоворазмерных гетероструктур. Приведены методы определения параметров постоянного распространения волноводной моды, компонента волнового вектора в k-ём слое, а также оптимизации параметров волновода.

Ключевые слова: *метод моделирующих функций, компонент волнового вектора, оптимизации параметров.*

1. Следуя работам [1-3], исследуем расчетное поле многослойной волноводной структуры. Многослойная волноводная структура, которая рассчитывается методом матриц переноса, схематично можно показать в виде: Рис. 1.

Метод матриц переноса [4-9] является широко распространенным методом расчета оптических полей в слоистых структурах.

В случае слоистой среды задача о нахождении СЗ уравнения

$$\frac{d^2\psi}{dx^2}+\left(\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon(x)-\beta^2\right)\psi(x)=0 \qquad (1)$$

для оптических [8] или поляритонных [5] мод сводится к перемножению матриц переноса через отдельные слои, из которых состоит структура. Для линейной среды матрицы переноса имеют размерность 2 x 2. Конкретный вид матриц определяется выбором пары параметров (базиса), описывающих электромагнитное поле. Наиболее часто в качестве базиса используются тангенциальные по отношению к границе раздела двух сред компоненты электрического и магнитного полей [7], либо амплитуды волн, распространяющихся в противоположных направлениях [6].

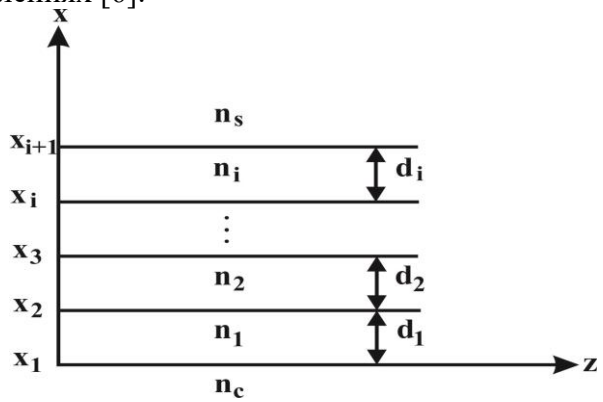


Рис.1. Многослойная волноводная структура, координаты, показатели преломления и толщины слоев, n_s, n_c - показатели преломления подложки и покрытия.

Согласно методу матриц переноса, мы характеризуем электромагнитное поле в каждом слое структуры амплитудами u и v, пропорциональными электрическому и магнитному полю, соответственно:

$$\frac{du}{dx}=v-\alpha u,$$
$$\frac{dv}{dx}=-\alpha v. \qquad (2)$$

где $u = E_y$, $v = \omega\mu H_z$, E_y и H_z компоненты оптического поля ТЕ - моды; μ - магнитная проницаемость (полагается в полупроводниках равной единице); $\alpha = \sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\,tg\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right)$; j - мнимая единица; $k_0 = \frac{\omega}{c}$ - волновое число в вакууме. Вид уравнений (1) и (2) выбран таким образом, чтобы поля E_y, H_z, и H_x удовлетворяли уравнениям Максвелла для ТЕ мод:

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\omega\mu H_z,$$
$$\beta E_y = -\omega\mu H_x,$$
$$\frac{\partial H_z}{\partial x} + j\beta H_x = -j\omega\varepsilon E_y.$$

Обе компоненты поля удовлетворяют уравнению, аналогичному (1):

$$\frac{d^2u}{dx^2} = \left(\beta^2 - n^2k_0^2\right)u. \qquad (1')$$

Величины u и v описывают поперечное распределение поля в каждом отдельном слое с показателем преломления n. Общее решение волнового уравнения для такого слоя записывается следующим образом:

$$u = A\cos\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right) + B\frac{\sin\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right)}{\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}}, \qquad (3)$$
$$v = \frac{C}{\cos\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right)},$$

где A, B и $C = B$ амплитуда падающей и отраженной волны на границе раздела слоев, $\sqrt{n_i^2k_0^2 - \beta^2}$ поперечная постоянная распространения в соответствующих слоях (i - номер слоя), или в подложке (s), или покрытии (c).

Для начала процесса расчёта задаём пробное значение постоянной распространения, а также полей на границе одного из полупространств u_0 и v_0. Положим, что волна попадает в волновод из покрытия, тогда поля в нём имеют следующие зависимости от x (падающее излучение):

$$u_c = A_c\cos\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right) + B_c\frac{\sin\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right)}{\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}},$$
$$v_c = \frac{B_c}{\cos\left(x\sqrt{n^2k_0^2 - \beta^2}\right)}.$$

Будем считать координату границы полупространства покрытия $x = 0$, тогда имеем соотношения: $u_0 = A_c$, $v_0 = B_c$ (поля на границе покрытия);

$u_0 = A_1$, $v_0 = B_1$ (поля на границе первого слоя).

Отсюда следует $u_0 = \frac{1}{2}[A_c + A_1]$, $v_0 = \frac{1}{2}[B_0 + B_1]$.

Обозначаем $L_i = d_i$ $(i = 1, 2, \cdots m)$. На границе следующих двух слоев значения полей примут вид

$$u_1 = A_1\cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right) + B_1\frac{\sin\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right)}{\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}}, \qquad (4)$$
$$v_1 = \frac{B_1}{\cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right)}.$$

Из этих соотношений получаем:

$$A_1 = \frac{u_1}{\cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right)} - \frac{v_1}{\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}}\sin\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right), \qquad (5)$$
$$B_1 = v_1\cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2 - \beta^2}\right).$$

Подставляя выражения (4), (5) в (3), получаем уравнение для нахождения полей u_1 и v_1 на границе слоя 1 и 2 через значения u_0 и v_0 на границе полупространства (c) и первого слоя:

$$\begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2-\beta^2}\right)} & \dfrac{\sin\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2-\beta^2}\right)}{\sqrt{n_1^2k_0^2-\beta^2}} \\ 0 & \cos\left(L_1\sqrt{n_1^2k_0^2-\beta^2}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \end{pmatrix}.$$

Далее мы записываем для каждого слоя матрицу переноса, с помощью которой осуществляется пересчет полей u_m и v_m с одной границы на другую, исходя из системы уравнений:

$$\begin{pmatrix} u_{m-1} \\ v_{m-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\cos\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right)} & \dfrac{\sin\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right)}{\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}} \\ 0 & \cos\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_m \\ v_m \end{pmatrix},$$

Или $\begin{pmatrix} u_m \\ v_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{\cos\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right)} & 0 \\ \dfrac{\sin\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right)}{\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}} & \cos\left(L_m\sqrt{n_m^2k_0^2-\beta^2}\right) \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_{m-1} \\ v_{m-1} \end{pmatrix}$, где m - номер слоя в структуре.

Таким образом, мы получаем амплитуды полей на границе последнего слоя с показателем преломления n_m и внешнего полупространства (подложки (s)). Критерием нахождения СЗ для волноводных мод считаем равенство нулю либо возрастающей по амплитуде (для волноводных мод), либо убывающей (для вытекающих мод) волны. Проходя диапазон возможных значений действительной части постоянной распространения $\mathrm{Re}(\beta)$ от максимально возможного $k_0 \cdot \mathrm{Re}(n_m)_{\max}$ до минимального $k_0\,\mathrm{Re}(n_m)_{\min}$ по действительной оси, мы определяем функцию $F(\beta)$, численно равную одной из рассчитанных амплитуд A_s или B_s в подложке. Тем самым из условий локальных минимумов функции $F(\beta)$ находим приближения к СЗ уравнения (1') для волноводных, или для вытекающих мод. К сожалению, такая процедура не позволяет точно рассчитывать мнимые части СЗ. Поэтому она применяется исключительно для нахождения начальных приближений, которые используем в более точном методе расчёта.

Список литературы

1. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. Изд.4-е. -М.: Наука, 1972, -736 с.

2. Волноводная оптоэлектроника //Под ред.Т.Тамира, М: Мир, 1991.

3. *Джураев Х.Ш. Каримов З.Д. Махсудов Б.И.* Метод модулирующих функций и его применение при изучении волноводных свойств многослойных гетероструктур //Вестник ТНУ, №3/1(134), с.70-76.

4. *В.И. Швейкин, В.А., Геловани*. Новые диодные лазеры с вытекающим излучением в оптическом резонаторе. // Квантовая электроника, 32, № 8, 2002, стр.683-688.

5. *Борн М., Вольф Э.* Основы оптики. –М.: Наука, 1970, -200 с.

6. *Елисеев П.Г., Богатов А.П., Махсудов Б.И*. Влияние температуры на диаграмму направленности InGaAs-гетеролазеров. // Квантовая электроника, т.15,№2,1988, стр. 253-258.

7. *Махсудов Б.И.* Матричный метод расчета влияния параметров структуры на изаучательные характеристики гетеролазеров. //Доклады Академии наук РТ, т.55,№8, 2012, стр. 631-637.

8. *Кейси Х., Паниш М.* Лазеры на гетероструктурах. –М.: Мир, т.1,1981,-299с., т.2,1984,-364с.

9. *Джураев Х.Ш., Каримов З.Д. Махсудов Б.И.* Температурная зависимость порового тока полупроводниковых лазеров на основе наноструктур. //Материалы между. научной конференции «НАНО-2014», посвящённой 90-летию столицы РТ г.Душанбе ТНУ, 25 декабря 2014 гг. -Душанбе: Дақиқӣ, 2014, с.71-77.

01.01.06

В.В. Дружинин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт, кафедра высшей математики
г. Саров, vvdr@newmail.ru

ОБОБЩЕНИЕ МАЛОЙ ТЕОРЕМЫ ФЕРМА

Проведено обобщение малой теоремы Ферма на случай разных степеней основания, которое взаимно просто с произвольным простым числом. Составлена матрица вычетов и указаны ее свойства симметрии. Даны приложения новых соотношений.

Ключевые слова: малая теорема Ферма, теория сравнений, остатки, вычеты.

Малая теорема Ферма (МТФ) была сформулирована, но не доказана почти четыреста лет тому назад в 1640 г. и состоит в следующем: если $p-$ простое число (ПЧ), $a-$ натуральное число взаимно простое с p, т.е. $(a,p)=1$, то $a^{p-1}\equiv 1(mod\ p)$. Другими словами, при делении a^{p-1} на p, всегда есть остаток «1». Следствие: $a^p\equiv a(mod\ p)$ при любом a, даже кратном p. Это следствие есть частная запись бинома Ньютона. Имеется огромное количество модификаций МТФ и практических ее применений. Первое доказательство и обобщение МТФ сделал Эйлер через 100 лет в 1736 г. Он дал фомулу $a^{\varphi(m)}\equiv 1(mod\ m)$, где целое $m>1$, $(a,m)=1$, а $\varphi(m)$ – количество чисел меньших m и взаимно простых с m. $\varphi(m)=(m\prod_{k=1}^{n}(p_k-1))/(\prod_{k=1}^{n}p_k)$, где p_k – ПЧ, входящие в каноническое разложение m. Пример. $\varphi(24)=8,\ a=5,\ 5^8=1+16276\cdot 24$ [1,2]. Другое обобщение МТФ было сформулировано еще через 100 лет в 1839 г. Шунеманом (Schonemann) [3]. Если $m\equiv n\big(mod(p-1)\big)$, то при любом целом $a\in\mathbb{Z}$ выполняется сравнение $a^m\equiv a^n(mod\ p)$. Обобщение Шунемана разрешает степень $m\geq p$. Пример. Пусть $a=3,p=5,m=7,\ 7\equiv 3(mod\ 4),\ 3^7\equiv 3^3(mod\ 5)$. Действительно, $2187=27+432\cdot 5$.

Обобщение МТФ, которое предлагаем мы, есть следующая обобщённая малая теорема Ферма. Если $(A,p)=1,\ A\equiv a(mod\ p),$ и $1\leq n\leq(p-1),1\leq a\leq(p-1)$, то

$$a^{p-n}\equiv c_n(mod\ p), \qquad (1)$$

где c_n находится из сравнения $a^{n-1}\cdot c_n\equiv 1(mod\ p)$.

Доказательство. Пусть $n=2$. Тогда $a^{p-2}\equiv c_2(mod\ p)$. Умножив сравнение на a, получаем $a^{p-1}\equiv a\cdot c_2(mod\ p)$. По условию теоремы $a\cdot c_2\equiv 1(mod\ p)$. Поэтому $a^{p-1}\equiv a\cdot c_2(mod\ p)\equiv 1(mod\ p)$, и мы получаем МТФ. В случае $n=3$ умножаем сравнение $a^{p-3}\equiv c_3(mod\ p)$ на a^2 и вновь получаем МТФ. Теорема доказана.

Обобщение носит необходимый, но не достаточный характер, так как обратное утверждение не всегда справедливо. Например, число $x=341=11\cdot 31$ составное, но для $n=2$ поддерживает (1).

Действительно, $c_2=171,\ 2^{10}\equiv 1(mod\ 341),\ 2^{339}\equiv 2^9(mod\ 341)\equiv 171(mod\ 341)$.

Для расчета c_n, или более строго $c_n(p;a)$, введем промежуточный коэффициент b_n по правилу $a^{n-1}\equiv b_n(mod\ p)$, что дает уравнение $b_n\cdot c_n\equiv 1(mod\ p)$. Наборы $\{a_k\},\{b_n\}$ и $\{c_n\}$ из состоят из $(p-1)$ остатков от деления A на p и отличаются перестановкой. Среди связок $(b_n|c_n)$ есть две тривиальные (1|1) и $(p-1|p-1)$. Нетривиальных связок всего $((p-3)/2)$ без учета перестановки внутри связки $(c_n|b_n)$. Например, при $p=13$ имеем: $(2|7),(3|9),(4|10),(5|8),\ (6|11)$. Тут действуют также рекуррентные сравнения: $b_{n-1}\cdot a\equiv b_n(mod\ p)$, $c_n\cdot a\equiv c_{n-1}(mod\ p)$ и $c_n\cdot a^k\equiv c_{n-k}(mod\ p)$. Матрица связок для $p=7$ приведена в табл. №1.

Выделим следующие свойства матрицы связок.1.Числа в связках могут переставляться. 2. Первый левый столбец и первая строка (по МТФ) состоят из единичных связок. 3. Центральная строка при $n=\alpha=\ (p+1)/2$ состоит из связок (1|1) и $(p-1|p-1)$. В табл. № 1 $\alpha=4$ и эта строка выделена. Она есть ось антисимметрии для каждого столбца $b_{\alpha+k}=c_{\alpha-k}$ и $c_{\alpha+k}=b_{\alpha-k}$. 4. Имеется вертикальная ось, разделяющая

Табл. №1.Матрица связок $(b_n|c_n)$ для $p = 7$.

a / n	1	2	3	4	5	6
1	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)
2	(1|1)	(2|4)	(3|5)	(4|2)	(5|3)	(6|6)
3	(1|1)3	(4|2)	(2|4)	(2|4)	(4|2)	(1|1)
4	(1|1)	(1|1)	(6|6)	(1|1)	(6|6)	(6|6)
5	(1|1)	(2|4)	(4|2)	(4|2)	(2|4)	(1|1)
6	(1|1)	(4|2)	(5|3)	(2|4)	(3|5)	(6|6)

Табл. №2.Часть матрицы связок $(b_n|c_n)$ для $p = 13$.

	2	3	4	5	6
2	(2|7)	(3|9)	(4|10)	(5|8)	(6|11)
3	(4|10)	(9|3)	(3|9)	(12|12)	(10|4)
4	(8|5)	(1|1)	(12|1	(8|5)	(8|5)
5	(3|9)	(3|9)	(9|3)	(1|1)	(9|3)
6	(6|11)	(9|3)	(10|4	(5|8)	(2|7)
7	(12|12)	(1|1)	(1|1)	(12|12)	(12|12)

столбцы с $a = \beta = (p-1)/2$ и $a = \alpha = (p+1)/2$. 5. Для строк с нечетным n зеркальное отражение относительно вертикальной оси переводит связку $(b_n|c_n)$ в $(b_n|c_n)$. Для строк с четным n зеркальное отражение переводит $(b_n|c_n)$ в $(p-b_n|p-c_n)$. В табл. №1 разделительная вертикальная ось выделена пунктиром. 6. Всегда выполняется сравнение $(p-1)^{\beta} \equiv (-1)^{\alpha-1}(mod\ p)$.7. $\{(a(a^{p-2}-1)/(a-1)) - \sum_{n=2}^{p-1} c_n\} \vdots p$.8. В последнем столбце (через вычет) $c_n(p; p-1) = (-1)^{n+1}$. 9. В строке с $n = 2$ все c_2 разные и пробегают значения от «1» до $(p-1)$.

Таким образом, для построения матрицы достаточно знать только верхний левый блок этой матрицы: столбцы $2 \le a \le \beta$, строки с $2 \le n \le \alpha$. В качестве примера для $p = 13$ такой блок дан в табл. № 2.

Знание чисел $c_n(p; a)$ дает много интересных выводов. Рассмотрим великую теорему Ферма. Наше обобщение говорит: если $(x,p) = (y,p) = (z,p) = 1$, то $^{\beta} + y^{\beta} \neq z^{\beta}$ [4]. Например, $x^3 + y^3 \neq z^3$ или $x^{7-4} + y^{7-4} \neq z^{7-4}$. Тут мы выходим на центральную строку табл. № 1, в которой c_4 равны {1 или 6} и мы никак не можем получить равенство $c_4(7; x) + c_4(7; y) = c_4(7; z)$.

Анализируя остатки $c_n(p; a)$, мы можем построить различные численные равенства и сравнения. Всегда $2^{p-2} \equiv a(mod\ p)$. Если $p = 3m+2$, то $3^{p-2} \equiv (m+1)(mod\ p)$. Если $p = 4m-1$, то $4^{p-2} \equiv m(mod\ p)$.

Алгебраичское уравнение $x^8 + y^8 + z^8 - 2t^2 = 0$ анализируем с точки зрения $c_5(13; a)$. Взяв $x = 3, y = 4, z = 5$, находим $c_5(13; 3) = 9, c_5(13; 4) = 3, c_5(13; 5) = 1$ (см. табл. №2), т.е. $(3^8 + 4^8 + 5^8) \equiv 13(mod\ 13)$. Дальнейший расчет дает решение $3^8 + 4^8 + 5^8 - 2 \cdot 13^2 \cdot 37^2 = 0$.

Равенство (1) позволяет получить степени, как и у Эйлера и Шулемана. большие $(p-1)$), но немного по-новому. Возведем (1) в квадрат и получим $a^{2p-2n} \equiv c_n^2(mod\ p) \equiv c_t(mod\ p)$. Например (см. табл. №2), $3^{18} \equiv 1(mod\ 13)$.

С помощью коэффициентов $c_n(p; a)$ можно быстро решать диофантовы уравнения. Логика действий следующая. Пусть дано уравнение $xp_1 - yp_2 = z$. При этом $p_2 - p_1 = n$. Составляем два уравнения $a^{p_2-n} = c_n(p_2; a) + yp_2$ и $a^{p_1} = a + xp_1$. Разность этих уравнений дает исходное диофантово уравнение и требует $(c_n(p_2; a) - a) = z$. z нам известно и по матрице связок мы подбираем $c_n(p_2; a)$ и a. Отсюда $x = ((a^{p_1} - a)/p_1) - kp_2$, $y = ((a^{p_1} - c_n(p_2; a))/p_2) - kp_1$.Или

$\left(\frac{(a^{p_1}-a)}{p_1}\right) \equiv x(mod\ p_2)$, $\left(\frac{(a^{p_1}-c_n)}{p_2}\right) \equiv y(mod\ p_1)$.

Пример. Дано уравнение $7x - 13y = 3, n = 6$. По табл.2 находим $c_6(13; 5) = 8, a = 5$, то, что нам надо. $x = 11160 - 13k, y = 6009 - 7k$.

$11160 \equiv 6(mod 13), 6009 \equiv 3(mod 7)$. Таким образом, $x = 6, y = 3$.

Автор благодарит А. Лазарева, проф. Н.С. Шевяхова и участников семинара кафедры за обсуждение работы.

Список литературы

1. *Сизый С.В.* Лекции по теории чисел, М. ФИЗМАТЛИТ, 2007.
2. *Сушкевич А.К.* Теория чисел. Харьков, ХГУ, 1956.
3. *Ингам А.Э.* Распределение простых чисел. М. Ком. Книга, 2007.
4. *Druzhinin V.V.* Austrian Journal of Technical and Natural Science, №7-8, 2015, 18-20.

01.01.06

В.В. Дружинин

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт, кафедра высшей математики
г. Саров, vvdr@newmail.ru

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ЭЙЛЕРА В ТЕОРИИ СРАВНЕНИЙ

Проведено обобщение теоремы Эйлера, которая сама обобщает малую теорему Ферма, на случай разных степеней основания, если оно взаимно просто с произвольным составным числом. Составлена матрица вычетов и указаны ее свойства симметрии. Даны приложения новых соотношений.

Ключевые слова: *теорема Эйлера, малая теорема Ферма, теория сравнений, остатки, вычеты.*

Теорема Эйлера (ТЭ) имеет вид $a^{\mu} \equiv 1(mod\ m)$, где целое $m > 1$, $(a, m) = 1$, а $\mu = \varphi(m)$ – количество чисел меньших m и взаимно простых с m. $\mu = (m\prod_{k=1}^{n}(p_k - 1))/(\prod_{k=1}^{n} p_k)$, где p_k – простые числа (ПЧ), входящие в каноническое разложение m. μ – четное число. Пример. $\varphi(20) = \mu = 8,\ a = 7,\ 7^8 = 1 + 288240 \cdot 20$ [1 – 3]. Частным случаем ТЭ при $m = p$, является малая теорема Ферма $a^{p-1} \equiv 1(mod\ p)$.Далее мы будем считать, что m – число составное. Обобщение малой теоремы Ферма дано нами в [4] на вариант $a^{p-n} \equiv c_n(mod\ p)$. Мы предлагаем аналогичное расширение ТЭ. Оно формулируется теоремой. Если $(a, m) = 1$, $0 \le n \le \mu$, то

$$a^{\mu-n} \equiv d_n(mod\ m), \qquad (1)$$

где d_n находится из сравнения $a^n d_n \equiv 1(mod\ m)$.

Доказательство. Пусть $n = 1$. Тогда $a^{\mu-1} \equiv d_1(mod\ m)$. Умножив сравнение на a, получаем $a^{\mu} \equiv a \cdot d_1(mod\ m)$. По условию теоремы $a \cdot d_1 \equiv 1(mod\ m)$. Поэтому $a^{\mu} \equiv a \cdot d_1(mod\ m) \equiv 1(mod\ m)$, и мы получаем ТЭ. В случае $n = 2$ умножаем сравнение $a^{\mu-2} \equiv d_2(mod\ m)$ на a^2 и вновь получаем ТЭ. Теорема доказана.

Рассмотрим пример расчета d_n, считая его остатком при делении на m. В предыдущем примере $m = 20, \mu = 8, a = 7$. Решение сравнения $7 \cdot d_1 \equiv 1(mod\ 20)$ дает $d_1 = 3$. При этом $7^7 = 3 + 41177 \cdot 20$, т. е. обобщение выполняется.

Для расчета d_n, или более строго $d_n(m; a)$, введем промежуточный коэффициент s_n по правилу $a^n \equiv s_n(mod\ m)$, что дает уравнение $s_n \cdot d_n \equiv 1(mod\ m)$. Наборы $\{a_k\}, \{s_n\}$ и $\{d_n\}$ из состоят из μ чисел меньших m и взаимно простых с m. В них всегда есть «1» и $(m - 1)$. В разобранном примере это числа $\{1; 3; 7; 9; 11; 13; 17; 19\}$. Если в (1) $n = 0$, то мы получаем ТЭ, т.е. $d_0 = 1$. Если в (1) $n = \mu$, то мы получаем тривиальное сравнение $1 \equiv 1(mod\ m)$, т.е. $d_{\mu} = 1$. Далее мы будем рассматривать связки $(s_n|d_n)$, среди которых есть две тривиальные $(1|1)$ и $(m - 1|m - 1)$. Нетривиальных связок без учета перестановок s_n и d_n всего $(\mu/2)$. Существуют рекуррентные сравнения, облегчающие расчет связок: $s_{n-1} \cdot a \equiv d_n(mod\ m)$ и $d_n \cdot a^k \equiv d_{n-k}(mod\ m)$. В табл. №1 приведена матрица связок для $m = 20$.

Таблица №1. Связки $(s_n|d_n)$ для m =20. k – нумерует основания a.

k	1	2	3	4	5	6	7	8
a \ n	1	3	7	9	11	13	17	19
0	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)
1	(1|1)	(3|7)	(7|3)	(9|9)	(11|11)	(13|17)	(17|13)	(19|19)
2	(1|1)	(9|9)	(9|9)	(1|1)	(1|1)	(9|9)	(9|9)	(1|1)
3	(1|1)	(7|3)	(3|7)	(9|9)	(11|11)	(17|13)	(13|17)	(19|19)
4	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)	(1|1)
5	(1|1)	(3|7)	(7|3)	(9|9)	(11|11)	(13|17)	(17|13)	(19|19)
6	(1|1)	(9|9)	(9|9)	(1|1)	(1|1)	(9|9)	(9|9)	(1|1)
7	(1|1)	(7|3)	(3|7)	(9|9)	(11|11)	(17|13)	(13|17)	(19|19)

Выделим следующие свойства матрицы связок.1.Числа в связках могут переставляться и оба числа входят только в одну связку. 2. Крайний левый столбец и первая строка (по ТЭ) состоят из единичных связок. 3.Если $m = 2(4k-1)^t$ или $m = (4k-1)^t$, то центральная строка с $\alpha = (\mu/2) =$ имеет нечетный номер и состоит из связок $(1|1)$ и $(m-1|m-1)$. Во всех других случаях $(\mu/2)$ четное и центральная строка состоит из связок $(1|1)$. В табл. № 1 $\alpha = 4$ и эта строка выделена. Она есть ось антисимметрии для каждого столбца $s_{\alpha+k} = d_{\alpha-k}$ и $s_{\alpha-k} = d_{\alpha+k}$. 4. Имеет место такая модификация ТЭ $a^{\mu/2} \equiv 1(mod\, m)$ при μ кратном «4». 5. Имеется вертикальная ось, разделяющая столбцы с $k = \alpha = \mu/2$ и $k+1 = (\mu+2)/2$. В табл. № 1 это столбцы с $a = 4$ и $a = 5$. Вертикальная ось симметрии выделена пунктиром. 6. Для строк с четным n зеркальное отражение относительно вертикальной оси переводит связку $(s_n|d_n)$ в $(s_n|d_n)$. Для строк с нечетным n зеркальное отражение переводит $(s_n|d_n)$ в $(m-s_n|m-d_n)$. 6. Всегда выполняется сравнение $(m-1)^{\mu-n} \equiv (-1)^n (mod\, m)$. 7. $\left\{(a(a^\mu-1)/(a-1)) - \sum_{n=0}^{\mu-1} d_n\right\} \vdots\, m$. 8. В последнем столбце (через вычет) $d_n(m; m-1) = (-1)^n$. 9. В строке с $n = 1$ все d_1 разные и пробегают значения a от «1» до $(m-1)$.

Таким образом, для построения матрицы достаточно знать только верхний левый блок этой матрицы: столбцы $1 \le a \le \alpha$, строки с $0 \le n \le \alpha$.

Знание чисел $d_n(m; a)$ дает много интересных выводов. Рассмотрим великую теорему Ферма. Наше обобщение говорит: если $(x,m) = (y,m) = (z,m) = 1$, то $x^\alpha + y^\alpha \ne z^\alpha$ [5]. Тут мы выходим на центральную строку (табл. № 1), в которой все d_α равны «1» или $(m-1)$ и мы никак не сможем получить равенство $d_\alpha(m; x) + d_\alpha(m; y) = d_\alpha(m; z)$.

Анализируя остатки $d_n(m; a)$, мы можем построить различные численные равенства и сравнения. Всегда, если $m = p_1 \cdot p_2$, то $2^{\mu-1} \equiv ((p_1 p_2 + 1)/2)(mod\, m)$. Если $m = 3t+2$, то $3^{\mu-1} \equiv (t+1)(mod\, m)$. Алгебраическое уравнение $x^5 + y^5 + z^5 + \mathrm{e}^5 = \mathrm{e}f^2$ анализируем с точки зрения $c_3(20; a)$. Взяв $x = 9, y = 1, z = -3, \mathrm{e} = -7$, находим $c_3(20;9) = 9, c_3(20;1) = 1, c_3(20;3) = 3, c_3(20;7) = 7$ (см. табл. №1), т.е. $(9^5 + 1 - 3^5 - 7^5) \equiv 0(mod\, 20)$. Дальнейший расчет дает решение $9^5 + 1 - 3^5 - 7^5 = 105 \cdot 20^2$.

С точки зрения нашей теоремы становится понятным происхождение псевдопростых чисел и чисел Кармайкла. Псевдопростое число есть составное число S, удовлетворяющее малой теореме Ферма по одному основанию. Первое $S = 341 = 11 \cdot 31$ по основанию «2» было открыто в 1820 г. Саррусом. Действительно, $2^{341-1} \equiv 1(mod\, 341)$. В этом нет ничего удивительного, так как $\mu = 10 \cdot 30 = 300$ и $2^{340} \equiv 2^{40} \equiv d_{260}(341; 2)\, (mod\, 341)$. При этом $d_{260}(341; 2) = 1$. Для других оснований, например, $a = 3$ малая теорема Ферма не справедлива, $3^{340} \equiv 56(mod\, 341)$.

Числа Кармайкла, или сильные псевдопростые числа, есть составные числа K, удовлетворяющие малой теореме Ферма при всех основаниях a, если $(a, K) = 1$. Обнаружено несколько таких чисел, наименьшее $K = 561 = 3 \cdot 11 \cdot 17$. По ТЭ $\mu = 2 \cdot 10 \cdot 16 = 320$. Поэтому $a^{560} \equiv a^{240} \equiv d_{80}(561; a)(mod\, 561)$. В таблице связок для $m = 561$ строки с $n = \{0; 80; 160; 240\}$ дают все $d_n(561; a) = 1$. Таким образом, наш подход позволяет обнаруживать новые числа Кармайкла.

Обобщение ТЭ позволяет быстро решать диофантовы уравнения. Логика рассуждений следующая. Пусть $\mu - n = p$. Это дает два уравнения. $a^p = c_n(m, a) + Am$ по обобщенной ТЭ. По малой теореме Ферма получаем $a^p = a + Bp$. Вычитая одно уравнение из другого, получаем $Am - Bp = \left(a - c_n(m, a)\right)$ или $xm - yp = \left(a - c_n(m, a)\right)$. Используя теорию сравнений, находим

$$\left(\frac{a^p - c_n(m,a)}{m}\right) \equiv x(mod\, p), \quad \left(\frac{a^p - a}{p}\right) \equiv y(mod\, m). \qquad (2)$$

Пример. По табл. № 1 при $m = 20, \mu = 8, n = 1$, имеем $p = 7$. Надо решить уравнение $20x - 7y = 4$. По табл. № 1 подбираем $a = 7, n = 1, c_1(20,7) = 3, a - c_1(20,7) = 4$. Это то, что нам нужно. $((7^7 - 3)/20) = 41177 \equiv 3(mod\, 7)$, т.е. $x = 3$. $((7^7 - 7)/7) = 117648 \equiv 8(mod\, 20)$, т.е. $y = 8$.

Автор благодарит А. Лазарева, проф. Н. С. Шевяхова и участников семинара кафедры за обсуждение работы.

Список литературы

1. *Сизый С.В.* Лекции по теории чисел, М. ФИЗМАТЛИТ, 2007.
2. *Сушкевич А.К.* Теория чисел. Харьков, ХГУ, 1956.
3. *Ингам А.Э.* Распределение простых чисел. М. Ком. Книга, 2007.
4. *Druzhinin V.V.* Austrian Journal of Technical and Natural Science, №7-8, 2015, 18-20.

01.04.04

Д.Л. Еськин, к.ф.-м.н.

Федеральное казенное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградская академия Министерства внутренних дел Российской Федерации»,
кафедра информатики и математики, yd38@bk.ru

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ ПРИ УСИЛЕНИИ ДВУХЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В ЛБВ М-ТИПА

В работе представлены результаты моделирования процесса усиления сигнала сложного спектрального состава, представляющего собой суперпозицию двух монохроматических волн близких частот, лежащих в одной полосе пропускания замедляющей системы ЛБВ М-типа. Показано влияние уровня входной мощности более высокочастотного сигнала на ширину спектра выходного сигнала вследствие возбуждения волн комбинационных частот.

Ключевые слова: *лампа бегущей волны, комбинационные частоты, многочастотный сигнал, спектр, искажение сигнала.*

В настоящее время электровакуумные СВЧ приборы М-типа широко применяются в различных областях науки и техники, что связано, прежде всего, с их высокой надежностью. Однако приборы данного класса имеют и ряд недостатков, к которым, в первую очередь, относятся искажение усиливаемого сигнала и высокий уровень шума. Причины этих явлений на сегодняшний день до конца не изучены. В работах [1] и [2] показано, что высокий уровень широкополосного шума в приборах СВЧ М-типа обусловлен, в основном, наличием неустойчивости сил пространственного заряда пучка, из-за которой формируются электронные сгустки. При усилении сигнала сложного спектрального происходит возбуждение волн комбинационных частот, что в свою очередь также приводит к зашумлению выходного сигнала прибора [3, 4]. Изучению возможностей управления уровнем мощности этих комбинационных составляющих в спектре выходного сигнала приборов М-типа посвящены работы [5] и [6].

Данная работа продолжает цикл исследований, связанных с вопросами возбуждения волн комбинационных частот, и посвящена изучению процесса усиления двухчастотного сигнала в ЛБВ М-типа при вариации уровня входной мощности сигнала более высокой частоты. Исследование проводилось путем проведения вычислительного эксперимента на основании математической модели, которая позволяет моделировать процесс взаимодействия электромагнитных волн сложного спектрального состава с электронным потоком в лучевых приборах М-типа [4]. При проведении расчетов ввиду широкополосности замедляющих систем, применяемых в конструкциях ЛБВ М-типа, предполагалась нулевая дисперсия.

На рисунке 1 представлен спектр излучения ЛБВ при условии подачи на вход прибора сигнала, представляющего собой суперпозицию двух монохроматических волн с частотами, соответствующими 300-й и 30-й1 гармоникам фундаментальной частоты (20 *МГц*). Усиливаемые сигналы отмечены на рисунке заливкой синего цвета. Из рисунка видно, что при указанных условиях в спектре выходного сигнала ЛБВ находят свое отражение волны, частоты которых можно определить соотношением

$$\omega_k = \left| m\omega_1 \pm n\omega_2 \right|,$$

где m =±1, ±2, ±3, …, n =±1, ±2, ±3, …, а ω_1 и ω_2 – частоты усиливаемых сигналов.

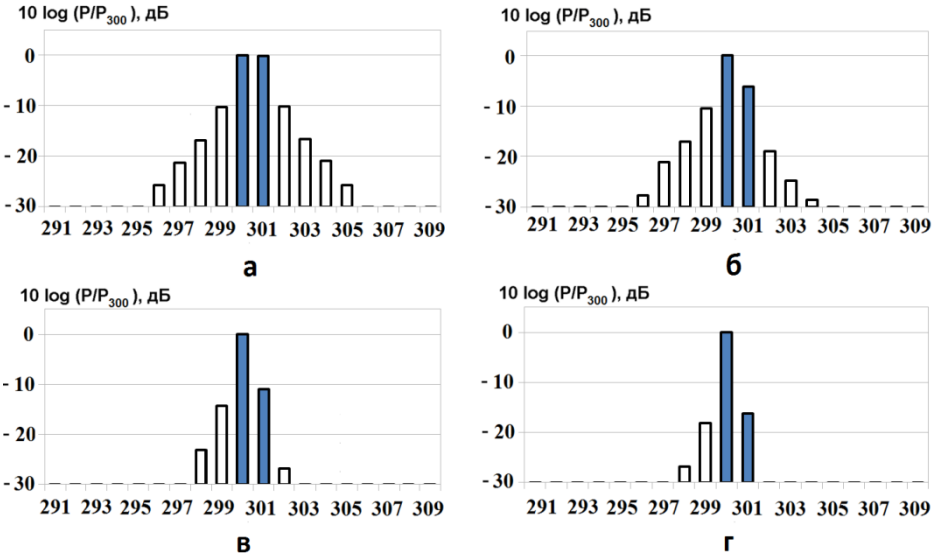


Рис. 1 – Спектр выходного сигнала

Рисунок 1.а соответствует случаю равенства входных мощностей усиливаемых сигналов друг другу. В данном случае спектр выходного сигнала прибора имеет симметричный вид, однако имеет место конкуренция двух усиливаемых волн, в результате чего большую часть времени превалирует более высокочастотный сигнал. Если уровень входной мощности более высокочастотного сигнала составляет 0.5 от уровня входной мощности второго сигнала (рисунок 1.б), то наблюдается сужение спектра выходного сигнала по сравнению с предыдущим случаем за счет уменьшения амплитуды колебаний в правой части спектра. Рисунок 1.в соответствует случаю, когда указанное выше отношение уровней входной мощности равно 0.2. В этом случае спектр прибора становится еще уже. Спектр выходного сигнала прибора, представленный на рисунке 1.г, соответствует случаю, когда уровень входной мощности более высокочастотного сигнала составляет 0.1 от уровня входной мощности сигнала с меньшей частотой. При данных условиях в левой части спектра имеет место возбуждение волн комбинационных частот, а в правой части данное явление уже не наблюдается.

На рисунке 2 представлены зависимости уровня выходной мощности на частотах 299-й, 301-й и 302-й гармоник, нормированные на уровень выходной мощности на частоте 300-й гармоники, от величины отношения уровня входной мощности на частоте 301-й гармоники к уровню входной мощности на частоте 301-й гармоники C, т.е.

$$C = P_{301}^{in} / P_{300}^{in} \ .$$

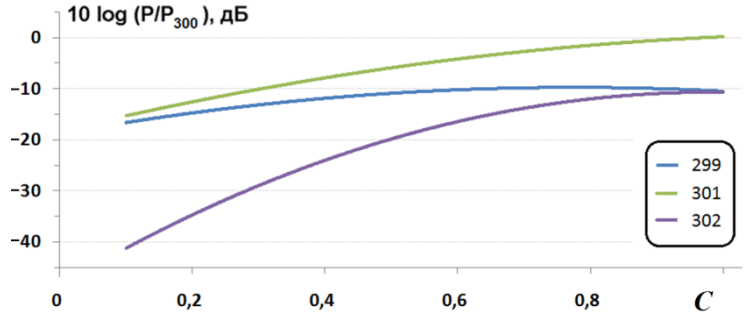


Рис. 2 – Зависимость выходной мощности от величины уровня входной мощности на частоте 301-й гармоники

Из рисунка видно, что при $C = 1$ уровень выходной мощности на частотах 299-й и 301-й гармоник составляет порядка -11дБ от уровня выходной мощности с максимальной амплитудой. При $C < 1$ максимальная амплитуда побочных колебаний наблюдается на частоте 299-й гармоники.

Уменьшение величины C приводит к снижению уровней мощности побочных колебаний, причем на частоте 302-й гармоники это происходит более резко по сравнению с 299-й

гармоникой. Следует отметить, что уровень мощности усиливаемого сигнала с частотой, соответствующей 301-й гармонике также снижается более резко по сравнению с 299-й гармоникой. В результате при $C = 0.5$ уровень мощности побочных колебаний на 299-й гармонике составляет порядка -4дБ от уровня мощности на частоте 301-й гармоники и -11*дБ* от уровня мощности на частоте 300-й гармоники, а при $C = 0.2$ уже порядка -2дБ и -18дБ соответственно. Таким образом, уменьшение C приводит к тому, что амплитуды усиливаемого и побочного колебания становятся практически равны друг другу.

На рисунке 3 представлен график зависимости коэффициента усиления прибора на частотах 300-й и 301-й гармоник от величины C. Из графика следует, что подача на вход прибора сигнала с частотой, соответствующей 301-й гармонике приводит к снижению коэффициента усиления на частоте 300-й гармонике. Это связано прежде всего с изменением характера группировки электронов и перераспределением мощности. С ростом C коэффициент усиления на частоте 301-й гармоники растет и при $C > 0.95$ становится большим по величине, чем на 300-й гармонике. В результате в процессе конкуренции волн превалирующим становится более высокочастотный сигнал.

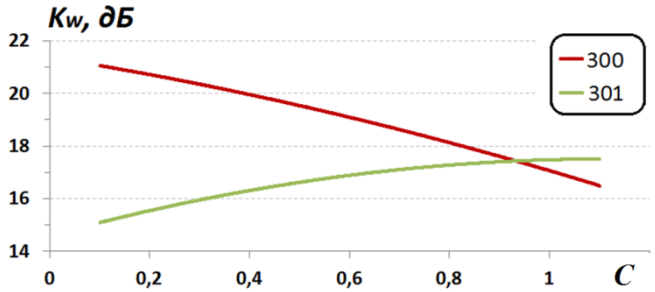


Рис. 3 – Зависимость коэффициента усиления от величины уровня входной мощности на частоте 301-й гармоники

Таким образом, при усилении двухчастотного сигнала в ЛБВ М-типа ширина спектра выходного сигнала зависит от величины входной мощности усиливаемых сигналов. Уменьшение входной мощности усиливаемого сигнала большей частоты приводит снижению уровней побочных колебаний, причем наиболее ярко это отражается в правой части спектра. Возбуждение побочных колебаний приводит к перераспределению мощности в спектре выходного сигнала прибора. Это в свою очередь вызывает снижение КПД прибора. С другой стороны данные эффекты могут представлять интерес при решении задач, связанных с вопросами генерации шумов и радиоэлектронной борьбы.

Список литературы

1. *Шамов Е.А., Шеин А.Г.* Образование электронных сгустков в протяженных потоках в скрещенных полях // Нелинейный мир. 2014. Т. 19. №1. С. 035-039.
2. *Шамов Е.А., Шеин А.Г.* Особенности образования шума в электронных потоках в скрещенных полях // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т.19. № 11. С. 61-64.
3. *Еськин Д.Л., Бакулин В.М., Шеин А.Г.* Усиление параметрически связанных сигналов в дематроне // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 2. № 4 (42). С. 36-40.
4. *Еськин Д.Л., Ковтун Д.Г., Шеин А.Г.* Генерация комбинационных частот при усилении сигнала сложного спектрального состава в ЛБВ М-типа // Нелинейный мир. 2013. Т. 11. № 3. С. 158-163.
5. *Ермолаев А.В., Оленникова О.А., Шеин А.Г., Поляков И.В.* Возможность использования паразитного колебания для управления спектром генерации магнетрона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 11. С. 61-64.
6. *Еськин Д.Л.* Подавление комбинационных составляющих при усилении полигармонического сигнала в ЛБВ М-типа // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 9. № 10 (137). С. 41-45.

01.02.04

Э.С. Сибгатуллин, О.Г. Новоселов, К.Э. Сибгатуллин

Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, строительное отделение, кафедра промышленного, гражданского строительства и строительных материалов, Набережные Челны,
cibes@mail.ru, shi-set@mail.ru, kamilll@mail.ru

ПОСТРОЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТРЕХОСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Рассмотрены изотропные тела с различными пределами прочности на растяжение и сжатие. Приведены параметрические уравнения поверхности прочности для массивных тел в пространстве внутренних сил и моментов. Построены некоторые сечения этой поверхности.

Ключевые слова: *объемные конечные элементы, параметрические уравнения предельной поверхности, сечения предельной поверхности прочности.*

Рассмотрен общий случай сложного сопротивления, когда отличны от нуля все 18 внутренних силовых факторов (ВСФ) – девять сил и девять моментов. Для общего случая вывод параметрических уравнений предельной поверхности в пространстве внутренних сил T_{ik} и моментов M_{ik} для массивных тел приведен в работе [1].

Уравнение поверхности прочности в пространстве напряжений σ_{ik} для изотропных материалов, по-разному сопротивляющихся растяжению и сжатию, имеет следующий вид:

$$\Phi \equiv (\sigma_{11}+c)^2+(\sigma_{22}+c)^2+(\sigma_{33}+c)^2+3d(\sigma_{12}^2+\sigma_{23}^2+\sigma_{31}^2)=1. \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой частный случай критерия прочности Малмейстера [2]. Здесь напряжения отнесены к постоянной величине σ_0, имеющей размерность напряжений.

Используя ассоциированный с (1) закон деформирования находим [3]:

$$\dot{\varepsilon}_{11}=\dot{\lambda}\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_{11}}=2\dot{\lambda}(\sigma_{11}+c);\quad \dots;\quad \dot{\varepsilon}_{31}=\dot{\lambda}\frac{\partial\Phi}{\partial\sigma_{31}}=6\dot{\lambda}d\sigma_{31}. \quad (2)$$

Здесь $\dot{\varepsilon}_{ik}$ - скорости деформаций, σ_{ik} – напряжения $(i,k=\overline{1,3})$.

Решая полученные уравнения (2) относительно напряжений σ_i, получим

$$\sigma_i=\left\{\left[\left(\frac{0.5}{\dot{\lambda}}\right)\sum_{k=1}^{N}\delta_{ik}\dot{\varepsilon}_k-\Delta_i\right]/\Delta\right\}. \quad (3)$$

Здесь Δ, Δ_i, δ_{ik} - определители, элементами которых являются коэффициенты уравнения (1).

В работе между одинарными и двойными индексациями напряжений и деформаций приняты следующие зависимости: 11→1; 22→2; 33→3; 12→4; 23→5; 31→6.

Приняты следующие гипотезы кинематического характера [3]:

$$\dot{\varepsilon}_{11}=\dot{e}_{11}+\dot{\varkappa}_{21}\xi_2-\dot{\varkappa}_{31}\xi_3;\quad \dots;\quad \dot{\varepsilon}_{31}=0.5(\dot{\gamma}_{31}-\dot{\varkappa}_{33}\xi_2+\dot{\varkappa}_{11}\xi_2). \quad (4)$$

Здесь массивное тело рассматривается как совокупность конечных элементов (КЭ) двух видов: прямоугольных призм и тетраэдров. Призмы отнесены к прямоугольной системе координат $O\xi_1\xi_2\xi_3$. Оси ξ_1, ξ_2, ξ_3 параллельны соответствующим ребрам призмы, точка О является центром приведения внутренних элементарных сил. Скорости обобщенных перемещений $\dot{e}_{ik}, \dot{\varkappa}_{ik}, \dot{\gamma}_{ik}$ остаются постоянными в пределах рассматриваемой грани призмы. Согласно гипотезам кинематического характера грани призмы поворачиваются относительно соответствующих осей ξ_1,ξ_2,ξ_3, а также сдвигаются в соответствующих плоскостях и перемещаются вдоль соответствующих осей.

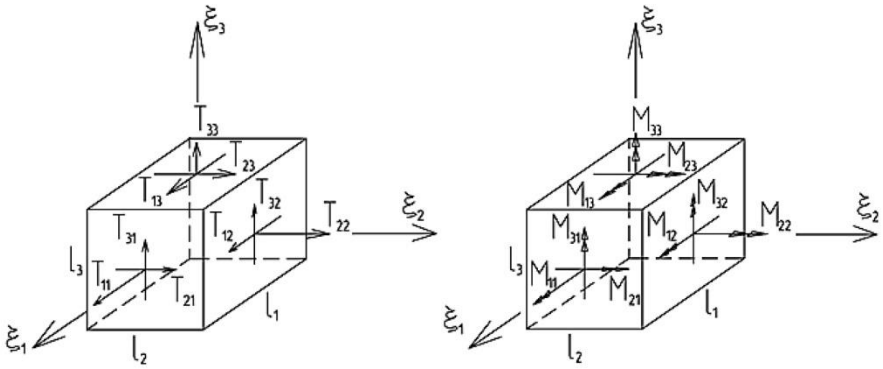


Рис. 1- ВСФ, действующие на грани призмы

Внутренние силы и моменты, действующие на грани прямоугольной призмы, определяем по следующим формулам [4]:

$$T_{11} = \int_{A_1} \sigma_{11} dA; \quad \dots; \quad M_{33} = \int_{A_3} (\sigma_{23}\xi_1 - \sigma_{13}\xi_2) dA. \tag{5}$$

Здесь T_{ii} – нормальные силы, $T_{ik}(i \neq k)$ - касательные силы $\left(i,k = \overline{1,3}\right)$, M_{ii} – «крутящие» моменты, $M_{ik}(i \neq k)$ – «изгибающие» моменты (рис. 1); $A_1 = l_2 \cdot l_3$, $A_2 = l_1 \cdot l_3$, $A_3 = l_1 \cdot l_2$ - площади граней призмы.

Подстановка (3) в (1) позволяет выразить $\dot{\lambda}$ через $\dot{\varepsilon}_{ik}$. Далее во всех основных соотношениях $\dot{\varepsilon}_{ik}$ выражаем через $\dot{e}_{11}, \dots, \dot{æ}_{33}$, используя (4). Результаты подставляем в (5). В итоге получим [3]:

$$T_{11} = 0{,}5(I_{11}\dot{e}_{11} + I_{31}\dot{æ}_{21} - I_{41}\dot{æ}_{31} - 2cA_1); \quad \dots; \quad M_{33} = \frac{1}{6d}\left[I_{23}\dot{e}_{23} - I_{33}\dot{e}_{31} + 0.5J_{66}(\dot{æ}_{33} - \dot{æ}_{22}) - 0.5J_{33}(\dot{æ}_{11} - \dot{æ}_{33})\right]. \tag{6}$$

Здесь I_{ik}, J_{ik} - интегралы по граням призм [1]. При известных скоростях обобщённых перемещений $\dot{e}_{11}, \dots, \dot{æ}_{33}$, используя уравнения (6), можно вычислить соответствующие предельные комбинации $T_{11}, \dots, M_{33}$.

ВСФ на наклонных гранях тетраэдров определяются из уравнений равновесия [3].

Во многих случаях определения несущей способности массивных тел возникает необходимость в построении сечений поверхности прочности, описываемой уравнениями (6). Рассмотрим алгоритм построения сечения поверхности прочности на примере её пересечения с плоскостью $T_{11}OT_{22}$:

1. Задать последовательность значений $\dot{e}_{11}^l$, $\dot{e}_{22}^l$ (l=1, 2, …).
2. Решить систему из 16 нелинейных уравнений

$$T_{12}=0;\ T_{13}=0;\ T_{21}=0;\ T_{23}=0;\ T_{31}=0;\ T_{32}=0;\ T_{33}=0;\ M_{11}=0;$$
$$M_{12}=0;\ M_{13}=0;\ M_{21}=0;\ M_{22}=0;\ M_{23}=0;\ M_{31}=0;\ M_{32}=0;\ M_{33}=0 \tag{8}$$

относительно $\dot{e}_{33}^l$, $\dot{\gamma}_{12}^l$, $\dot{\gamma}_{23}^l$, $\dot{\gamma}_{31}^l$, $\dot{æ}_{11}^l$, $\dot{æ}_{12}^l$, $\dot{æ}_{13}^l$, $\dot{æ}_{21}^l$, $\dot{æ}_{22}^l$, $\dot{æ}_{23}^l$, $\dot{æ}_{31}^l$, $\dot{æ}_{32}^l$, $\dot{æ}_{33}^l$, задавая при этом $\dot{e}_{11}^l$, $\dot{e}_{22}^l$. Здесь левые части уравнений (8) определены формулами (6).

3. По известным значениям $\dot{e}_{11}^l, \dots, \dot{æ}_{33}^l$, используя (6), определяем $T_{11}^l, \dots, M_{33}^l$. Точка, координаты которой равны найденным значениям $T_{11}^l, \dots, M_{33}^l$, лежит одновременно на поверхности (6) и на плоскости $T_{11}OT_{22}$, то есть принадлежит искомому сечению.

4. Повторяя эту процедуру для различных комбинаций $\dot{e}_{11}^l = sin\alpha, \dot{e}_{22}^l = cos\alpha$ (задавая, например, α пробегает сегмент от 0^0 до 360^0 с определенным шагом $\Delta\alpha$), получаем ряд точек, принадлежащих предельной кривой на плоскости $T_{11}OT_{22}$. Найдя достаточное число таких точек, строим искомую кривую (рис 2). Аналогично строим некоторые другие сечения поверхности прочности (6) – рисунки 3, 4.

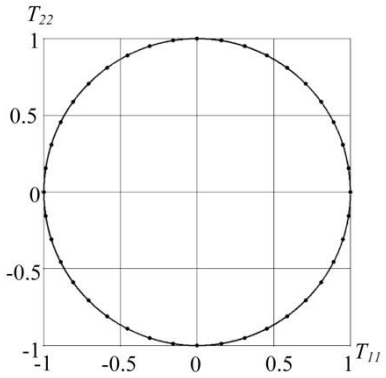


Рис. 2. Предельная кривая в осях T_{11} и T_{22}

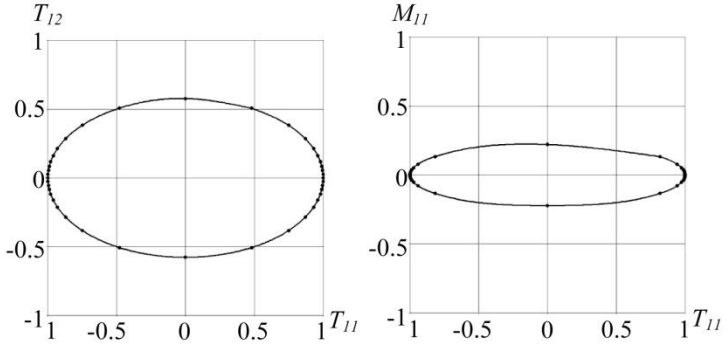


Рис. 3. Предельные кривые: а) в осях T_{11} и T_{12}, б) в осях T_{11} и M_{11}

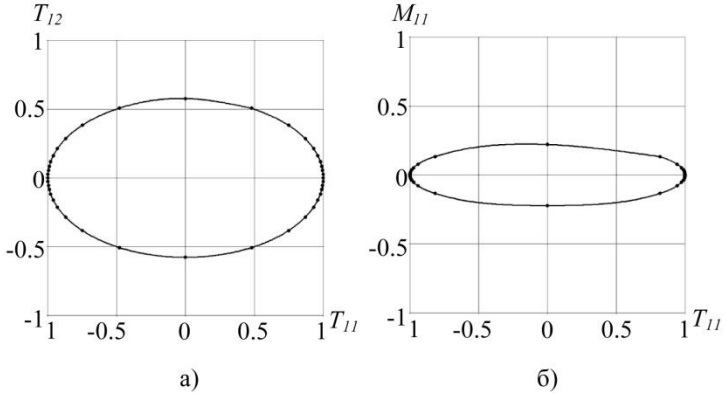


Рис. 4 Предельные кривые: а) в осях M_{22} и M_{11}, б) в осях M_{11} и M_{12}

В работе [3] точки, принадлежащие поверхности прочности (6) определяются относительно просто – в (6) подставляются произвольные комбинации скоростей обобщенных перемещений $\dot{e}_{11}, \ldots, \dot{æ}_{33}$. Таким путем невозможно, в общем случае, построить определенные сечения предельной поверхности (6). В данной работе эта задача решена путем использования систем нелинейных уравнений, аналогичных (8).

Список литературы

1. *Сибгатуллин, Э.С., Исламов К.Ф.* Оценка прочности массивных элементов конструкций // Проектирование и исследование технических систем: межвузовский научный сборник ИНЭКА. Набережные Челны.– 2009. №13. – С. 5-13.

2. *Малмейстер А.К.* Геометрия теорий прочности // Механика полимеров. 1966. №4. – С. 519-534.

3. *Сибгатуллин Э.С., Новоселов О.Г., Сибгатуллин К.Э*. Предельное состояние объемных конечных элементов при трехосных напряженных состояниях // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. №3.- С. 54-58.

4. *Терегулов И.Г.* Сопротивление материалов и основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа, 1984. – 472 с.

01.02.06

О.Ю. Сметанников, В.В. Зыков, К.А. Могильников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра ВМиМ, Пермь, sou2009@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА АВТОМОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ПАКЕТЕ ANSYS

Статья содержит результаты оптимизации новой конструкции опорного элемента (станины) автомобильной колесной платформы специального назначения. Для расчета снижения веса станины применены две различные методики – модули Design Optimization в ANSYS Mechanical APDL и Design Exploration в ANSYS Workbench. Проведен сравнительный анализ эффективности использования данных пакетов.

Ключевые слова: *ANSYS, Design Optimization, Design Exploration, однокритериальная оптимизация, прочность.*

Введение

Большинство современных лицензионных CAE-систем имеют в своем составе встроенные модули оптимизации. Ресурсоемкость задач снижения веса конструкций, обусловленная их нелинейностью, делает актуальной проблему выбора алгоритма поиска оптимального решения среди ряда соответствующих инструментов инженерного пакета. В частности, в пакете ANSYS представлено 2 основных инструмента решения оптимизационных задач: модули Design Optimization в ANSYS Mechanical APDL и Design Exploration в ANSYS Workbench. В данной работе приведен сравнительный анализ применения указанных модулей для оптимизации новой конструкции станины опоры колесной автомобильной платформы специального назначения (рис. 1). Станина изготовлена из дорогостоящего титанового сплава, ее напряженно-деформированное состояние детально исследовано в работе [1]. Там же проведен сравнительный анализ подходов, моделей и инструментов, предназначенных для моделирования деформируемых (гибких) тел в пакетах MSC.Patran (MSC.Nastran), ANSYS совместно с программой динамического моделирования многотельных конструкций MSC.ADAMS.

а б

Рис. 1. Объект оптимизации. а - КЭ модель станины в ANSYS Mechanical APDL, б – варьируемые геометрические параметры.

1. Оптимизация конструкции станины в ANSYS Mechanical APDL

Будем полагать, что отверстие имеет овальную форму (Рис. 1, б) и расположено в центре нижней половины станины, на равном расстоянии c от внутренних перегородок. Центр отверстия, таким образом, фиксирован. Размеры отверстия a и b варьируются в заданных пределах. Требуется определить размеры, при которых площадь прореза будет максимальной (вес станины, соответственно, минимальным), при этом значение максимальной

интенсивности напряжений не должно превышать предел текучести с коэффициентом запаса K. Исходными данными для расчета НДС в квазистатической постановке служат значения полученных в работе [1] сил и моментов, приложенных в интерфейсных узлах (центры отверстий на рис. 1, а), а также глобальные инерционные нагрузки от поступательного ускорения, скорости и ускорения вращения. В расчете использованы 20-узловые элементы Solid186, для балок в узлах сопряжения – Beam189.

Задача оптимизации сводится к поиску целевая функции вида

$$\Phi(\bar{X}) = 1/S_o(a,b) = 1/(a*b + \pi a^2/4) \to \min, \quad (1)$$

где $\bar{X} = \{a,b\}$, s_o - площадь выреза, с ограничениями по пределам варьирования параметров оптимизации $X_{i\min} \le X_i \le X_{i\max}$ и по прочности $\sigma_{\max}(\bar{X})K_z \le \sigma_{0,2}$,где $\sigma_{\max}(\bar{X})$ – максимальная интенсивность напряжений в станине, определенная из численного расчета при заданных условиях нагружения, $\sigma_{0,2} = 981$ МПа – предел текучести материала станины, $K = 1.4$ – коэффициент запаса. Характеристики материала станины: модуль Юнга $E = 120$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.34$, плотность ρ=5440 кг/м3. Начальные размеры прорези: $a = 0.075$ м; $b = 0.35$ м.

В модуле Design Optimization имеется три основных метода поиска оптимального решения: SUBP (метод подзадач), FIRST (метод первого порядка) и RAND (метод случайной реплики) [2]. Перед решением основной задачи был проведен тестовый расчет модельной конструкции (рис.2) с целью выбора наиболее эффективного метода.

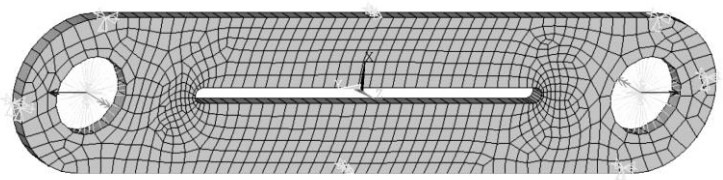


Рис. 2. Конечно-элементная модель пластины в тестовой задаче

Варьировались размеры овального выреза пластины (размеры пластины 250x50x5 мм), при этом материал, система нагрузок и ограничений аналогична задаче (1)-(3). Для оценки эффективности метода использовался комплексный критерий $K_{comp} = \bar{\sigma}_{\max}/(\bar{V}_j \bar{t}_j)$, где $\bar{\sigma}_{\max j} = \sigma_{\max j}/\sigma_{0,2}$, $\sigma_{\max j}$ - максимальное эквивалентное напряжение в оптимальном варианте конструкции для j- го метода. $\bar{\sigma}_{\max} \in [0,1]$; $\bar{V}_j = V_j / \min_{j=1\div 3}(V_j)$, где V_j - оптимальный объем (вес) пластины для метода j. $\bar{V}_j \in [0,1]$; $\bar{t}_j = t_j / \min_{j=1\div 3}(t_j)$ где t_j - время счета для метода j; $\bar{t}_j \in [1,\infty]$. Результаты представлены в таблице 1. Из анализа данных таблицы следует, что наиболее эффективным по комплексному критерию является метод подзадач.

Таблица 1. Результаты тестовой оптимизации в ANSYS APDL

Параметр	SUBP	FIRST	RAND
a, м	0.0234	0.0229	0.0205
b, м	0.1449	0.1430	0.1485
$\bar{\sigma}_{\max}$	0.995	0.973	0.980
$\bar{V}$	1.000	1.016	1.042
$\bar{t}$	1.000	14.500	3.000
K_{comp}	0.995	0.0661	0.313

Данный метод применен для поиска оптимальных параметров станины. На рис. 3 показан процесс изменения варьируемых параметров в процессе оптимизации. Результат достигнут за 8 итераций.

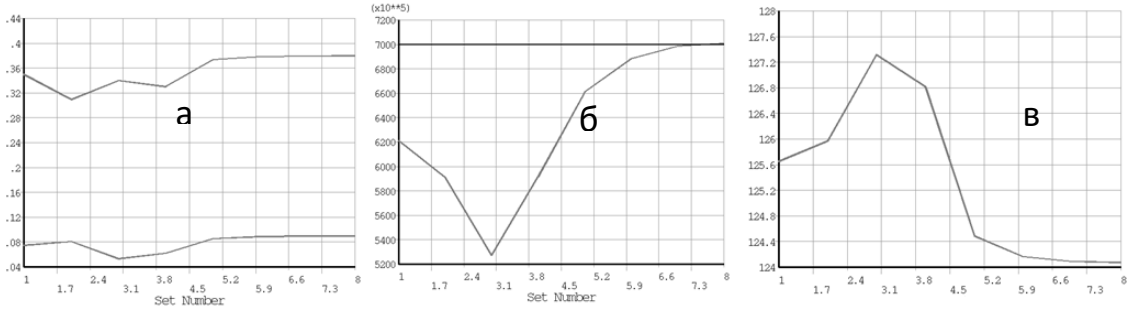


Рис. 3. Зависимость параметров a, b, м (а), σ_{max}, Па (б) и массы, кг (в) от номера итерации

Результаты расчета представлены в таблице 2. Время решения составило 725 секунд на компьютере с процессором Intel Core i7-3930K.

Сравнение оптимальной конструкции с начальной показывает, что оптимальная конструкция легче на 1.59 кг. Распределение интенсивности напряжений для оптимального варианта представлено на рис. 4.

Таблица 3. Результаты оптимизации станины в ANSYS APDL

Параметр	Начальное значение	Оптимальное значение
σ_{max}	621,18 МПа	700,95 МПа
a	75 мм	89 мм
b	350 мм	379 мм
V	125,66 кг	124,07 кг

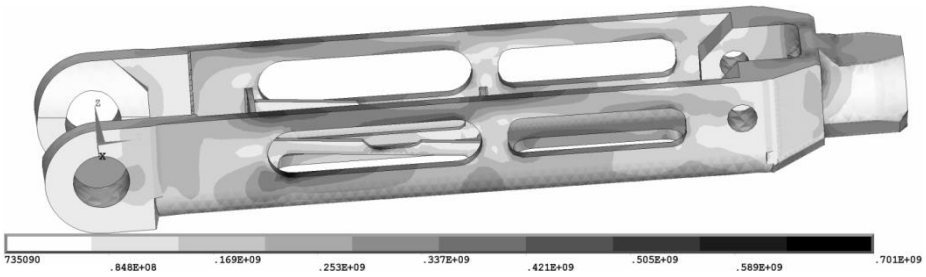


Рис. 4. Распределение эквивалентных по Мизесу напряжений в станине с оптимальными параметрами нижнего бокового выреза.

2. Решение задачи в ANSYS Workbench.

Конечно-элементная модель станины с приложенными нагрузками представлена на рис. 5.

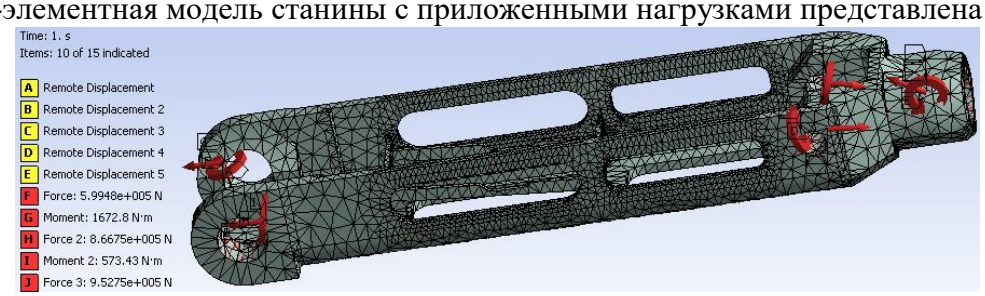


Рис. 5. Дискретный аналог станины в ANSYS Workbench

В отличие от APDL в ANSYS Workbench существует возможность автоматического распределения сосредоточенных сил и моментов по заданным поверхностям, поэтому в расчетной схеме отсутствуют интерфейсные узлы (ср. рис. 1 и рис. 5). Выбранный метод оптимизации – Adaptive Single-Objective (адаптивный одноцелевой метод) [3], сравнение с

другими методами модуля не проводилось. Значения параметров оптимизации выбраны рекомендуемыми по умолчанию. Количество шагов оптимизации – 53. На рисунках 6 показаны зависимости некоторых параметров от номера итерации. Результаты расчета представлены в таблице 2. Время счета на том же компьютере – 183 минуты.

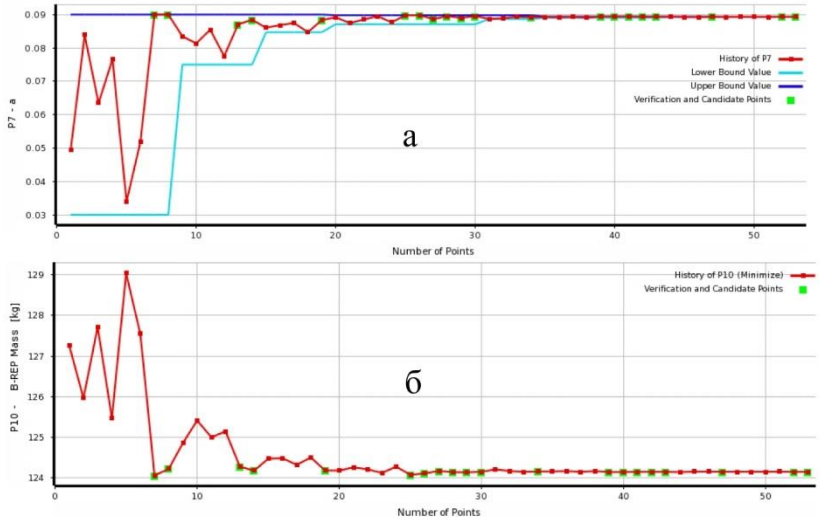


Рис. 6. Зависимость размера *a, м (а) и массы, кг (б)* от номера итерации.

Таблица 2. Результаты оптимизации станины в ANSYS Workbench.

Параметр	Начальное значение	Оптимальное значение
σ_{max}	598,9 МПа	699,8 МПа
a	75 мм	89,1 мм
b	350 мм	378 мм
V	125,66 кг	124,15 кг

Конструкция с оптимальными параметрами легче первоначальной на 1.51 кг. При этом ограничение по максимальным напряжениям выполняется.

Проведенные расчеты показывают, что оптимальные варианты конструкции станины, полученные различными способами (снижение массы примерно на 1.5 кг), отличаются несущественно (не более чем на 0.1% по массе и размерам выреза). При этом затраты времени на решение задачи в Design Exploration в ANSYS Workbench примерно в 15 раз превышают время работы в Design Optimization. Данное различие может быть не столь существенным в задачах с большим числом варьируемых параметров и при многокритериальной оптимизации. Кроме того, при расчете ответственных элементов конструкций специального назначения требуется проверка его результатов с применением альтернативного программного обеспечения.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. *О.Ю. Сметанников, В.В. Зыков, К.А. Могильников*. Анализ прочности изделий на базе специализированных расчетных автоматизированных систем // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. №5. С. 62-65
2. http://imechanica.org/files/AdvacedAnsys.pdf
3. https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.0/en-us/help/wb_dx/dx_theory_KNLPQL.html

01.02.05

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Кафедра Вычислительной Математики и Механики,
Пермь, ilinykh.pnipu@yandex.ru

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ОБЛАСТИ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ

Решение задач газодинамики с подвижными стенками представляет собой процесс, включающий трудности построения сетки, а также большую ресурсоемкость при вычислении, особенно в условиях больших перемещений границ. В работе представлено численное решение в пакете ANSYS CFX нестационарной задачи течения сверхзвукового газового потока с заменой непрерывного решения на совокупность решений в различные моменты времени. Приведена методика получения граничных условий для задачи теплопроводности твердого тела, находящегося в поле действия потока, включающая усреднение температурных полей в пакете Matlab.

Ключевые слова: *ANSYS CFX, Matlab, теплопроводность, газодинамика, уравнения Навье-Стокса.*

В задачах о натекании сверхзвукового газового потока на твердое тело с подвижными границами в ряде случаеа неустойчивое течение. Данный факт, а также нелинейность в общем случае таких задач приводит к трудностям в получении аналитического решения. Поэтому для расчета неустойчивого потока наиболее актуальным способом являются численные методы, в том числе метод крупных частиц [1] с эйлерово-лагранжевой подходом, включающим неподвижную расчетную сетку для области решения и совокупность крупных частиц для твердого тела. Другой, подход, реализованный в пакете ANSYS CFX, исключает твердое тело из расчетной области, при этом его подвижность требует перестроения сетки с интерполяцией параметров на новую область решения [2] на каждом шаге по времени. В данной работе применяется методика, основанная на интерполяции нескольких квазистационарных дискретных решений в ограниченном числе положений подвижной стенки с осреднением параметров неустойчивого потока.

Конечной целью данного исследования является оценка возможности повторного использования стеклопластиковой трубы специального назначения – направляющей реактивного снаряда. Высокотемпературная газовая струя вызывает деструкцию материала, при этом ее глубина является критерием для оценки живучести трубы. В данной работе рассматривается первый этап этой задачи – расчет распределения температуры по поверхности изделия. При этом непрерывное нестационарное решение задачи течения с подвижной стенкой заменено аналогом в виде ряда решений для различных положений снаряда. Корректность данной замены обусловлена высокой скоростью струи по отношению к скорости движения снаряда (в 100-200 раз). Предварительный расчет выявил нестабильность потока в промежутке времени, соответствующем фиксированному положению объекта и необходимость осреднения на указанном интервале значений температуры, скорости и давления. К причинам нестабильности можно отнести характер сверхзвукового течения с большими значениями числа Маха и конфигурацию модели, включающую преграду в виде трубы [3]. При этом поведение газовой струи существенно зависит от взаимного расположения трубы и снаряда, и в некоторые моменты времени до его вылета течение стабильно.

Расчетная схема представлена на рис. 1. Ось симметрии совпадает с осью X. На выходе из сопла (Γ_1 на рис. 1) заданы равномерно распределенные по сечению скорость, давление и температура: $U_x = 2000$ м/с, $P = 30$ атм, $T = 3688$°K. На границе Γ_2 на рис. 1 заданы

скорость и температура окружающего воздуха: $U_x = 3$ м/с, $T = 293$°K. На выходе (Γ_3 на рис. 1) приложено нулевое избыточное давление.

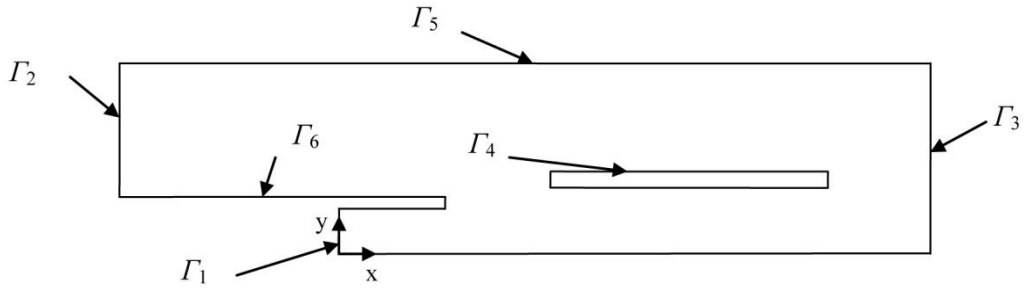


Рис. 1. Расчетная область задачи

На внешней границе (Γ_5 на рис. 1) заданы открытые граничные условия с нулевым давлением и температурой окружающей среды равной $T = 293$°K. Стенки трубы и корпуса снаряда (Γ_4, Γ_6 на рис. 1) – адиабатические, с полным прилипанием. Для реализации задачи в CFX расчетная область представлена в виде сектора с двумя плоскостями симметрии.

Время вылета снаряда 0.13 с. Ускорение за это время изменяется линейно. Закон движения снаряда:

$$S = \frac{kt^3}{6} + \frac{a_0 t^2}{2}, \tag{1}$$

где k, a_0 - константы.

Общий алгоритм исследования включает:

1. Создание ряда сеток в пакете ANSYS Mechanical APDL, соответствующих различным положениям снаряда,
2. Решение нестационарной задачи газодинамики для набора выбранных положений в пакете ANSYS CFX и экспорт результатов в виде значений температуры на границах трубы,
3. Импорт значений температуры, полученных в п. 2, их усреднение в пакете Matlab и последующий экспорт усредненных значений,
4. Решение нестационарной задачи теплопроводности в стенках трубы с граничными условиями третьего рода с использованием результатов п. 3 в качестве температуры окружающей среды.

В рамках данной работы реализованы первые три пункта алгоритма.

Краевая задача МЖГ с $k-\varepsilon$ моделью турбулентности включает [4]:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \bar{U} = 0 \tag{2}$$

уравнения движения

$$\partial\left(\rho\bar{U}\right)/\partial t + \nabla\left(\rho\bar{U}\otimes\bar{U}\right) = -\nabla\left(\mu_{eff}\left(\nabla\bar{U} + \left(\nabla\bar{U}\right)^T\right)\right) \tag{3}$$

$P' = P + 2/3\rho k$,

$$\partial\left(\rho\tilde{h}\right)/\partial t - \partial P/\partial t + \nabla\left(\rho\bar{U}\tilde{h}\right) = \nabla\left(\lambda\nabla T + \nabla\mu_t h/\mathrm{Pr}_t\right) + \nabla\left(\bar{U}\tau^{eff}\right) \tag{4}$$

уравнение переноса энергии

$$\tau_{ij}^{eff} = \tau_{ij} - \mu_t\left(\partial U_i/\partial x_j + \partial U_j/\partial x_i\right) + \frac{2}{3}\delta_{ij}\left(\rho k + \mu_t \partial U_k/\partial x_k\right) \tag{5}$$

уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\partial\left(\rho k\right)/\partial t + \left(\rho U_j k\right)/\partial x_j = \partial\left[\left(\mu + \mu_t/\sigma_k\right)\partial k/\partial x_j\right]/\partial x_j + P_k - \rho\varepsilon \tag{6}$$

уравнение вихревой диссипации

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial\left(\rho U_j\varepsilon\right)}{\partial x_j}=\frac{\partial\left[\left(\mu+\mu_t/\sigma_\varepsilon\right)\partial\varepsilon/\partial x_j\right]}{\partial x_j}+\varepsilon/k\left(C_{\varepsilon1}P_k-C_{\varepsilon2}\rho\varepsilon\right) \quad (7)$$

$$P_k=\mu_t\left(\partial U_i/\partial x_j+\partial U_j/\partial x_i\right)\partial U_j/\partial x_i-2/3(\partial U_k/\partial x_k)\left(3\mu_t\partial U_k/\partial x_k+\rho k\right) \quad (8)$$

где $\bar{U}$ - вектор скорости, ρ - плотность, μ - динамическая вязкость, $\mu_t=C_\mu\rho k^2/\varepsilon$ - турбулентная вязкость, λ - коэффициент теплопроводности, ω - молярная масса, c_p - теплоемкость при постоянном давлении, P - давление, T - температура, h - энтальпия, $\tilde{h}=h+\bar{U}\bar{U}/2$ - полная энтальпия, R_0 - универсальная газовая постоянная, ∇ - оператор Гамильтона, C_{ij} - константы.

Упрощение в виде использования однофазной среды (воздух) на этапе разработки методики позволило значительно снизить время расчетов. Дискретизация уравнений (2)-(8) в CFX реализуется с использованием метода контрольного объема [5]. Для аппроксимации по времени всех уравнений была применена разностная схема Эйлера второго порядка.

Обработка результатов включала получение дискретных данных о температуре потока на границах трубы, которые после, с помощью созданного на языке CCL автоматического алгоритма, были экспортирован. На рис. 2. представлено распределение температуры для начального момента времени.

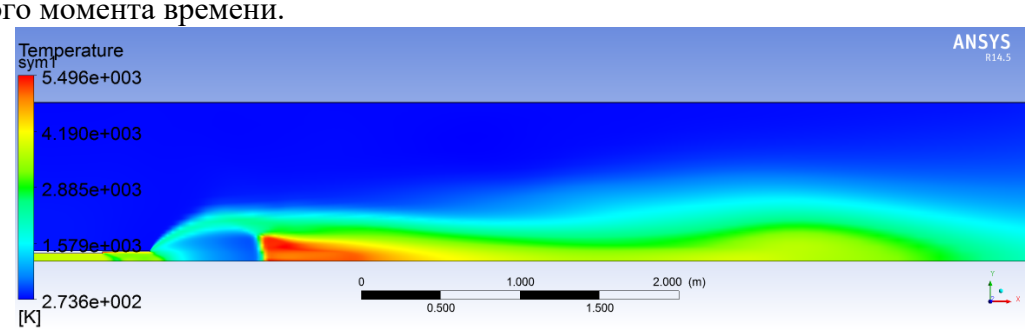
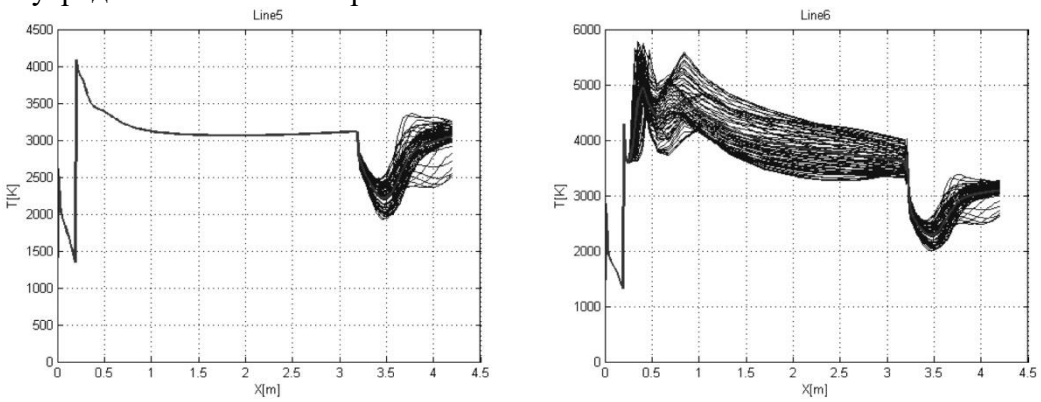


Рис. 2 – Распределение температуры для начального момента времени

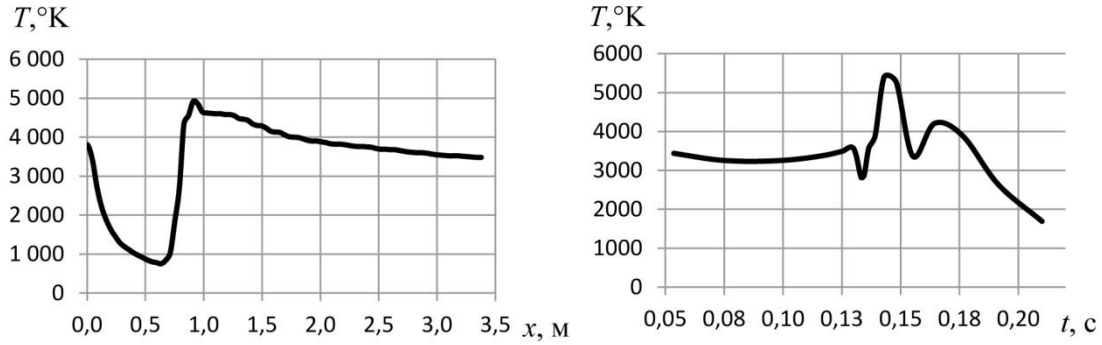
На третьем этапе полученные группы решений были усреднены в пакете Matlab, пример результатов усреднения показан на рис. 3.



а б

Рис. 3 - Распределение температуры: а – сечение по внутреннему радиусу, б – сечение по внешнему радиусу

На рис. 3 представлены кривые, описывающие температуру в сечении для различных моментов времени (тонкие линии) и усредненные значения (жирная линия). На некоторых участках наблюдаются зоны с установившимся потоком, а вариации параметров струи лежат в некотором «коридоре», в отдельных положениях наблюдается периодичность результатов. Полученные данные в дальнейшем используются в качестве граничных условий в модели нестационарной теплопроводности на 4 этапе описанного ранее алгоритма исследования.



а б

Рис. 4 – Распределение температуры: а – на уровне внутренней стороны трубы для начального момента времени, б – на правом торце в зависимости от времени

Структура струи включает участок пониженной температуры непосредственно после сопла (см. рис. 2) с переходом на пиковое значение на расстоянии 0.9 м (рис. 4, а). До вылета снаряда (0.13 с) температура на внутренней стороне трубы держится на постоянном уровне 3400°K (см. рис. 4, б). В момент совпадения участка пиковой температуры струи (0.145 с) с входом трубы происходит мгновенный нагрев до значений 5000°K и выше.

Таким образом, представленная методика позволяет качественно и количественно оценить температурное воздействие вылета снаряда на трубу специального назначения, в частности пиковые значения температуры, а также представляет данные для дальнейшего исследования в рамках задачи теплопроводности трубы. Применяемая методика позволила снизить ресурсоемкость исследования за счет исключения процедуры перестроения сетки на каждом шаге по времени, присущей стандартному подходу решения подобных задач [1], время счета снижается примерно в 15 раз .

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «ПНИПУ» при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. Вычислительный эксперимент. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
2. *Сметанников О.Ю., Поносов Н.П.* Исследование газодинамического нестационарного потока с подвижными границами в Ansys CFX // Научно-технический вестник Поволжья. - 2012. - №5. С. 45-48.
3. *Набережнова Г.В., Нестеров Ю.Н.* Неустойчивое взаимодействие сверхзвуковой недорасширенной струи с цилиндрической полостью // Ученые записки ЦАГИ. – 1983. Т. 14, № 4.
4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – 7-е изд.. М.: Дрофа, 2003.- 840 с.
5. *Волков К.Н.* Дискретизация уравнений Навье-Стокса на подвижных неструктурированных сетках // Вычислительные методы и программирование. 2008. т. 9. - С. 256-273.

01.02.04

[1]Н.С. Созонов, [2]И.Н. Шардаков д.ф.-м.н.

[1]Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермь, sozonov.nik@bk.ru
[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН,
Пермь, shardakov@icmm.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ

В статье приведены результаты математического моделирования деформирования металлической пластины с дефектом с закрепленным на ней волоконно-оптическим датчиком. Показано, что датчик, расположенный на достаточном удалении от дефекта, достоверно отражает деформационное состояние пластины. При размещении датчика вблизи дефекта его показания дают существенно искаженную картину деформации.

Ключевые слова: *волоконно-оптические датчики деформации, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.*

Введение

Первые идеи о создании датчиков на основе оптического волокна начали реализовывать в 70-х годов прошлого века [1]. С этого времени непрерывно ведутся работы по созданию и совершенствованию волоконно-оптических датчиков (ВОД). Этому способствует все возрастающая потребность в средствах измерения для систем контроля и управления, смарт-структур, аэрокосмической техники и др. Ряд качеств, таких как взрывобезопасность, химическая инертность, пассивность по отношению к электричеству и устойчивость к вибрациям и ударам, позволяет применять ВОД там, где применение традиционных электрических датчиков требует дополнительных усилий или невозможно. Современные волоконно-оптические датчики позволяют измерять такие физические параметры как давление [2], температура [3], угловая скорость [4], деформация [5], магнитное поле [6], и т.д. В настоящее время волоконно-оптические датчики активно используются при мониторинге деформационного состояния трубопроводных систем. Предпринимаются попытки использовать волоконно-оптические датчики для обнаружения разнообразных дефектов трубопроводов, например, возникающих вследствие стресс-коррозии.

Вопросу использования датчиков посвящены многочисленные публикации. Но по-прежнему для каждого варианта конструктивного исполнения датчика остается актуальным вопрос о соотношении истинного значения измеряемой величины с регистрируемым сигналом, т.е. определение калибровочного коэффициента. Прояснить ситуацию может моделирование деформационного взаимодействия датчика с поверхностью исследуемого объекта. Именно этому вопросу посвящена данная статья.

Моделирование показаний волоконно-оптического датчика деформации.

Рассмотрим стальную прямоугольную пластину размером 100×400мм с пропилом глубиной 2 мм, моделирующую фрагмент металлического трубопровода с трещиной (Рис. 1). Пластина подвергается деформированию вдоль продольной оси, которое задается кинематически путем относительного смещения торцевых сечений на 0.1% ее длины (1000 мкм/м). Вблизи пропила на пластине размещен волоконно-оптический датчик деформации, представляющий собой оптическое волокно с брэгговской решеткой [7], закрепленное в двух точках на металлической подложке, приваренной по периметру к пластине. На подложке в местах крепления волокна имеются два технологических отверстия. Показания датчика будем считать соответствующими деформации участка подложки, расположенного между точками крепления оптического волокна (отверстиями).

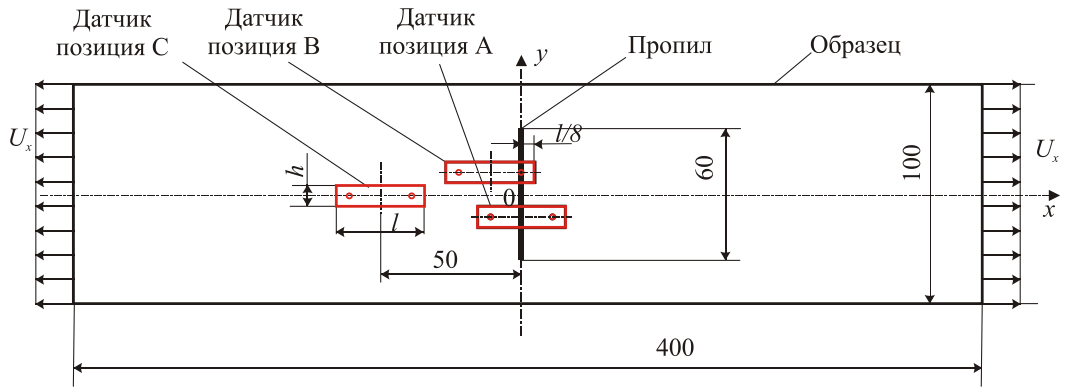


Рис. 1 – Схема образца с закрепленными волоконно-оптическими датчиками

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния растянутой пластины совместно с закрепленным на ней датчиком позволяет сопоставить поле деформации, формирующееся в образце, с показаниями датчика. Моделирование ведется в рамках теории упругости. Численная реализация выполнена с использованием программного комплекса ANSYS. В ходе численных экспериментов использовались датчики, имеющие различные размеры подложки *l*×*h:* 80×20, 40×10, 20×5 и 10×2.5 мм, обозначенные далее соответственно как Датчики 1, 2, 3 и 4. При этом анализировалось три варианта закрепления датчика на пластине: симметрично относительно дефекта, с некоторым смещением от его центра и на достаточном удалении от него. (Рис. 1, позиции А, В и С).

На рисунках 2-4 представлены графики распределения деформаций пластины вдоль продольной оси и соответствующие деформации подложки датчика на участке между точками крепления волокна при различных вариантах размещения датчика. Сплошная линия на графиках относится к пластине, а линии с маркерами – к подложкам разного размера. Распределение деформаций, полученное для датчиков с разными размерами подложки, позволяет продемонстрировать, как изменяется «чувствительность» датчика в зависимости от его размеров и позиционирования относительно дефекта.

При данном виде нагружения в пластине реализуется однородное деформационное поле, которое искажается в центре пластины за счет наличия пропила. При размещении датчика симметрично непосредственно над пропилом картина распределения деформаций в подложке датчика существенно зависит от размера подложки (Рис. 2). Размещение датчика на подложке достаточно большого размера приводит к тому, что края подложки, приваренные к пластине, располагаются в зоне однородной деформации, что обеспечивает достаточно однородное распределение деформации в средней зоне подложки (Рис. 2, Датчик 1). При этом уровень деформации, фиксируемый датчиком, оказывается выше значений, реализующихся в пластине. С уменьшением размеров подложки датчик оказывается полностью в зоне неоднородной деформации, и это вызывает в центре подложки резкий рост деформации, существенно превышающий уровень деформации в пластине (Рис. 2, Датчики 3, 4). В предельном случае деформация в центре подложки определяется отношением величины раскрытия пропила при растяжении к его начальной ширине (23000мкм/м).

Распределение деформации в подложке датчика, край которой смещен на 1/8 ее длины относительно центра пропила, представлено на рисунке 3. При таком расположении датчик с длинной подложкой попадает в зону равномерных деформаций (Рис. 3, Датчики 1, 2). Уменьшение базы датчика и смещение его к центру пропила приводит к тому, что в подложке формируется существенно неоднородное поле деформации (Рис. 3, Датчики 3, 4), и в этом случае достаточно сложно судить по показаниям датчика о реальных деформациях на данном участке.

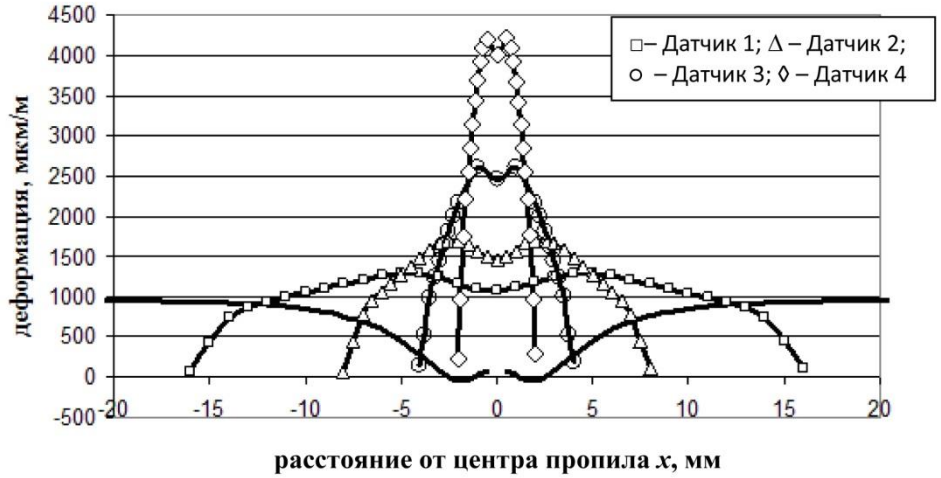


Рис. 2 – Деформация датчиков, расположенных симметрично относительно пропила

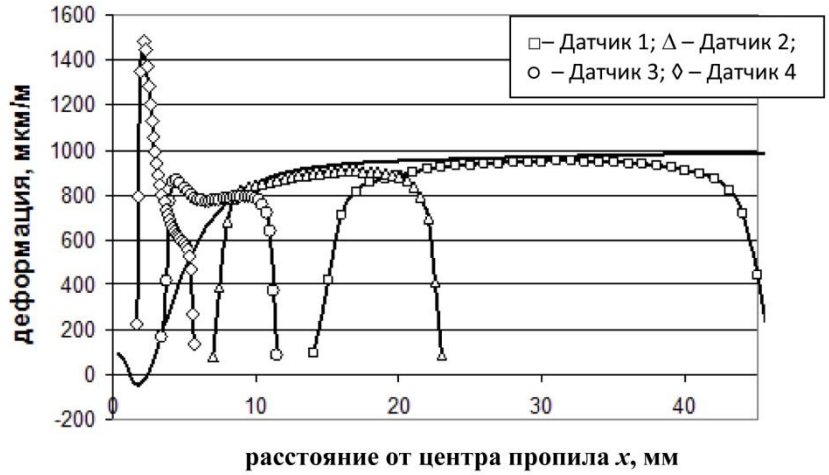


Рис. 3 – Деформация датчиков, расположенных несимметрично пропилу

Размещение датчика на значительном удалении от дефекта дает достаточно однородное поле деформации в средней части подложки, причем значения деформации соответствуют уровню деформации пластины и не зависят от размера подложки (Рис. 4).

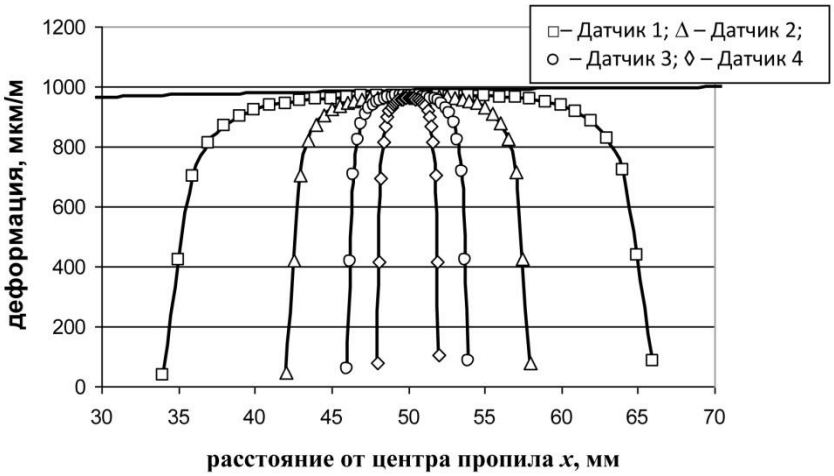


Рис. 4 – Деформация датчиков, расположенных на удалении от пропила

В таблице приведены значения деформации, отвечающие непосредственно показаниям волоконного датчика, полученным как разность перемещений подложки в точках крепления к ней волокна, отнесенная к первоначальной длине волокна. Сравнение этих величин, полученных для датчиков, размещенных со смещением относительно центра пропила, с

данными, приведенными на рисунках 3 и 4, свидетельствует о том, что в этом случае показания датчика достаточно хорошо отражают деформационное состояние пластины в зоне крепления датчика и не зависят от размеров датчика. Показания, относящиеся к датчикам с короткой базой, размещенным непосредственно над пропилом, весьма существенно отличаются от истинных значений деформации пластины. Однако можно заметить, что эти показания несут в себе полезную информацию: Если в процессе мониторинга некоторой конструкции подобный датчик располагается в зоне возможного появления трещин, то резкое изменение его сигнала может свидетельствовать о возникновении дефекта вблизи датчика. Таким образом, всплеск сигнала датчика можно трактовать как индикацию появления дефекта.

Таблица – Деформация оптоволокна при различном расположении датчика

№ датчика	Размер подложки $l \times h$, мм	Показания датчика, мкм/м		
		Позиция А	Позиция В	Позиция С
1	80×40	1027	849	866
2	40×10	1290	809	867
3	20×5	1922	740	864
4	10×2.5	3203	810	857

Заключение

Проведенные численные эксперименты продемонстрировали особенности деформационного взаимодействия волоконно-оптического датчика с поверхностью исследуемого деформируемого объекта. Показано, что деформация, регистрируемая датчиком, расположенным на достаточном удалении от дефекта, достоверно отражает деформационное состояние объекта. При размещении датчика вблизи дефекта его показания дают существенно искаженную картину деформации. Однако информация о резком изменении сигнала датчика в процессе мониторинга может свидетельствовать о возникновении дефекта в наблюдаемой конструкции вблизи датчика.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-48-08028).

Список литературы

1. *Удд Э.* Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с., с. 10.

2. *Томышев К.А, Баган В.А., Астапенко В.А.* Распределенных волоконно-оптические датчики давления для применения в нефтегазовой промышленности // Труды МФТИ. – 2012. – том 4, №2. – с. 64 – 72.

3. *Егоров Ф.А.* Волоконно-оптические датчики, основанные на флуктуационных колебаниях световодных микрооптомеханических резонансных структур // Журнал технической физики. – 2013. – т. 83, вып. 11. – с. 100 – 104.

4. *Листвин В., Логозинский В.* Миниатюрные волоконно-оптические датчики вращения // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. – 2006. – №8. – с. 72 – 76.

5. *Неугодников А.П., Егоров Ф.А., Быковский В.А.* «Экспериментальные исследования волоконно-оптических датчиков для контроля деформаций железобетонных конструкций», Второй международный симпозиум "Проблемы современного бетона и железобетона", Минск, октябрь 2009.

6. *Потапов В.Т., Потапов Т.В., Кухта А.В., Удалов М.Е., Мамедов А. М.* Волоконно-оптические датчики магнитного поля и электрического тока на основе эффекта фарадея в кристаллах BI12GEO20 И BI12SIO20 // Спецвыпуск «ФОТОН-ЭКСПРЕСС» – НАУКА. – 2005. – №6. – с. 166-176.

7. *Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М.* Волоконные решетки показателя преломления и их применения // Квантовая электроника. – 2005. – №12. – с. 1085-1103.

01.04.07

[1] П.П. Сырников, [1] Н.В. Зайцева, [1]Е.Ю. Каптелов, [1]С.В. Сенкевич, [1] И.П. Пронин, [2]Р.А. Кастро

[1]Санкт-Петербург, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
[2]Санкт-Петербург, Российский государственный педагогический университет им. А.И.Герцена
Petrovich@mail.ioffe.ru

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$, ИХ СТРУКТУРНЫЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Исследованы структурные, оптические и диэлектрические свойства монокристаллов $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$. Обнаружено, что кристаллическая структура выращенных монокристаллов представляет собой чистый перовскит без каких-либо примесей посторонних фаз. Характер температурных зависимостей диэлектрических параметров свидетельствует о сильном размытии сегнетоэлектрического фазового перехода. Увеличение $tg\delta$ на высоких частотах вызвано смещением средней температуры Кюри в область 100^0 С.

Ключевые слова*: сегнетоэлектрик, структура перовскита, фазовые переходы, температура Кюри*

Натрий-висмутовый титанат $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ (NBT) относится к группе сегнетоэлектриков со структурой перовскита. Повышенный интерес к этому материалу обусловлен поиском сегнетоэлектриков, не содержащих свинца и служащих заменой титанату свинца $PbTiO_3$ в качестве базового материала пьезотехники. NBT характеризуется достаточно высокой температурой Кюри ($\sim 320^0$C) с диэлектрической проницаемостью в максимуме ε_m, достигающей 3000, высокой спонтанной поляризацией, превышающей 40 мкКл/см^2 и ромбоэдрически искаженной перовскитовой решеткой. Макроскопическая поляризация сохраняется в соединении до $\approx 200^o$C. [1-2]. Недавно было показано, что симметрия NBT отличается от ромбоэдрической и определяется как моноклинная [3]. В последнее время интенсивно исследуются структура и физические свойства керамических твердых растворов на основе NBT и сегнетоэлектриков с тетрагональным искажением кубической решетки – калий-висмутового титаната $K_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$, титаната бария $BaTiO_3$ или ниобата калия $KNbO_3$ в области составов, прилегающей к морфотропной фазовой границе, разделяющей ромбоэдрическую и тетрагональную модификации сегнетоэлектрической фазы, и где наблюдаются экстремальные диэлектрические и электромеханические параметры [4-5].

Другим направлением исследований NBT является поиск материалов, также имеющих потенциал практических применений и характеризующихся релаксорными свойствами или обладающих высокой диэлектрической нелинейностью в СВЧ диапазоне в приложении смещающих полей. К таким материалам относятся твердые растворы NBT с перовскитовыми параэлектриками ($CaTiO_3$, $SrTiO_3$, $AgTiO_3$ и т.д.) [6-7]. Кроме того, изучение твердых растворов на основе NBT представляет интерес для лучшего понимания природы и последовательности фазовых переходов и фазового состояния в самом натрий-висмутовом титанате, где представлены как структурные, так и сегнето- и антисегнетоэлектрические фазы. Целью настоящей работы являлось выращивание ранее не исследованных монокристаллов твердых растворов NBT с танталатом калия $KTaO_3$ (KT), характеризация их структуры и состава, исследование релаксорных и оптических свойств.

Монокристаллы $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ - $KTaO_3$ выращивались по методу «раствор в расплаве». Предварительно приготавливалась шихта желаемого твердого раствора - состава 0,75 $Na_{1/2}Bi_{1/2}$ TiO_3 – 0,25 $KTaO_3$. Для выращивания монокристаллов выбиралось соотношение шихты и растворителя в пропорции 80/20. В качестве растворителя использовались исходные реактивы Na_2CO_3, Bi_2O_3 и K_2CO_3 марки ЧДА. Состав загружался в

платиновый тигель, который помещался в высокотемпературную камеру, где состав нагревался до максимальной температуры 1350°С и выдерживался в течение нескольких часов. Выращенные кристаллы представляли собой прозрачные сростки с кубической огранной светло-желтого цвета. Отдельные монокристаллы достигали размеров 6*3*3 мм.

При комнатной температуре кристаллическая структура выращенных монокристаллов представляла собой чистый перовскит без каких-либо примесей посторонних фаз (рис. 1). Параметр псевдокубической решетки твердого раствора составлял a = 0,38880 нм. В соответствии с законом Вегарда состав выращенных кристаллов был определен как 0,81 $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ – 0,19 $KTaO_3$. Состав кристаллов, определенный с помощью метода электронно-зондового рентгеновского микроанализа (EVO-40, оснащенный энергодисперсионной приставкой INCA), показал несколько большую концентрацию танталата калия (≈ 23%).

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости (ε) и диэлектрических потерь ($tg\delta$) (рис. 2) были получены с использованием диэлектрического спектрометра Novocontrol 41 и измерителя иммитанса Е7-20. К образцам прикладывалось измерительное поле 1 В. Частота измерений варьировалась в интервале ~10^2 - 10^8 Гц, а диапазон рабочих температур составлял -100 ÷ 200°С.

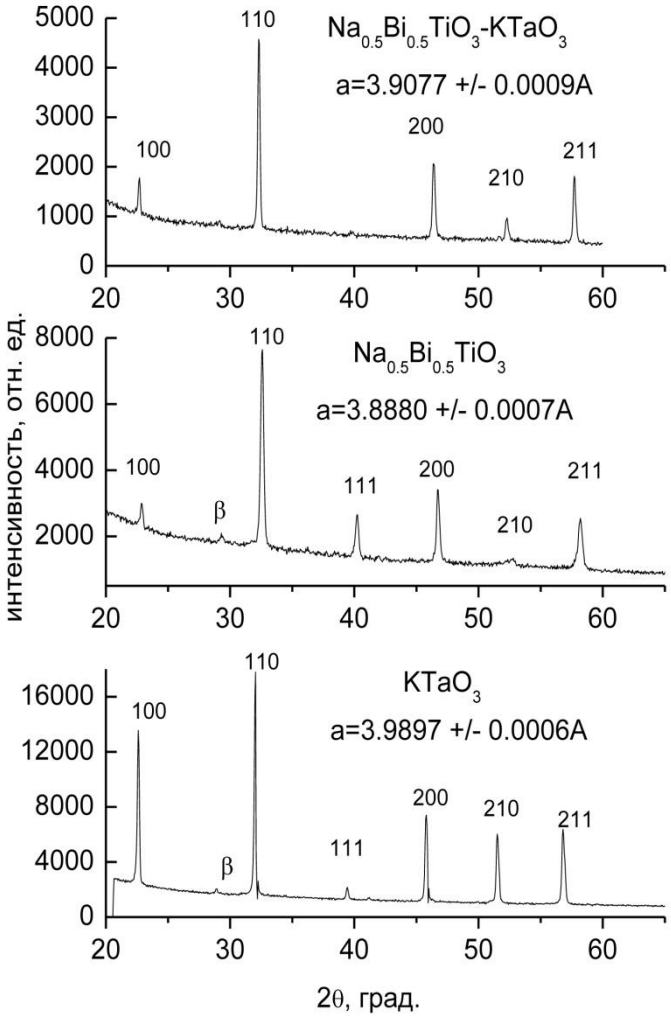


Рис. 1 – Рентгеновские дифрактограммы (θ-2θ) монокристаллов $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ – $KTaO_3$ (а), $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3$ (б) и $KTaO_3$ (в).

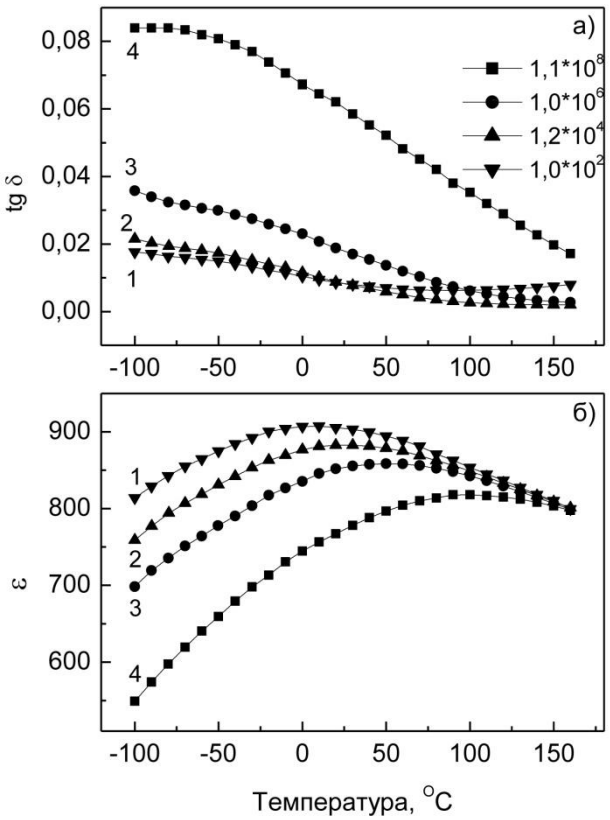


Рис. 2 – Температурные зависимости диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости монокристаллов NBT-KT в интервале частот 10^2 – 10^8 Гц.

В исследованном интервале температур на температурных зависимостях диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь не были обнаружены какие-либо аномалии, отвечающие за структурные фазовые переходы (так называемые антиферродисперсионные переходы или фазовые переходы типа «смятия»), связанные с поворотом октаэдров в перовскитовой кристаллической решетке. Однако изучение оптических свойств кристаллов показало, что в скрещенных поляризаторах можно было наблюдать наличие либо доменной структуры, либо ростовых двойников (рис. 3).

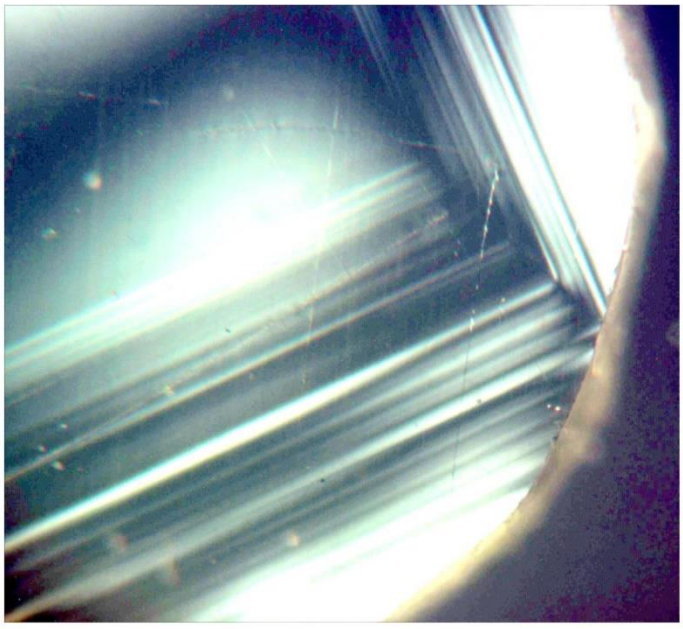


Рис. 3 – Характерная доменная структура (100) монокристалла NBT – KT, наблюдаемая в оптическом микроскопе (увеличение 200^X).

Падающий свет распространялся в направлении одной из псевдокубических (типа <100>) осей кристалла. При вращении столика с кристаллами наблюдалось 90^{o}-е погасание. Направление «доменных» стенок совпадало с ориентацией кубических осей кристалла. Наблюдаемый характер структуры не изменялся при нагревании до температур, превышающих 400^{o}C. Учитывая, что температура Кюри исследуемых монокристаллов расположена в температурном интервале несколько выше комнатной температуры, можно однозначно сказать, что наблюдаемая структура никак не связана с природой размытого фазового перехода.

Работа проводилась при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ №15-02-99476.

Список литературы

1. *I.P Pronin., P.P Syrnikov., V.A. Isupov, V.M Egorov., N.V. Zaitseva.* // Ferroelectrics, 1980, 25, 395-397.
2. *S.B. Vachrushev., V.A Isupov., N.M. Okuneva., B.E. Kviatkovsky, I.P. Pronin., G.A. Smolensky, P.P. Syrnikov.* // Ferroelectrics, 1985, 63, 153-160.
3. *E. Aksel, J.S. Forrester, J.L. Jones, P.A. Thomas, K. Page, M.R. Suchomel* // Appl. Phys. Lett. 2011, 98, 082903.
4. *H. Ishii, H. Nagata, T Takenaka* // Jpn. J. Appl. Phys., 2001, 40, 5660-5663.
5. *C.Chen, X.-P Jiang, Y.-N. Li, F. Wang, Q.-H. Zhang, H.-S. Luo* // Appl. Phys., 2010, 108, 124106.
6. *C.A. Paz de Araujio, G. Taylor* // Ferroelectrics, 1991, 116, 215-228.
7. *N. Izyumskaya, Y.-I. Alivov, S.-J. Cho, H. Morkoç, H. Lee, Y.-S. Kang* // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2007, 32, 111-202.

01.02.05

А.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, tazmeev@gmail.com, tazmeeva@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТНОМ КАТОДЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТОКАХ РАЗРЯДА

Исследованы процессы нагрева и испарения жидкого электролитного катода в диапазоне токов 4−16 А при относительно высокой плотности тока (~0,9 А/см^2). Разряд горел в диффузном виде при атмосферном давлении. Мощность, вкладываемая в разрядный узел, достигала до 20 кВт. Скорость течения электролита через зону действия разряда составляла 0,1−5,0 см/с. Выявлены режимы, в которых вся теплота, идущая от плазмы к жидкому катоду, обратно возвращается парами электролита в разрядную область.

Ключевые слова: *газовый разряд, жидкий катод, теплообмен, проточный электролит.*

Введение. Изучению газовых разрядов, горящих между жидким электролитом и металлическим электродом, а также между двумя жидкостями посвящено значительное число работ. Однако в большинстве из них основное внимание уделено свойствам плазмы в разрядном промежутке. Процессы, происходящие на жидких электродах, остаются мало исследованными. С точки зрения прикладных задач большой интерес представляет жидкий электролитный катод, т.к. он является возобновляемым и обладает практически неограниченным ресурсом.

В работах [1,2] рассмотрен энергетический баланс на жидком катоде. Диапазон изменения тока в [1] составил 25−200 мА. В качестве электролита использована техническая вода. Из выводов этой работы следует, что тепловые потери на катоде в основном определяются потоком тепла от плазмы, т.е. основная часть потока тепла от плазмы к жидкому катоду идёт на нагрев электролита и безвозвратно уносится в систему охлаждения.

В работе [2] диапазон токов расширен до 4 А. Согласно экспериментальным данным, представленным в [2], до 70 % тепла, поступающего от плазмы к жидкому катоду, расходуется на испарение электролита и таким образом возвращается в разрядную область. Здесь электролит поступает в разрядную область через пористый диэлектрик, а плотность тока не превышает 0,1 А/см^2.

Таким образом, имеющиеся экспериментальные факты, в частности, сведения о тепловых потерях на жидком катоде имеют противоречивый характер. Целью данной работы явилось более детальное экспериментальное исследование тепловых явлений на жидкм электролитном катоде, а также получение опытных данных при токах более 4 А и плотностях тока выше 0,1 А/см^2, т.е. дальнейшее расширение диапазонов тока и плотности тока по сравнению с [2].

Эксперимент. Разряд горел при атмосферном давлении между потоком жидкого электролита и водоохлаждаемым анодом. В качестве электролита служил раствор *NaCl* в дистиллированной воде с массовой концентрацией 0,5 – 1,0 кг/м^3. Удельная электрическая проводимость σ находилась в пределах $(0{,}9 - 2{,}1)\cdot 10^{-3}$ (Ом·см)$^{-1}$. Электролит циркулировал через теплообменник. Он протекал в разрядной зоне по каналу прямоугольного сечения шириной 0,08 м. Открытая площадь жидкости в газоразрядном узле составляла 0,06 м^2. Скорость течения v в зоне действия разряда оценивалась как отношение массового расхода электролита через гидронасос к площади поперечного сечения канала в разрядном узле. Инструментальные погрешности измерений v, вычисленные по методике обработки косвенных измерений [3] при доверительной вероятности 0.9, составили ± 0,05 см/с.

Поток электролита через разрядный узел варьировался изменением его подачи от гидронасоса. Толщина слоя электролита h поддерживалась постоянной во время горения разряда. Вместо испарившегося электролита добавлялся свежий электролит от питателя. Его

расход G измерялся поплавковым ротаметром типа РМ-А. После длительного горения разряда проводимость электролита существенно возрастает (причины этого явления в данной работе не рассматриваются). Чтобы компенсировать возрастание проводимости, в качестве свежего электролита использовалась дистиллированная вода. Уровень электролита в разрядном узле контролировался визуально, а подача свежего электролита регулировалась вручную.

За потери тепла на жидком катоде Q_w принят поток тепла, уносимый из разрядной зоны электролитом. Он определялся калориметрическим способом. С учетом погрешностей измерений температуры и массового расхода электролита относительная погрешность Q_w составила 20%.

Обсуждение результатов. В газоразрядном узле происходят достаточно сложные процессы тепломассообмена. У поверхности токоподвода в результате электролиза выделяется водород. Он поднимается через слой электролита наверх и смешивается с потоком пара. Из парогазовой смеси в разрядной зоне образуется плазма.

Электролит испаряется под тепловым воздействием газового разряда. Не исключено, что на испарение электролита может тратиться часть джоулевого тепла, выделяемого в жидком катоде. Теплота, поступающая в электролит, отводится от него в двух направлениях. Первый поток направлен в разрядную область наверх. Это − тепло, уносимое парогазовой смесью. Второй поток идет с электролитом в систему охлаждения и представляет собой тепловые потери на жидком катоде Q_w.

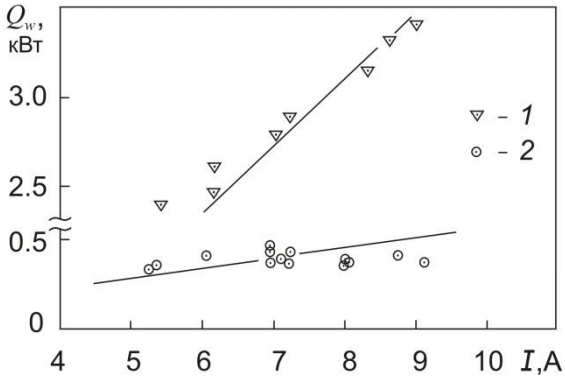


Рис.1 − Тепловые потери на катоде. 1 − 4,5 см/с; 2 − 0,1.

Сплошные линии − аппроксимация экспериментальных данных прямо пропорциональной зависимостью от тока.

На рис.1 приведена зависимость Q_w от тока при различных скоростях течения ν электролита через зону действия разряда. Как видно, тепловые потери на жидком катоде существенно зависят от интенсивности его охлаждения. Чем быстрее протекает электролит через разрядный узел, тем больше тепла уносится в систему охлаждения. Например, в диапазоне токов 7−9 А с увеличением ν от 0,1 до 4,5 см/с тепловые потери возросли практически на порядок величины. Объясняется это следующим образом. При быстром течении электролит меньше нагревается, его омическое сопротивление достаточно высокое и в нем выделяется большое количество джоулевого тепла Q_j. В случае слабого течения электролит успевает нагреться до температуры испарения, его проводимость возрастает и джоулево тепловыделение уменьшается. В этом интервале токов из экспериментальных данных, представленных в [4], следует, что при ν =0,1 см/с падение напряжения на жидком катоде неизменно и составляет ~160 В, следовательно, омическое сопротивление электролита R_e находится в пределах 18−23 Ом. Причем меньшие значения соответствуют верхней границе интервала тока. Расчет джоулевого тепла по этим значениям R_e и сравнение результатов с Q_w, показывает, что тепловые потери меньше, чем Q_j, т.е. не вся джоулева теплота уносится электролитом в систему охлаждения.

Таким образом, тепловые потери на жидком катоде зависят от скорости течения электролита через зону действия разряда. Они могут включать в себя поток тепла от плазмы газового разряда практически полностью как в работе [1], либо лишь небольшую его часть [2]. Это полностью подтверждается опытами, выполненными в данной работе.

Чем больше ток, тем больше площадь “катодного пятна”. Поэтому плотность тока, определяемая как отношение тока к площади “катодного пятна”, в области относительно высоких значений тока слабо зависит от него. В исследованном разрядном узле максимальное значение j_k было ~ 0,9 А/см^2. Очевидно, что плотность потока тепла от плазмы к жидкому катоду пропорциональна j_k. И полный поток тепла от плазмы к катоду, и ток пропорциональны площади “катодного пятна”. Чем больше идёт тепло к жидкому катоду, тем интенсивнее должен испаряться электролит. Таким образом, массовая скорость испарения G тоже должна быть пропорциональной площади “катодного пятна”. По-видимому, этим объясняется практически линейная зависимость G от I (рис.2).

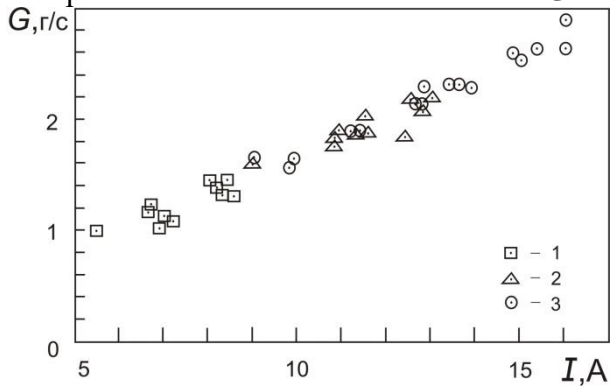


Рис.2 − Массовая скорость испарения электролита в зависимости от тока.
h = 10 мм. ν =0,1 см/с. Площадь рабочего торца анода: 1 − 3,2 см^2; 2 − 9,0; 3 − 10,9.

При интенсивном охлаждении жидкого катода (а это происходит при увеличении скорости течения электролита ν), часть тепла, поступающего на жидкий катод от плазмы, уносится из разрядной области электролитом. В этих условиях теплота, идущая на парообразование, уменьшается и G становится меньше. Такие результаты подтвердились в экспериментах.

Выводы. Нагрев и испарение жидкого электролитного катода существенно зависят от условий охлаждения электролита. При большой интенсивности охлаждения тепло поступает от плазмы к жидкому катоду и уносится из разрядной зоны, а при малой − вся теплота, идущая от плазмы к жидкому катоду, обратно возвращается парами электролита в разрядную область. В последнем случае тепловые потери на жидком катоде определяются джоулевым тепловыделением в электролите.

Список литературы

1. *Гайсин Ф.М., Гизатуллина Ф.А., Камалов Р.Р.* Энергетические характеристики разрядов в атмосфере между электролитом и медным анодом // ФизХОМ. 1985. № 4. С. 58-64.

2. *Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х.* Пористые элементы в генераторах плазмы с жидким электролитным катодом // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 4. С. 107-114.

3. *Новицкий П.В., Зограф М.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. Ленинград: Наука. 1991.

4. *Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Фридланд С.В.* Некоторые результаты экспериментального исследования газового разряда между проточным электролитом и металлическим электродом // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 3. С. 109-115.

01.02.05

Б.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева

Набережночелнинский филиал Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н.Туполева, Набережные Челны, tazmeevb@mail.ru, tazmeeva@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Предложена математическая модель газового разряда между электролитическим катодом и твердотельным анодом. Предполагается, что разряд горит в многоканальном режиме и в отдельно взятом канале формируется предельный участок с неизменными электрофизическими свойствами. Выполнены расчеты характеристик предельного участка разрядного канала.

Ключевые слова: *газовый разряд, жидкий катод, математическая модель.*

Введение.

Парогазовые разряды с электролитическими электродами представляют большой практический интерес, вызванный их особыми свойствами. Плазма такого разряда имеет большой отрыв температуры электронов от температуры тяжелых частиц. Это позволяет получать недостижимые другими путями технологические эффекты, к числу которых можно отнести полирование металлических поверхностей до предельно малых значений показателя шероховатости (до 0,20 мкм и менее); одностадийное получение мелкодисперсного порошка; синтез органических соединений в растворах электролитов, а также возможность использования в качестве уникальной среды для проведения плазмохимических реакций [1-4].

Особенностями данного разряда являются: 1) вольтамперная характеристика, близкая вольтамперной характеристике тлеющего разряда; 2) концентрация электронов в прикатодной области, характерная для дугового разряда; 3) положительный столб разряда состоит из множества разрядных каналов [5].

Целью данной работы явилось математическое описание процессов, происходящих в разряде, с учетом его особенностей.

1. Система уравнений.

В общем случае свойства газоразрядной плазмы описываются уравнениями газовой динамики, которые представляют собой законы сохранения массы, импульса и энергии, а также системой уравнений Максвелла для электродинамики. Закон сохранения массы может быть представлен уравнениями неразрывности для отдельных типов частиц. Если основным механизмом ионизации нейтральных частиц является ионизация прямым электронным ударом, то в гидродинамическом приближении уравнения неразрывности заряженных частиц имеют вид:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + div\Gamma_e = an_e - \beta_{ep} n_e n_p - a_a n_e + a_d n_n + q_i ,$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + div\Gamma_p = an_e - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p + q_i ,$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + div\Gamma_n = a_a n_e - a_d n_n - \beta_{np} n_n n_p ,$$

где Γ_e, Γ_p, Γ_n - плотности потоков электронов, положительных и отрицательных ионов; n_p, n_n, n_e - концентрации положительных и отрицательных ионов, электронов; a - коэффициент ионизации газа электронным ударом; a_a, a_d - частоты прилипания электронов к нейтральным молекулам и отлипания от отрицательных ионов; β_{ep}, β_{np} - коэффициенты электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации; q_i - мощность внешних источников ионизации.

Закон сохранения полной энергии, учитывающий джоулево тепловыделение в объеме, работу сил давления, вязкостное тепловыделение, перенос энергии конвекцией и теплопроводностью, тепловыделение за счет колебательно-поступательной и колебательно-колебательной релаксаций, записывается в виде:

$$C_p \rho V grad T = div(\lambda grad T) + V grad p + \sum_{i \neq j} \left(\frac{\partial V_{xi}}{\partial x_j} \right) \mu_{ij} + \eta j E + Q_{VT} + Q_{VV} .$$

2. Анализ упрощающих факторов.

Как следует из экспериментальных исследований, разряд с жидким электролитным катодом является многоканальным, а свойства разряда практически не меняются при изменении межэлектродного расстояния в достаточно широких пределах [6]. Это обстоятельство является следствием того, что в отдельно взятых разрядных каналах формируются предельные участки с постоянными характеристиками.

В разрядах атмосферного давления имеет место большая плотность частиц, следовательно, можно пренебречь диффузией заряженных частиц. На предельном участке положительного столба пренебрегаем конвективными потоками частиц по радиусу столба. С учетом этих допущений при отсутствии внешних ионизаторов уравнения неразрывности заряженных частиц имеют следующий вид:

(1) $$a n_e - \beta_{ep} n_e n_p - a_a n_e + a_d n_n = 0 ,$$

(2) $$a_a n_e - a_d n_n - \beta_{np} n_n n_p = 0 .$$

В условиях атмосферного давления можно считать, что энергия возбужденных атомов и молекул полностью переходит в энергию их теплового движения. Степень ионизации газа невелика, поэтому можно пренебречь переносом энергии ионизации по сравнению с переносом энергии за счет теплопроводности. А также можно пренебречь вязкой диссипацией энергии, переносом энергии излучением, изменением кинетической энергии газа, переносом энергии в направлении оси канала по сравнению с джоулевой диссипацией энергии электрического поля и переносом тепла за счёт теплопроводности. Следует отметить, что справедливость этих последних упрощающих предположений подтверждается с большой степенью точности и в условиях тлеющего, и в условиях дугового разрядов [7]. С учётом вышеперечисленных упрощений закон сохранения энергии для предельного участка положительного столба отдельно взятого разрядного канала записывается в виде:

(3) $$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left(r \lambda \frac{dT}{dr} \right) + jE = 0 ,$$

где r – рассматриваемый радиус.

Подвижность ионов при атмосферном давлении намного меньше, чем подвижность электронов. Поэтому плотность тока определяется только направленным движением электронов

(4) $$j = e n_e b_e E ,$$

здесь b_e - подвижность электронов.

Ток в отдельном разрядном канале вычисляется по закону Ома

(5) $$I = 2\pi e \int_0^R E b_e n_e r dr ,$$

где R – предельный радиус отдельного разрядного канала.

Система уравнений (1) - (5) дополняется уравнением состояния идеального газа

$$p = nkT$$

и условием квазинейтральности плазмы

$$n_p = n_e + n_n .$$

Число частиц в единице объёма равно суммарному числу заряженных и нейтральных частиц

$$n = n_e + n_p + n_n + n_{нейтр.} .$$

3. Результаты расчетов.

Решение рассмотренной системы уравнений позволяет определить зависимости между параметрами парогазового разряда, в частности, распределение температуры по сечению разрядного канала. По результатам расчета, чем выше ток в разрядном канале, тем больше разница между осевой температурой T_0 и температурой на границе канала T_w при заданном значении среднемассовой температуры плазмы T_c, определяемой экспериментально, что наглядно отображено на графиках распределения температуры (рис.2).

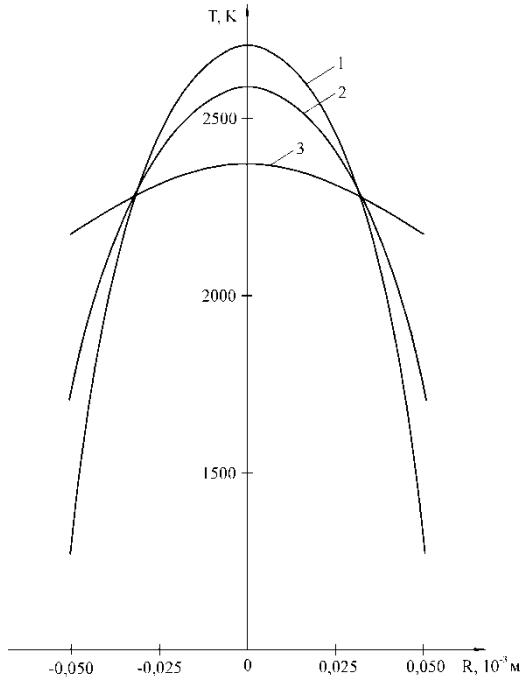


Рис. 2. Распределение температуры в отдельном разрядном канале при T_c=2273 K (2000°C). 1 - T_w=1273 K (1000 °C), I=63 мА; 2- 1773 K (1500°C), I=42 мА; 3 - 2173 K (1900 °C), I=10 мА.

Выводы.

Данная модель является первым приближением при решении системы уравнений, описывающих свойства разряда с электролитным катодом. Результаты, полученные на основе этой модели, могут быть использованы при построении уточненной модели как ориентировочные данные.

Список литературы

1. *Maximov A.I.* Physics, chemistry and applications of the ad diaphragm discharge and related discharge in electrolyte solutions // Plasma Physics. 2007. V. 46. P. 111-118.

2. *Шакирова Г.Ю., Шакиров Ю.И., Валиев Р.А.* Диспергирование порошков в электрическом разряде между стальным анодом и жидким катодом // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2012. №1. С. 81-84.

3.*Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Мифтахов М.Н.* Использование газового разряда между жидким электролитным катодом и металлическим анодом для переработки полимерных отходов // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2006. № 12. С. 25.

4. *Тазмеева Р.Н., Тазмеев Х.К., Зиганшин Р.Р.* Жидкоэлектродные генераторы плазмы средней мощности для технологий переработки отходов // Вестник машиностроения. 2008. № 10. С. 87-89.

5. *Мифтахов М.Н., Тазмеев Х.К., Тазмеев А.Х., Фридланд С.В.* Некоторые результаты экспериментального исследования газового разряда между проточным электролитом и металлическим электродом // Инженерно-физический журнал. 2006. Т. 79. № 3. С. 109-115.

6. *Тазмеев Х.К., Тазмеев Б.Х.* Пористые элементы в генераторах плазмы с жидким электролитным катодом. // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, №4. С.

7. *Даутов Г.Ю., Тимеркаев Б.А.* Генераторы неравновесной газоразрядной плазмы. – Казань: «Фан», 1996. 200 с.

01.01.03

М.Ю. Федотова

Уфимский филиал Финансового университета при Правительстве РФ,
кафедра математики и информатики,
Уфа, mar75852@gmail.com

О СХОДИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИРИХЛЕ

В работе рассмотрена трехмерная сингулярно – возмущенная краевая задача Дирихле со сменой типа граничного условия на узкой полосе. Для данной задачи доказана сходимость собственных значений.

Ключевые слова: *сингулярные возмущения; оператор Лапласа; краевая задача.*

Пусть Ω односвязная трехмерная ограниченная область с бесконечно дифференцируемой границей. Обозначим через γ замкнутую кривую, не имеющую точек самопересечений и лежащую на границе Γ области Ω. Пусть s – натуральный параметр этой кривой, где $0 \le s \le s_0$. Через каждую точку кривой γ проведем геодезическую кривую поверхности Γ перпендикулярно к данной кривой. Обозначим через l – натуральный параметр геодезической кривой ($l = 0$ соответствует точке на кривой γ). Положим $\omega_\varepsilon = \{x \in \Gamma : s \in \gamma, l \in (-\varepsilon;\varepsilon)\}$, где ε – малый параметр ($0 < \varepsilon << 1$).

Пусть γ_ε – произвольная открытая полоска, лежащая в области ω_ε, $\Gamma_\varepsilon = \Gamma \setminus \overline{\gamma}_\varepsilon$.

В работе изучаются сингулярные возмущения краевой задачи Дирихле

$$-\Delta u_0 = \lambda u_0 + f \text{ в } \Omega, \quad u_0 = 0 \text{ на } \Gamma \tag{1}$$

заданием условия Неймана на узкой полосе

$$-\Delta u_\varepsilon = \lambda u_\varepsilon + f \text{ в } \Omega, \quad \frac{\partial u_\varepsilon}{\partial \tau} = 0 \text{ на } \gamma_\varepsilon, \quad u_\varepsilon = 0 \text{ на } \Gamma_\varepsilon, \tag{2}$$

где τ – внешняя нормаль. Всюду далее будем называть задачу (2) возмущенной, а задачу (1) предельной.

Пусть $L_2(K)$ и $W_2^1(K)$ – пространства Соболева с нормами $\|\bullet\|_{0,K}$ и $\|\bullet\|_{1,K}$ соответственно, $W_2^1(K;\delta)$ – замыкание в норме $W_2^1(K)$ функций из $C^\infty(\overline{K})$, равных нулю вблизи $\delta \subset \partial K$, $(\bullet,\bullet)$ – скалярное произведение функций в $L_2(K)$.

Пусть $f \in L_2(\Omega)$. Решения краевых задач (1) и (2) будем рассматривать в смысле теории распределений. То есть под решением краевой задачи (2) (задачи (1)) будем понимать элемент $u_\varepsilon = u \in W_2^1(\Omega;\Gamma_\varepsilon)$ ($u_0 = u \in W_2^1(\Omega;\Gamma)$), удовлетворяющий тождеству

$$(\nabla u, \nabla \eta) = \lambda (u, \eta) + (f, \eta) \tag{3}$$

при любом $\eta \in W_2^1(\Omega;\Gamma_\varepsilon)$ ($\eta \in W_2^1(\Omega;\Gamma)$).

Заметим, что краевые задачи в трехмерных областях для оператора Лапласа в случае, когда в области есть малая полость, на границе которой, задается краевое условие Неймана, были рассмотрены в [1], [2]. Задачи со сменой типа граничного условия на малом пятне, стягивающимся в точку, были изучены в [3]. Рассматриваемая задача является в определенном смысле развитием этих постановок. Кроме того, в [4] была исследована сходимость решений сингулярно возмущенной задачи (2). Для данной задачи были доказаны существование и единственность решений, а также равномерная по λ и ε сходимость решений возмущенной задачи (2) к решениям предельной задачи (1).

Основной целью работы является доказательство следующего утверждения.

Теорема 2. Пусть λ_0 – собственное значение предельной задачи (1). Тогда справедливы следующие утверждения.

1) Существует собственное значение λ_ε возмущенной краевой задачи (2), которое при $\varepsilon \to 0$ сходится к λ_0.

2) Если кратность λ_0 равна N, то к нему сходится N собственных значений возмущенной задачи (с учетом совокупной кратности).

Доказательство теоремы 2. Обозначим через $S(r,z)$ – открытый круг на комплексной плоскости радиуса r с центром в точке z. Предположим, что λ_0 произвольное собственное значение предельной задачи. Известно, что собственные значения не имеют конечных точек накопления. Это означает, что существует радиус $R>0$, такой, что $\overline{S}(R,\lambda_0)$ при любых $r \le R$ не содержит собственных значений предельной задачи, отличных от λ_0. Поэтому, в силу утверждений теоремы (1), $\partial S(r,\lambda_0)$ не содержит собственных значений возмущенной задачи. Кроме того, в силу теоремы Лебега для решения задачи (2) при $\varepsilon \to 0$ справедлива сходимость

$$\int\limits_{\partial S(r,\lambda_0)} \left\| u_\varepsilon(x,\lambda) - u_0(x,\lambda) \right\|_{1,\Omega} d\lambda \to 0.$$

Отсюда следует, что при любой правой части $f \in L_2(\Omega)$ справедлива сходимость

$$\int\limits_{\partial S(r,\lambda_0)} u_\varepsilon(x,\lambda) \to \int\limits_{\partial S(r,\lambda_0)} u_0(x,\lambda) d\lambda. \qquad (4)$$

Хорошо известно, что резольвенты краевых задач (1), (2) имеют полюсы только первого порядка, которые являются собственными значениями этих задач. Вычеты же в них являются проекторами в $L_2(\Omega)$ на подпространства, натянутые на собственные функции. Справедливо и обратное. Любое собственное значение является полюсом резольвенты первого порядка. Положим $f = \psi_0$. Тогда правая часть (4) не равна нулю, а при достаточно малых ε не равна нулю и левая часть соотношения (4). Поэтому в $S(r,z)$ существует собственное значение λ_ε возмущенной краевой задачи (2), которое в силу произвола в выборе r при $\varepsilon \to 0$ сходится к λ_0.

Докажем теперь пункт 2). Пусть λ_ε – любое собственное значение возмущенной задачи, сходящееся к простому собственному значению λ_0 предельной задачи, а ψ_ε, ψ_0 – соответствующие собственные функции, нормированные в $L_2(\Omega)$. Тогда из (3) очевидным образом следует оценка

$$\left\| \psi_\varepsilon \right\|_{1,\Omega} \le C. \qquad (5)$$

Предположим, что существует некоторая последовательность $\varepsilon_k \to 0$ при $k \to \infty$ на которой совокупная кратность T собственных значений возмущенной задачи отлична от N. Тогда при $\varepsilon = \varepsilon_k$ существуют T собственных функций $\psi_\varepsilon^{(1)}, \psi_\varepsilon^{(2)}, ..., \psi_\varepsilon^{(T)}$ соответствующих собственным значениям, сходящимся к λ_0.

Из (5), слабой компактности ограниченного множества в $W_2^1(\Omega)$ и компактности вложения $W_2^1(\Omega)$ в $L_2(\Omega)$ следует, что существует подпоследовательность $\left\{\varepsilon_{k_m}\right\}_{m=1}^{\infty}$ сходящаяся к нулю при $m \to \infty$, что $\left\| \psi_{\varepsilon_{k_m}}^{(i)} - \psi_0^{(i)} \right\|_{0,\Omega} \to 0$, где $\psi_0^{(i)}$ – ортонормированные в $L_2(\Omega)$ собственные функции предельной задачи, соответствующие λ_0. Отсюда, так как кратность λ_0 равна N, то $T \le N$.

Предположим, что $T < N$. Тогда существует собственная функция ψ_0^{T+1} предельной задачи, которая будет ортогональна $\psi_0^{(i)}$ при $i \le T$. Пусть

$$f(x,\varepsilon) = \psi_0^{T+1}(x) - \sum_{i=1}^{T} \left(\psi_0^{T+1}, \psi_\varepsilon^{(i)}\right) \psi_\varepsilon^{(i)}(x), \quad x \in \Omega.$$

По определению

$$\left(f(\cdot,\varepsilon), \psi_\varepsilon^{(i)}\right) = 0 \qquad (6)$$

при $i \le T$ и $f(x,\varepsilon) \to f_0(x) = \psi_0^{T+1}(x)$ в $L_2(\Omega)$ при $\varepsilon \to 0$. Учитывая ограниченность решений возмущенной задачи, равномерную по λ и ε сходимость решений возмущенной задачи к решениям предельной задачи, легко показать, что сходимость данная сходимость имеет место и для произвольных $f(x,\varepsilon)$, сходящихся в $L_2(\Omega)$. Следовательно, имеет место сходимость (4), причем ее правая часть отлична от нуля. С другой стороны, из (6) следует, что левая часть (4) равна нулю. Из полученного противоречия заключаем, что $T = N$. Теорема доказана.

В заключение заметим, что доказанная теорема является ключевой для строгого обоснования асимптотик. В свою очередь асимптотики собственных элементов лапласиана с сингулярными возмущениями граничных условий на узких и тонких множествах были построены в [5], [6].

Список литературы

1. *Назаров С.А., Паукшто М.В.* Дискретные модели и осреднение в задачах теории упругости. Л.: Ленинградский университет, 1984.

2. *Ильин А.М.* Краевая задача для эллиптического уравнения второго порядка в области с узкой щелью. II. Область с малым отверстием // Математический сборник. – 1977. – Т.103. – С. 265-284.

3. *Гадыльшин Р.Р.* Асимптотика собственного значения сингулярно возмущенной эллиптической задачи с малым параметром в граничном условии // Дифференциальные уравнения. – 1986. – Т.22. № 4. – С. 640-652.

4. *Федотова М.Ю.* О сходимости решений задачи Дирихле со сменой типа граничного условия на узкой полоске // Научно – технический вестник Поволжья. – 2014. –№5. – С.74-76.

5. *Планида М.Ю.* Асимптотики собственных элементов лапласиана с сингулярными возмущениями граничных условий на узких и тонких множествах // Математический сборник. – 2005. – Т.196. № 5. – С.83-120.

6. *Планида М.Ю.* Об асимптотике собственных значений цилиндра, теплоизолированного на узкой полоске // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2003. – Т.43. №3. – С.422-432.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

02.00.04

А.В. Быков, Г.Н. Демиденко, Л.Ж. Никошвили, Г.В. Самойлова

Тверской государственный технический университет, химико-технологический факультет, кафедра Биотехнологии и химии, Тверь, BykovAV@yandex.ru

ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ РУТЕНИЕВЫЙ КАТАЛИЗАТОР В ПРОЦЕССЕ N-АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ

В данной работе представлены результаты каталитического тестирования рутения, стабилизированного в сверхсшитом полистироле, в реакции N-алкилирования ароматических аминов. В ходе исследования показано, что каталитическая система на основе рутения в реакции восстановительного N-алкилирования позволяет достичь высокого соотношения N-монометиланилин/N,N-диметиланилин.

Ключевые слова: *N-алкилирование; рутенийсодержащий катализатор; N-монометиланилин.*

N-алкилирование является одним из основных методов построения углеродного скелета молекулы. В качестве алкилирующих агентов используют, главным образом, галогенпроизводные, непредельные соединения, спирты, простые и сложные эфиры, формальдегид [1, 2].

Реакции N-алкилирования имеют большое значение в синтезе лекарственных веществ, витаминов, в органическом синтезе в целом, а также, позволяют получать один из ценных промышленных продуктов - монометиланилин, применяющийся в значительных количествах в качестве высокоэффективной октаноповышающей добавки к бензину и служащий сырьем в других органических синтезах. В связи с этим возрастает необходимость создания эффективной и селективной каталитической системы синтеза N-метиланилина в жидкой фазе. В реакции восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом в присутствии водорода протестирован рутенийсодержащий полимерстабилизированный катализатор, содержащий 3 массовых процента рутения. В качестве полимерной матрицы использовали измельченный промышленный сорбент MN-100 производства Purolite Inc. Целью каталитического исследования было установление возможности проведения восстановительного алкилирования анилина формальдегидом с получением N-метиланилина на полимерстабилизиванных каталитических системах в жидкой фазе. Как известно, это взаимодействие представляет собой сложный разветвлённый процесс [3], в ходе которого ожидается значительное количество побочных продуктов, число которых можно уменьшить при проведении процесса в более мягких условиях. Первичным продуктом взаимодействия анилина с формальдегидом в нейтральных и слабокислых растворах является аминоспирт [3], который, вследствие своей неустойчивости и в зависимости от условий реакции, превращается либо в метиленанилин, либо в дианилинометан [4]. При взаимодействии анилина с формальдегидом в нейтральной среде при равном мольном соотношении образуется ангидроформальдегиданилин; при увеличении мольного соотношения анилин:формальдегид в реакционной смеси образуется дианилинометан [3]. Взаимодействие анилина с формальдегидом в кислой среде протекает с образованием первичных аминов разной степени конденсации. Из диаминов образуются 2,2’-, 2,4’- и 4,4’-ДАДФМ; кроме того, получаются триамины, тетраамины и другие продукты.

Методы и методики экспериментов и анализа

Методика синтеза катализатора [5-7]: высушенный и измельчённый полимерный сорбент MN-100 пропитывали раствором основного хлорида рутения по влагоемкости, после чего высушивали при 70^0С на воздухе и восстанавливали в токе водорода 100 мл/мин при 300^0С в течение трех часов.

Методика проведения кинетических экспериментов: в реактор-автоклав объемом 50 мл,

предварительно промытый изопропиловым спиртом при температуре 140^0C и высушенный, загружают восстановленный катализатор, взвешенный с точностью до $1*10^{-4}$ г, добавляют расчётное количество реакционных веществ (анилин, формалин) и 40 мл этилового спирта, после чего реактор герметизируют, продувают азотом, устанавливают выбранную скорость перемешивания, температуру, и нагревают до рабочей температуры под давлением азота 2–3 атм. После достижения температуры реакции атмосферу азота заменяют водородом, устанавливают давление 3.0 МПа, скорость перемешивания мешалки 1700 об/мин, и проводят реакцию, отбирая в установленное время 10–12 проб. Методика анализа катализата: анализ катализата проводится с применением метода газовой хроматомасс-спектрометрии на хроматомасс-спектрометре PQ-2010s, оснащенном капиллярной колонкой HP-1MS. Концентрации веществ в составе катализата определялись с применением метода внутреннего стандарта - дифениламина.

Результаты и обсуждение

Для установления влияния концентрации катализатора на активность и селективность процесса, была проведена серия экспериментов с концентрациями активной фазы катализатора от $1.55*10^{-4}$ моль/л до $6.20*10^{-4}$ моль/л при температуре 100 ^{0}C и равными концентрациями анилина и формальдегида $5.4*10^{-2}$ моль/л. Результаты экспериментов представлены на рисунках 1-3. Как следует из рис. 1, увеличение содержания катализатора приводит к ускорению процесса восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом, что отражается в ускорении накопления конечных продуктов реакции.

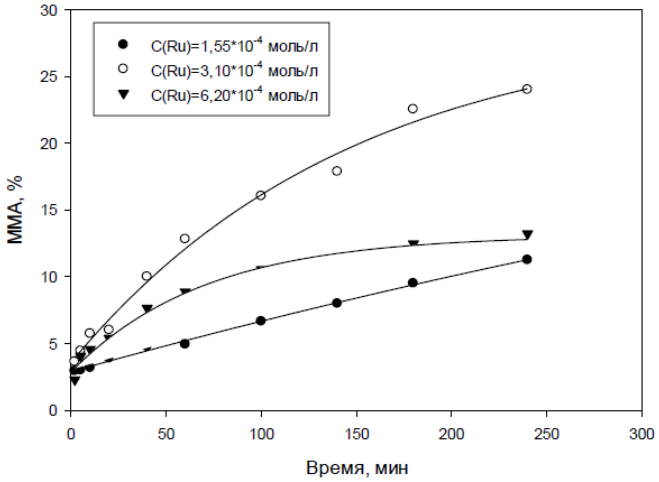


Рис. 1 – Зависимость накопления ММА от концентрации катализатора

Одновременно установлено, что образование метиленанилина не является лимитирующей стадией процесса, поскольку в начальный момент реакции наблюдается почти полная конверсия анилина в метиленанилин, и накопление конечных продуктов обуславливается только взаимодействием этого вещества с водородом на катализаторе. Вне зависимости от концентрации катализатора с увеличением конверсии метиленанилина (МА) наблюдается снижение соотношения N-монометиланилина (ММА) к N,N-диметиланилину (ДМА), т.е. селективность процесса уменьшается с увеличением конверсии полупродукта (рис. 2).

Максимальная селективность в серии экспериментов достигнута для концентрации рутения $3.10*10^{-4}$ моль/л.

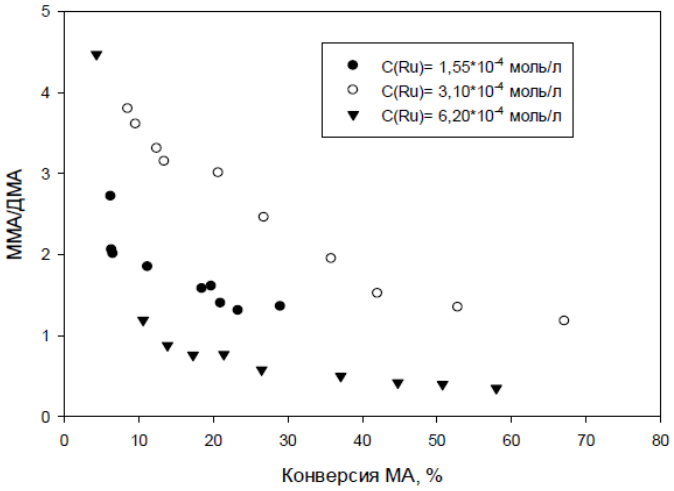


Рис. 2 – Зависимость отношения концентраций ММА к ДМА при накоплении МА при различных концентрациях катализатора

Для установления влияния температуры на скорость и селективность восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом была проведена серия экспериментов с варьированием температуры от 90^0C до 140^0C при тех же условиях. Установлено, что скорость накопления ММА от температуры зависит не линейно. Наблюдается рост скорости накопления ММА от 90^0C до 120^0C, а при дальнейшем увеличении температуры происходит уменьшение скорости накопления этого вещества. Отношение концентраций ММА к ДМА медленно уменьшается с увеличением конверсии МА. Максимум селективности зарегистрирован при температуре 130^0C и составляет 91.3 % при 40 % конверсии МА.

Заключение

В результате проведенных экспериментов установлено, что селективность процесса восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом уменьшается с увеличением конверсии МА. Максимум селективности процесса с использованием 3% рутениевого катализатора, стабилизированного в сверхсшитом полистироле MN-100, в среде этанола достигается при следующих условиях: концентрация катализатора - $3.10*10^{-4}$ моль/л; температура – 130 ^{0}C; а сама каталитическая система на основе полимерного носителя может быть применена в качестве катализатора исследуемого процесса.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант №15-08-01678).

Список литературы

1. *Травень В.Ф.* Органическая химия: учебник для вузов. в 2 т. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. Т. 1., 727 с. Т. 2., 583 с.

2. *Carey F.A., Sundberg R.J.* Advanced Organic Chemistry. New York: Kluwer Academic/Plemum Publishers, 2001. Part B, 981 p.

3. *Бочкарев В.В., Сорока Л.С., Пескова Д.Н.* Реакционная способность нуклеофильных центров анилина в реакции с формальдегидом // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323., № 3. С. 70–75.

4. *Kishore K., Sunthanalakshmi K.N.* A thermochemical study on the reactions of aniline with formaldehyde in the presence of acid medium // Thermochim. acta, 1983. V. 68., № 1. P. 59–74.

5. *Матвеева В.Г., Сапунов В.Н., Григорьев М.Е., Лебедева М.Б., Сульман Э.М.* Кинетика гидрирования D-глюкозы на Ru-содержащем гетерогенном катализаторе // Кинетика и катализ. 2014. Т. 55. № 6. С. 712.

6. *Манаенков О.В., Филатова А.Е., Макеева О.Ю., Кислица О.В., Долуда В.Ю., Сидоров А.И., Матвеева В.Г., Сульман Э.М.* Ru-содержащие катализаторы на полимерной основе для конверсии целлюлозы в полиолы // Катализ в промышленности. 2014. № 2. С. 65-72.

7. *Doluda V.Y., Sulman E.M., Matveeva V.G., Sulman M.G., Bykov A.V., Lakina N.V., Sidorov A.I., Valetsky P.M., Bronstein L.M.* Phenol catalytic wet air oxidation over Ru nanoparticles formed in hypercrosslinked polystyrene // Topics in Catalysis. 2013. Т. 56. № 9-10. С. 688-695.

02.00.15

О.В. Кислица[1], О.В. Манаенков[1], В.Г. Матвеева[1], А.Е. Филатова[1], В.Ю. Долуда[1], Э.М. Сульман[1], А.И. Сидоров[1], В.В. Шумилов[1], М.Б. Лебедева[1], Е.В. Ребров[1,2]

[1]Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии, Тверь, Россия, ovman@yandex.ru
[2]University of Warwick, School of Engineering, Coventry, UK

ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

В данной работе представлены результаты исследования процесса гидролитического гидрирования целлюлозы с использованием катализаторов на основе сверхсшитого полистирола (СПС). Приведены данные физико-химических исследований используемых катализаторов, данные о зависимости протекания процесса от условий реакции, а также результаты кинетических расчётов.

Ключевые слова: *сверхсшитый полистирол, гидролитическое гидрирование, целлюлоза, субкритическая вода, полиолы.*

Начало исследований процесса гидролитического гидрирования целлюлозы было положено в СССР Баландиным А.А. [1]. В 2000-х гг. появились работы, в которых указывалась возможность проведения процесса гидролитического гидрирования целлюлозы в среде субкритической воды, при температуре 180 – 260 °С [2 - 4]. В настоящее время усилия исследователей сосредоточены на поиске эффективных катализаторов, способных повысить выход целевого продукта реакции гидролитического гидрирования целлюлозы – сорбитола [5]. Нами для данного процесса был предложена новая каталитическая система – Ru-содержащие катализаторы на основе сверхсшитого полистирола (СПС) [6, 7, 8].

Цель данной работы – исследование физико-химических закономерностей процесса гидролитического гидрирования целлюлозы в субкритической воде в присутствии Ru-содержащих катализаторов на основе СПС, получение данных о влиянии на процесс условий реакции и определение кинетических параметров.

Экспериментальная часть

Для приготовления катализаторов использовался СПС трёх марок: MN270 (нефункционализированный); MN100 (функционализированный аминогруппами) и MN500 (функционализированный сульфогруппами). Методики приготовления катализаторов, физико-химических исследований и экспериментов были ранее описаны в работах [6, 7].

Результаты и обсуждение

В таблице 1 представлены результаты определения удельной поверхности образцов СПС и катализаторов на их основе.

Таблица 1 – Результаты измерения удельной поверхности исходных образцов СПС и использованных в работе катализаторов

Образец	Площадь поверхности, $м^2/г$		
	Лэнгмюр	БЭТ	t-график
MN 270	1500	1420	295* 1140**
MN 100	840	730	200* 590**
MN 500	650	540	150* 450**
1.0 % Ru/СПС MN 270	1270	1180	250* 990**
1.0 % Ru/СПС MN 100	890	740	195* 600**
1.0 % Ru/СПС MN 500	120	90	80* 15**

* – удельная поверхность в соответствии с моделью t-графика; ** – удельная поверхность микропор.

Было показано, что СПС марки MN 270 обладает развитой удельной площадью поверхности (порядка 1400 – 1500 $м^2/г$), а также характеризуется узким распределением пор по размерам, что способствует формированию малоразмерных монодисперсных частиц активной фазы рутения - 1.4 ± 0.3 нм. Согласно данным таблицы 1, удельная площадь поверхности катализаторов на ниже, чем у исходных образцов СПС, что может быть объяснено заполнением пор носителя наночастицами рутения.

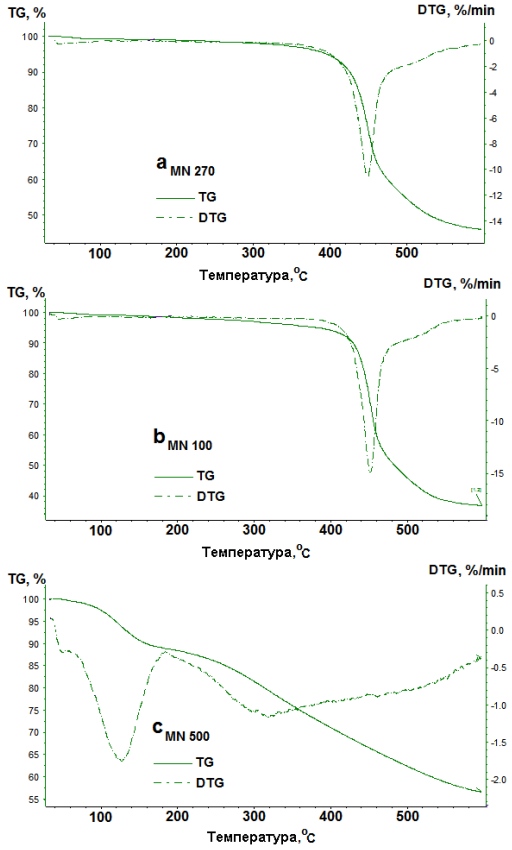


Рис. 1 Результаты термогравиметрического анализа СПС MN 270 (a), MN 100 (b) и MN 500 (c)

Для MN500 и 1% Ru/MN500, площадь поверхности уменьшается приблизительно в пять раз, что может объясняться также результатом изменения внутренней структуры MN500 при высоких температурах. Это предположение было подтверждено результатами термогравиметрического анализа исходных образцов СПС (рис. 1). Как показано на рис. 1a, интенсивное разрушение MN270 начинается при температуре около 450°C. Похожая картина наблюдается в случае MN100. Однако разрушение СПС MN 100 происходит быстрее и связано, по всей видимости, с удалением NH_2-групп. СПС MN 500 характеризуется наименьшей термоустойчивостью (рис. 1c). Деструкция начинается уже при температуре < 100°C. В диапазоне 100 – 250°C происходит десульфуризация полимера и дальнейшее разрушение SO_3H-групп при > 250 °C. Эти факты говорят о невозможности использования катализаторов на основе сульфированного СПС в процессе гидролитического гидрирования целлюлозы. При одинаковых условиях процесса максимальная селективность по сорбитолу наблюдалась при использовании 1.0 % Ru/MN270 – 50.4 %. Для катализатора 1.0 % Ru/MN100 это значение составило 12.7 %, для 1.0 % Ru/MN500 – 1.8 %. В ходе исследований также было показано, что оптимальным является использование катализаторов на основе СПС с однопроцентным содержанием рутения. Исследование влияния на процесс температурных условий показало, что разрушение целлюлозы в субкритической воде начинается при температурах 170 – 185°C, когда гидролизу начинает подвергаться её аморфная часть. Гидролиз кристаллической части становится заметным при температурах выше 190°C. С увеличением температуры степень конверсии целлюлозы закономерно растёт. Вместе с тем, уменьшается селективность целевого продукта - сорбитола. Оптимальная

температура процесса – 245°С. В ходе исследования влияния парциального давления водорода на конверсию целлюлозы наилучшие результаты были получены при 6 МПа. Давление ниже этого значения приводит к примерно двукратному снижению селективности по сорбитолу, что связано с замедлением реакции гидрирования глюкозы. При давлениях водорода выше 6 МПа селективность по гекситолам также снижается, что вероятно, объясняется тем, что значительная часть активных центров катализатора занята водородом, который препятствует доступу молекул глюкозы к поверхности катализатора. В результате исследования влияния продолжительности процесса на конверсию целлюлозы было установлено, что, при прочих равных условиях, оптимальным значением продолжительности процесса является 5 минут. На основе полученных экспериментальных данных была составлена схема, по которой протекает гидрогенолиз целевого продукта – сорбитола – в условиях процесса. Обратным интегральным методом с использованием уравнений, полученных согласно методу стационарных концентраций Боденштейна, были рассчитаны константы скоростей реакций (таблица 2).

Таблица 2 - Константы скоростей реакций

K_1	0,02606743	K_3	0,007177537	K_5	0,0007252178	K_7	0,00136065
K_2	0,05798871	K_4	0,0005504743	K_6	0,003693397	K_8	0,002984136

Таким образом, в ходе исследования были определены оптимальные условия процесса гидролитического гидрирования целлюлозы в среде субкритической воды с использованием Ru-содержащих катализаторов на основе СПС. В результате был получен сравнительно высокий выход гекситолов (50.4 %) при удовлетворительной степени конверсии целлюлозы (84.3 %).

В перспективе гидролитическое гидрирование целлюлозы в субкритической воде с использованием Ru-содержащих катализаторов на основе СПС может стать основой технологических процессов конверсии целлюлозной биомассы в сырьё для химического синтеза и промышленного производства биотоплива второго поколения.

Работа была выполнена в рамках проектов 15-08-00455 и 15-08-20345, финансируемых РФФИ и 13-08-00126, финансируемого РНФ.

Список литературы

1. *Чепиго С.В., Баландин А.А., Васюнина Н.А., Барышева .С.* Получение многоатомных спиртов путем каталитического превращения полисахаридов растительных материалов // Химическая наука и промышленность. 1957. № 2. С. 416-424.

2. *Luo C., Wang S., Liu H.* Cellulose conversion into polyols catalyzed by reversibly formed acids and supported ruthenium clusters in hot water // Angew. Chem. Int. Ed. 2007. 46. P. 7636-7639.

3. *Dhepe P. L., Fukuoka A.* Cracking of Cellulose over Supported Metal Catalysts // Catal. Surv. Asia. 2007. 11. P. 186 - 191.

4. *Sasaki M., Fang Z., Fukushima Y., Adschiri T., Arai K.* Dissolution and Hydrolysis of Cellulose in Subcritical and Supercritical Water // Ind. Eng. Chem. Res. 2000. 39. P. 2883-2890.

5. *Fukuoka A., Dhepe P.L.* Catalytic conversion of cellulose into sugar alcohols // Angew. Chem. Int. Ed. 2006. 45. P. 5161-5163.

6. *Манаенков О.В., Макеева О.Ю., Филатова А.Е., Сульман М.Г., Сидоров А.И., Быков А.В., Матвеева В.Г., Григорьев М.Е., Сульман Э.М.* Катализаторы на основе сверхсшитого полистирола для процесса конверсии целлюлозы в полиолы // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 54-58.

7. *Manaenkov O.V., Matveeva V.G., Sulman E.M., Filatova A.E., Makeeva O.Yu., Kislitza O.V., Sidorov A. I., Doluda V.Yu., Sulman M.G.* Ru-Containing Polymeric Catalysts for Cellulose Conversion to Polyols // Topics in Catalysis. 2014. Vol.57. Issue 17 – 20. P. 1476-1482.

8. *Валецкий П.М., Сульман М.Г., Бронштейн Л.М., Сульман Э.М., Сидоров А.И., Матвеева В.Г.* Наноразмерные катализаторы в тонком органическом синтезе – основа для разработки инновационных технологий в фармацевтической отрасли // Российские нанотехнологии. 2009. Т. 4. № 9. С. 28-42.

02.00.04

В.П. Молчанов[1] к.х.н., Е.В. Ребров[1,2] д.т.н., М.Е. Григорьев[1] к.х.н., И.П. Шкилева[1] к.х.н., О.В. Матвеева[1] к.х.н.

[1]Тверской государственный технический университет,
химико-технологический факультет, Тверь, science@science.tver.ru
[2]University of Warwick, School of Engineering, Coventry, UK

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОКОНВЕРСИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНЫХ УДОБРЕНИЙ И КОРМОВЫХ ДОБАВОК

Исследован процесс ферментации (переработки) отходов животноводства и трудногидролизуемого растительного сырья (торфа) с добавлением биостимуляторов – солей аскорбиновой кислоты. Определен аминокислотный состав продуктов биоферментации и выявлена возможность целевого биосинтеза с целью получения удобрения и кормовой добавки с заранее заданными свойствами.

Ключевые слова: *биоконверсия, растительное сырье, органические отходы, физико-химический анализ, удобрения, кормовые добавки*.

Введение

В связи с бурным развитием биотехнологии и микробиологической промышленности появилась возможность получать продукцию сельскохозяйственного назначения (удобрения и кормовые добавки) методом биоконверсии растительного сырья и органических отходов с использованием различных биологически активных стимулирующих добавок (БАД) [1,2]. Применение с этой целью солей аскорбиновой кислоты фактически не имеет аналогов.

Технология ферментации основана на создании условий, благоприятных для развития всех видов микроорганизмов, первоначально присутствующих в исходной смеси. В ходе процесса ферментации микрофлора продуцирует продукты метаболизма (ферменты, аминокислоты, витамины, углеводы), присутствие которых в смеси позволяет активизировать биохимические процессы [3].

Процессы ферментации регулируются за счет различного рода воздействий. Так, регуляцию процесса конверсии осуществляют введением в исходную смесь биологически активных стимуляторов, которые интенсифицируют процесс, ускоряя минерализацию органики и способствуя активному биосинтезу вторичных метаболитов [4].

Выбор в качестве биостимуляторов солей аскорбиновой кислоты не случаен. Это связано с тем, что сама аскорбиновая кислота не является фактором роста для микроорганизмов, но она необходима для полноценной жизнедеятельности сельскохозяйственных животных. В то же время, микро- и макроэлементы, входящие в состав аскорбинатов в дозах, не превышающих нормы потребления их животными, способны оказывать благоприятное влияние на протекание процесса биоконверсии.

Методика эксперимента

Был исследован процесс биоконверсии смеси органических отходов животноводства и трудногидролизуемого сырья растительного происхождения с дополнительным внесением в исходную смесь различных солей аскорбиновой кислоты. Процесс ферментации проводили по следующей технологической схеме:

1. Подготовительный этап – приготовление исходной смеси «торф-навоз» в соответствии с экспериментально определенным ранее оптимальным соотношением 50:50, введение биологически активных стимуляторов, перемешивание [3].
2. Инкубационный этап – выдержка ферментируемой органической массы в течение 60 часов при температуре 37ºС и кратковременном барботаже через каждые 24 часа.
3. Пастеризационный этап – кратковременная обработка конечного продукта ультразвуком интенсивностью 50-60 Вт/см^2 для уничтожения патогенной микрофлоры.

В ходе ферментации торфонавозной смеси с добавлением аскорбинатов и контрольной смеси без биостимуляторов производили отбор проб, в которых определяли наличие и изменение содержания свободных аминокислот на автоматическом аминокислотном анализаторе типа «AMINO ACID ANALYZER T339». Образец, состоящий из смеси аминокислот, разделяли на отдельные компоненты на хроматографической колонке длиной 30 см, заполненной сорбентом – мелкодисперсным ионитом марки остион LGANB. После разделения образца на компоненты проводилось их детектирование нингидрином, который в соединении с аминокислотами дает характерную окраску. Результаты регистрировались в виде пиков абсорбции [5].

Результаты и выводы

В многочисленных экспериментах при соответствующих повторах было изучено влияние на процесс биоконверсии аскорбинатов следующих металлов: кальция, калия, натрия, кобальта, марганца, магния, цинка и железа. Практически все использованные соли аскорбиновой кислоты существенно интенсифицировали процесс образования свободных аминокислот. Исключение составили эксперименты с аскорбинатами кобальта и натрия, в которых количество свободных аминокислот в конечном продукте было таким же, как и в контрольной пробе.

В контрольной пробе без биостимуляторов происходило увеличение содержания свободных аминокислот в среднем в 14,5 раза. Исследования аминокислотного состава продукта показали увеличение общего содержания свободных аминокислот в 37,6 раза в опытах с аскорбинатом железа и в 35,9 раза в опытах с аскорбинатом цинка. Особое влияние последнего на синтез аминокислот может быть объяснено тем, что катионы цинка принимают активное участие в формировании структуры ДНК-матрицы белкового синтеза. Увеличение содержания свободных аминокислот при воздействии аскорбината железа объясняется тем, что железо необходимо для нормальной деятельности многих окислительно-восстановительных ферментов, для переноса кислорода и в других процессах метаболизма [6].

Аскорбинаты в органическую массу вводили из расчета менее 0,1 массового процента. Так как максимальное накопление свободных аминокислот происходило в опытах с добавлением аскорбината железа, была проведена дополнительная серия экспериментов для определения оптимального количества этого биостимулятора, которое следует вносить в исходную смесь (табл.1). Данные таблицы показывают, что максимальное содержание аминокислот в продукте достигается при добавлении 0,45 грамма аскорбината железа на 1 килограмм субстрата. При внесении большего количества БАД наблюдается существенное снижение концентрации свободных аминокислот. Можно предположить, что избыточное содержание катионов железа способно оказывать отрицательное воздействие на микробный метаболизм.

Таблица 1 – Увеличение общего содержания свободных аминокислот в продукте по сравнению с исходной смесью при внесении различных количеств аскорбината железа

Количество вносимого аскорбината	Увеличение содержания аминокислот
0.025%	**в 31.6 раза**
0.030%	**в 32.9 раза**
0.045%	**в 37.6 раза**
0.055%	**в 31.9 раза**
0.070%	**в 27.9 раза**
0.090%	**в 23.2 раза**

Для определения кинетических закономерностей в опытах с добавлением в торфонавозную смесь аскорбината железа и в контрольном эксперименте без использования БАД было проведено математическое моделирование. Результаты моделирования показали, что процесс образования свободных аминокислот с достаточной точностью описывается степенным уравнением, сходным с уравнением химической кинетики дробного порядка:

$$d[P]/dt = k \times [S]^n,$$

где [P] – концентрация свободных аминокислот в массовых процентах;

t – время от начала протекания процесса биоконверсии в часах;

k – константа скорости реакции образования свободных аминокислот, 1/час;

[S] – концентрация субстрата в массовых процентах;

n – порядок реакции.

Интересен тот факт, что на величину порядка существенное влияние оказывает не только присутствие биостимулятора, но и его концентрация (табл.2). Это обстоятельство может быть объяснено высокой чувствительностью процесса микробной конверсии к уровню кислотности, который зависит от содержания в смеси солей аскорбиновой кислоты.

Таблица 2 – Зависимость величины порядка реакции образования свободных аминокислот от количества вносимого аскорбината железа

Условия процесса	**Величина порядка (n)**
С добавлением 0.045% аскорбината	**0.5**
С добавлением 0.055% аскорбината	**1.0**
Без добавления аскорбината	**1.8**

Выполненные анализы конечного продукта биоконверсии доказывают возможность его использования в качестве удобрения и премикса при разработке полноценных рационов для крупного рогатого скота и сельскохозяйственной птицы [7]. Внося различные биостимуляторы, возможно производить целевой биосинтез продукта с теми или иными заранее заданными свойствами. Многочисленные исследования показывают, что использование биологически активных стимуляторов при производстве кормов и кормовых добавок, а вследствие этого достаточная концентрация необходимых аминокислот в них, приводит к увеличению привесов, уменьшению расхода кормов и даже улучшают физиологические показатели животных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 15-08-00256) и Российского научного фонда (грант № 15-13-20015).

Список литературы

1. *Абрамов А.И.* Обогащение кормов химическими средствами. – М.: Колос, 1966.
2. *Шигаева М.Х.* Стимуляция жизнедеятельности микроорганизмов и вирусов. – Алма-Ата: Наука, 1960.
3. *Ковалев Н.Г., Рабинович Г.Ю., Сульман Э.М., Пакшвер С.Л., Рогов Р.В.* Способ получения кормовых добавок и удобрений из органических отходов // Патент РФ №2126779.
4. *Рабинович Г.Ю., Ковалев Н.Г., Сульман Э.М.* Биоконверсия органического сырья в удобрения и кормовые добавки. – Тверь: ТГТУ, 1999.
5. *Лейбниц Э., Штрупке Х.Г.* Руководство по газовой хроматографии. – М.: Мир, 1988.
6. *Чурбанов В.М.* Микроудобрения. – М.: Россельхозиздат, 1976.
7. *Калунянц К.А., Ездаков Н.В., Пивняк И.Г.* Применение продуктов микробиологического синтеза в животноводстве. – М.: Колос, 1980.

02.00.15

Н.А. Немыгина[1,2], Л.Ж. Никошвили[1], М.Г. Сульман[1,3], Э.М. Сульман[1], L. Kiwi-Minsker[4,5]

[1]Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии, Тверь, Россия, nlinda@science.tver.ru
[2]Тверской государственный университет, кафедра физической химии, Тверь, Россия
[3]Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия
[4]Тверской государственный университет, Региональный технологический центр, Тверь, Россия
[5]Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Лозанна, Швейцария

ПАЛЛАДИЙ СОДЕРЖАЩИЕ КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХСШИТОГО ПОЛИСТИРОЛА ДЛЯ РЕАКЦИИ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ СУЗУКИ

Целью настоящего исследования является изучение возможности получения активных, селективных и стабильных палладиевых катализаторов реакции кросс-сочетания Сузуки-Миаура на основе пористой полимерной матрицы сверхсшитого полистирола (СПС). Кинетические исследования были выполнены при варьировании природы основания, состава растворителя и температуры реакции. Показано, что использование СПС в качестве носителя позволяет обеспечить конверсию 4-бромоанизола выше 98% за время реакции менее часа.

Ключевые слова: *кросс-сочетание, реакция Сузуки, сверхсшитый полистирол, палладий.*

Среди существующих методов кросс-сочетания (реакция Хека, Кумада, Сузуки, Соногашира, Стилле, Негиши) реакция Сузуки наиболее широко используется в промышленности [1]. Традиционно реакция Сузуки проводится с применением палладиевых комплексов, содержащих лиганды на основе соединений фосфора и азота, в качестве катализаторов. Однако, большинство разрабатываемых лигандов дорогостоящи, что существенно ограничивает их применение [2]. Кроме того, основным недостатком гомогенных палладиевых катализаторов является трудность их отделения от продуктов реакции для повторного использования [3].

Внимание исследователей привлекает разработка новых безлигандных каталитических систем, способных проводить реакцию Сузуки в мягких условиях в водной среде. Несмотря на все многообразие методов синтеза гетерогенных, гетерогенизированных и квази-гомогенных Pd-содержащих катализаторов, на сегодняшний день наиболее перспективными носителями считаются наноструктурированные полимеры [3,4], позволяющие контролировать рост наночастиц и предотвращать их агрегацию.

В рамках данной работы проведено изучение возможности получения активных, селективных и стабильных палладиевых катализаторов реакции кросс-сочетания Сузуки-Миаура на основе пористой полимерной матрицы сверхсшитого полистирола (СПС). СПС – это полимерная сеть, в которой «поры» формируются спонтанно в ходе синтеза полимера. О первом использовании СПС в качестве среды для формирования наночастиц металлов сообщалось в 1999 г. [5]. Pd-содержащие каталитические системы на основе СПС проявили высокую активность и селективность в реакциях гидрирования -C≡C- связи ацетиленовых спиртов и гидродеоксигенирования жирных кислот [6].

Экспериментальная часть

Методом пропитки по влагоемкости СПС марки MN100, функционализированного аминогруппами, был синтезирован ряд катализаторов при варьировании содержания Pd и природы прекурсора ($PdCl_2(CH_3CN)_2$, $Pd(OAc)_2$, $PdCl_2$). Реакция кросс-сочетания 4-броманизола и фенилбороновой кислоты проводилась в изотермическом стеклянном

реакторе периодического действия в инертной атмосфере (азот) при атмосферном давлении. Молярное соотношение фенилбороновой кислоты и 4-броманизола составляло 1.5. Количество катализатора – 1%(мольн.) по отношению к 4-броманизолу (в случае катализатора с расчетным содержанием Pd 2%(масс.)). Пробы анализировались методом GS-MS (Shimadzu GCMS-QP2010S).

Для оптимизации условий проведения реакции варьировалась природа растворителя (этанол, вода). Кроме того, исследовалось влияние типа основания (Na_2CO_3, NaOH, K_2CO_3) и температуры (от 50 до 75ºC).

Результаты и обсуждение

В таблице представлены результаты тестирования синтезированных катализаторов в реакции Сузуки. Эксперименты проводились при температуре 70°C с использованием 1.5 ммоль Na_2CO_3 в качестве основания. В качестве растворителя служила смесь этанол/H_2O в соотношении 5 : 1. На основании представленных данных можно сделать вывод, что среди катализаторов с расчетным содержанием палладия 2%(масс.) наиболее высокую активность проявляет катализатор 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$).

Для данного катализатора исследовалось влияние состава растворителя (рис. 1). Было показано, что использование чистого этанола приводит к резкому снижению степени конверсии 4-броманизола, тогда как добавление воды позволяет повысить конверсию до 98.1%.

В ходе исследования влияния температуры на протекание реакции кросс-сочетания было установлено (рис. 2), что при снижении температуры до 50°C наблюдается заметное снижение степени конверсии 4-броманизола, тогда как повышение температуры до 60°C и выше позволяет достичь конверсии > 95% за время реакции 55 мин.

Таблица – Результаты тестирования катализаторов на основе функционализированного СПС в реакции Сузуки

Катализатор	Прекурсор палладия	Время реакции (до достижения конверсии), мин	Конверсия 4-бром-анизола, %
2%-Pd(II)/MN100	$PdCl_2(CH_3CN)_2$	55	96.5
1%-Pd(II)/MN100		60	36.0
0.5%-Pd(II)/MN100		240	21.1
2%-Pd(0)/MN100		180	83.5
2%-Pd(II)/MN100	$Pd(CH_3COO)_2$	120	88.3
2%-Pd(0)/MN100		115	96.6
2%-Pd(II)/MN100	$PdCl_2$	60	41.5
2%-Pd(0)/MN100		60	30.4

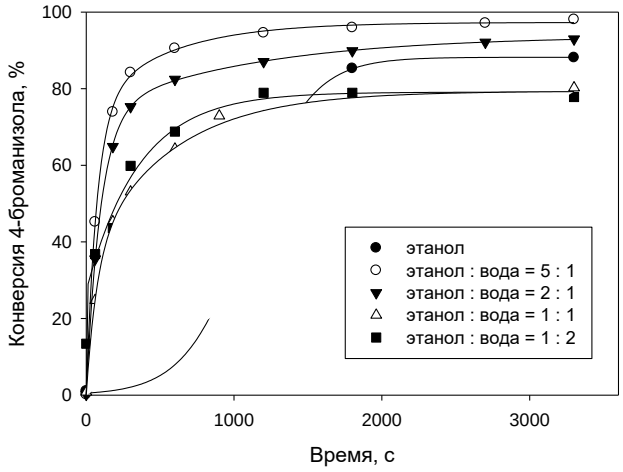


Рис. 1 – Влияние содержания воды на поведение катализатора 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$) в реакции Сузуки (60°C, 1.5 ммоль NaOH)

Эксперименты по варьированию природы и концентрации основания проводились при следующих условиях: 70°C, растворитель – смесь этанол/H_2O (5:1). В качестве оснований использовали K_2CO_3, Na_2CO_3 или NaOH в количестве 1.5 ммоль.

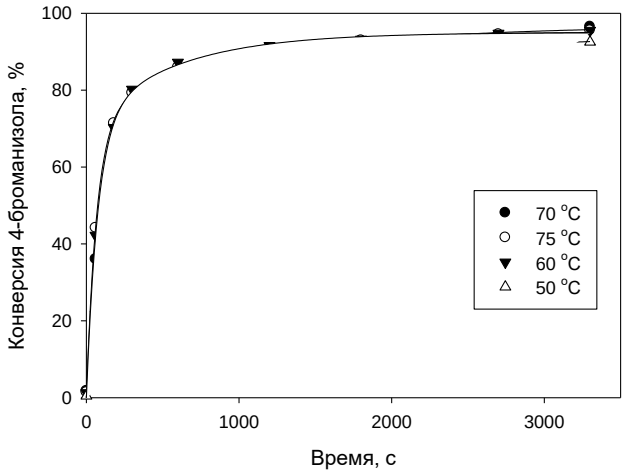


Рис. 2 – Влияние температуры на поведение катализатора 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$) в реакции Сузуки (1.5 ммоль Na_2CO_3, растворитель – смесь этанол/вода в соотношении 5:1)

Было обнаружено, что с увеличением силы основания происходит увеличение степени конверсии 4-броманизола. Максимальная степень конверсии 4-броманизола (97.1%) при температуре реакции 70°C достигалась за время реакции 55 мин в случае использования NaOH в качестве основания. Важно отметить, что повышение количества NaOH до 2 ммоль не вызывает существенного увеличения скорости конверсии 4-броманизола.

Также была исследована стабильность катализатора 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$) при многократном повторном использовании. Было показано, что данный катализатор постепенно теряет свою активность при многократном повторном использовании: за пять циклов конверсия 4-броманизола падает с 98.1% до 80.7%. Катализатор 2%-Pd(0)/MN100 ($Pd(CH_3COO)_2$) (который проявил высокую активность в реакции Сузуки (см. таблицу)) также постепенно теряет активность, но, тем не менее, является более стабильным, чем образец 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$). За пять циклов конверсия 4-броманизола падает с 96.4% до 88.6%, что почти в два раза ниже по сравнению со случаем использования катализатора 2%-Pd(II)/MN100 ($PdCl_2(CH_3CN)_2$).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект 15-19-20023).

Список литературы

1. *Huang L., Chen F., Wang Y., Wong P.K.* Suzuki chemistry – a promising ligand-free metal catalyst system in situ generated from Pd^{II} supported on MgO // Physical Chemistry. 2013. № 3(1). P. 21-28.
2. *Phan N.T.S., Brown D.H., Styring P.* A polymer-supported salen-type palladium complex as a catalyst for the Suzuki-Miyaura cross-coupling reaction // Tetrahedron Letters. 2004. № 45. P. 7915-7919.
3. *Sołoducho J. [et al.]* Recent Advances of Modern Protocol for C-C Bonds –The Suzuki Cross-Coupling // Adv. Chem. Eng. Sci. 2013. № 3. P. 19-32.
4. *Astruc D.* Palladium Nanoparticles as Efficient Green Homogeneous and Heterogeneous Carbon-Carbon Coupling Precatalysts: A Unifying View // Inorganic Chemistry. 2007. № 46 (6). P. 1884-1894.
5. *Sidorov S.N. [et al.]* Cobalt Nanoparticle Formation in the Pores of Hypercrosslinked Polystyrene: Control of Nanoparticle Growth and Morphology // Chem. Mater. 1999. № 11. P. 3210-3215.
6. *Валецкий П.М. [и др.]* Наноразмерные катализаторы в тонком органическом синтезе – основа для разработки инновационных технологий в фармацевтической отрасли // Российские нанотехнологии. 2009. № 9-10. С. 94-108.

02.00.04

М.Ю. Ракитин, В.Ю. Долуда, А.И. Петрова, И.П. Шкилева, В.Г. Матвеева, Г.Н. Демиденко, Э.М. Сульман, А.А.Рубина

Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии, Тверь, sulman@online.tver.ru

ПРИМЕНЕНИЕ RU/СПС КАТАЛИЗАТОРОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АНИЛИНА В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

В статье приводятся результаты по исследованию каталитического гидрирования нитробензола в среде изопропилового спирта и в среде сверхкритического диоксида углерода. Для проведения процесса использовались Ru/СПС катализаторы. При использовании сверхкритического диоксида углерода повышается селективность процесса, скорость реакции и выход целевого продукта – анилина.

Ключевые слова: *нитробензол, анилин, сверхкритический диоксид углерода, гидрирование.*

Каталитическое гидрирование нитробензола является важным химико-технологическим процессом получения анилина, который в свою очередь используется в качестве полупродукта в синтезе полиуретанов, резины, фармацевтических препаратов, пестицидов и гербицидов [1]. В качестве катализаторов в настоящее время перспективно использование каталитических систем на основе сверхсшитого полистирола (СПС) [2-6]. Показана высокая эффективность использования катализаторов Ru/СПС в процессе гидрирования D-глюкозы до сорбита [3,4] и гидролитическом гидрировании целлюлозы [5]. Кроме того, сверхсшитый полистирол имеет способность к набуханию в различных растворителях, в том числе и в воде [6].

Применение сверхкритического диоксида углерода (CO_2(СК)) в процессе селективного гидрирования нитробензола вызывает значительный интерес исследователей [1, 7]. Это обусловлено преимуществами использования CO_2(СК) в органическом синтезе, при котором происходит увеличение коэффициентов тепло- и массопередачи, возможно изменение маршрутов реакций в связи с образованием новых молекулярных комплексов, а также обеспечивается легкость отделения продукта от растворителя и снижается пожароопасность процессов [1, 7].

В данной статье приводится сравнение результатов каталитического гидрирования нитробензола в среде изопропилового спирта и в среде $CO_{2(СК)}$ с использованием Ru/СПС катализаторов.

Экспериментальная часть

а) Гидрирование нитробензола

Каталитическое гидрирование нитробензола проводилось на установке Parr Series 5000 Multiple Reactor System.

Для проведения реакции в среде сверхкритического диоксида углерода использовался реактор высокого давления Parr Instruments 4307 (США), с общим объемом колбы 250 см3 и максимальным рабочим давлением 60 МПа. Для перекачивания углекислоты использовался плунжерный насос Supercritical 24 (США).

б) Анализ реакционной массы

Качественная и количественная идентификация полупродуктов синтеза проводилась методом газо-жидкостной хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием веществ. Для этого использовали газовый хроматограф GS-2010 (Shimadzu, Япония) и газовый одноквадрупольный масс-спектрометр GSMS-QP2010S (Shimadzu, Япония) Концентрации нитробензола и анилина определяли по стандартным веществам и соответствующим калибровочным зависимостям с использованием дифениламина в качестве внешнего стандарта.

Результаты

Схема каталитического гидрирования нитробензола при использовании Ru/СПС катализаторов представлена на рисунке 1.

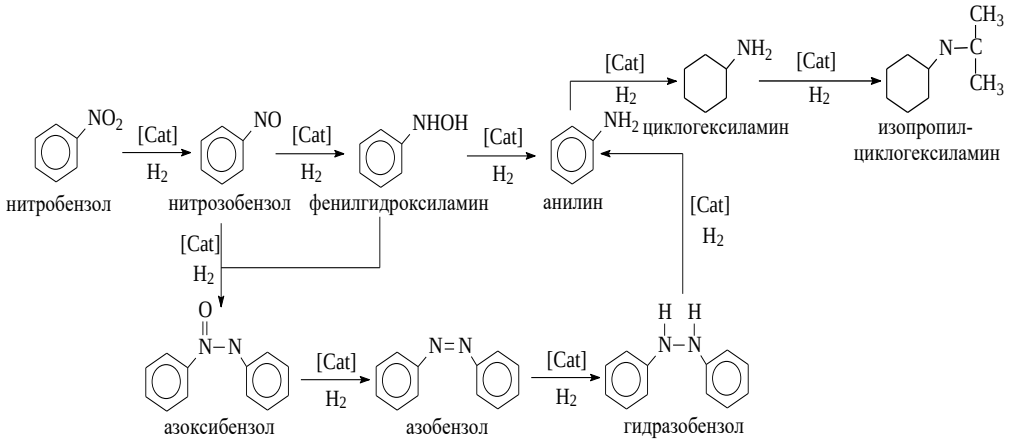


Рисунок 1 – Схема каталитического гидрирования нитробензола

Активность синтезированных катализаторов представлена в таблице 1. Приведены данные при максимальном выходе анилина и конверсии нитробензола. Для реакции в среде CO_2(ск) был выбран 3% Ru/СПС, показавший наибольшую селективность и выход анилина в среде изопропилового спирта.

Таблица 1 – Активность исследуемых катализаторов

Катализатор	Растворитель	Температура, °С	Селективность, %	Конверсия нитробензола, %	Выход анилина, %
1% Ru/СПС	изопропанол	170	81.8	96.7	79.2
3% Ru/СПС	изопропанол	190	100.0	95.3	95.3
5% Ru/СПС	изопропанол	140	88.2	96.2	84.9
3% Ru/СПС	$CO_{2(ск)}$	190	100.0	99.8	99.8

Для исследования влияния температуры на процесс каталитического гидрирования нитробензола использовался 3% Ru/СПС (рисунок 2).

С повышением температуры в среде CO_2(ск) значительно возрастает скорость образования анилина. При температуре выше 190°С 99.9% выход достигается к 45 минуте (см. рис. 2).

а) б)

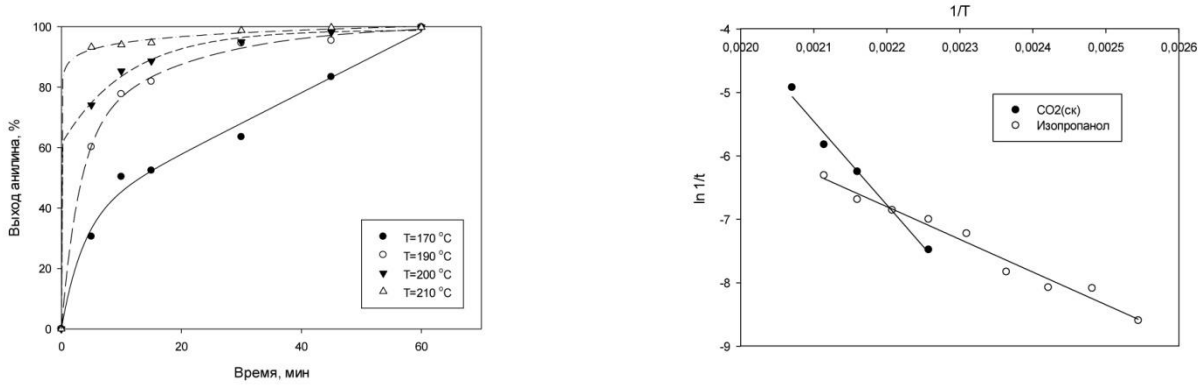


Рисунок 2 – а) Зависимость выхода анилина от температуры в среде сверхкритического диоксида углерода; б) зависимость в координатах уравнения Аррениуса

Заключение

На примере каталитического гидрирования нитробензола с использованием Ru/СПС показано положительное влияние сверхкритического диоксида углерода на увеличение скорости реакции, селективности и выхода целевого продукта. Несмотря на высокую активность катализатора 3% Ru/СПС, в среде $CO_{2(ск)}$ не происходит гидрирования целевого продукта.

Коллектив авторов благодарит Министерство образования и науки РФ и Российский фонд фундаментальных исследований за финансовую поддержку исследований (Грант РФФИ № 13-08-00403 А).

Список литературы

1. *Fujita S.* Selective hydrogenation of nitrostyrene to aminostyrene / S. Fujita, H. Yoshida, K. Asai, X. Meng, M. Arai // Journal of Supercritical Fluids. 2011. Vol. 60. P. 106-112.
2. *Qingquan L.* Monodisperse Polystyrene Nanospheres with Ultrahigh Surface Area: Application for Hydrogen Storage Macromol. Chem. Phys. 2010. V. 211. P. 1012-1017.
3. *Григорьев М.Е*. Каталитические технологии в производстве D-сорбита / М.Е. Григорьев, В.Г. Матвеева, Л.Ж. Никошвили, А.И. Сидоров, В.Ю. Долуда, А.В. Быков, М.Б. Коняева, Э.М. Сульман // Технология органических веществ. 2013. №5. С. 18-28.
4. *Матвеева В.Г.* Кинетика гидрирования D-глюкозы до D-сорбита на Ru-содержащем гетерогенном катализаторе / В.Г. Матвеева, В.Н. Сапунов, М.Е. Григорьев, М.Б. Лебедева, Э.М. Сульман // Кинетика и катализ. 2014. Т. 55. № 6. С. 1-11.
5. *Manaenkov O.V.* Catalysis of Cellulose conversion into polyols / O.V. Manaenkov, V.G. Matveeva, E.M. Sulman, A.E. Filatova, O.Yu. Makeeva, O.V. Kislitza, A.I. Sidorov, V.Yu. Doluda, M.G. Sulman // Topics in catalysis. 2014. Vol. 57. P. 1476-1484.
6. *Валецкий П.М*. Наноразмерные катализаторы в тонком органическом синтезе – основа для разработки инновационных технологий в фармацевтической области / П.М. Валецкий, М.Г. Сульман, Л.М. Бронштейн, Э.М. Сульман, А.И. Сидоров, В.Г. Матвеева // Российские нанотехнологии. Т.4. № 9-10. С.28-42.
9. *Zhao F.* Hydrogenation of nitrobenzene with supported platinum catalysts in supercritical carbon dioxide: effects of pressure, solvent, and metal particle size / F. Zhao, Y. Ikushima, M. Arai // Journal of catalysis. 2004. Vol. 224. P. 479-483.

02.00.15

А.А. Степачёва[1] к.х.н., Е.И. Шиманская[1] к.х.н., Е.С. Мигунова[1], В.Н. Сапунов[2] д.х.н., В.Г. Матвеева[1] д.х.н., А.М. Сульман[1], В.Ю. Долуда[1] к.х.н., Е.В. Ребров[1,3] д.х.н

[1]Тверской государственный технический университет,
Химико-технологический факультет, кафедра биотехнологии и химии,
Тверь, a.a.stepacheva@mail.ru
[2]Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,
Кафедра химической технологии основного органического синтеза, Москва
[3]University of Warwick, School of Engineering, Coventry, UK

КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ КАРБОКСИЛЬНОЙ ГРУППЫ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

Изучен процесс гидрирования карбоксильной группы жирных кислот в присутствии катализаторов на основе благородных металлов с целью получения высших спиртов. С помощью метода неформальной кинетики выдвинута гипотеза о механизме каталитического гидрирования карбоновых кислот.

Ключевые слова: *коэффициент трансформации, катализатор, гидрирование, жирные спирты, биомасса, биотопливо*.

Введение

В настоящее время химическая технология ориентирована главным образом на развитие процессов переработки биомассы. Конверсия маслосодержащей биомассы, на данный момент, является одним из наиболее приоритетных направлений химической и биотехнологии. Наиболее широко развитым процессом использования масел и жиров остается процесс их переэтерификации в метиловые и этиловые эфиры жирных кислот [1]. Среди недостатков процесса переэтерификации особенно выделяют сомнительную экологичность получаемого топлива за счет использования метанола и эрозии почв, связанной с их засевом масличными культурами [2]. Кроме того качество получаемого биодизеля зависит от качества и состава используемого сырья, что создает препятствия для расширения сырьевой базы.

Второй развивающийся процесс – деоксигенирование жирных кислот с получением углеводородов [3, 4]. Деоксигенирование требует высоких энергетических затрат, связанных с необходимостью поддержания высокой температуры процесса. В связи с тем, что процесс деоксигенирования подразумевает протекание реакции крекинга углеводородов, то существует вероятность снижения цетанового числа конечного продукта.

Особую нишу среди продуктов гидропереработки масел занимают жирные спирты с числом углеродных атомов C_{10}-C_{18} [5-9]. Жирные спирты являются полупродуктами синтеза многих веществ. 70-75% жирных спиртов используется в производстве ПАВ [5], а также используются в виде эмульсий и микро-эмульсий. В косметических эмульсиях (кремы, лосьоны) основной функцией жирных спиртов является обеспечение их консистенции, в технических эмульсиях их используют для увеличения растворимости [6]. Жирные спирты широко применяются в парфюмерии. Альдегиды, эфиры или алкильные группы на основе жирных спиртов иногда внедряют в комплексные молекулы ароматических веществ [7].

Одним из наиболее распространенных методов получения жирных спиртов в настоящее время является гидрирование натуральных масел и жиров, альдегидов, жирных кислот и их эфиров.

Методика эксперимента

Каталитическое гидрирование стеариновой кислоты, выбранной в качестве модельного соединения, проводилось в стальном полупериодическом реакторе высокого давления Parr Series 5000 Multiple Reactor System (Parr Instrument, USA) при следующих условиях: масса катализатора – 0.1 г, начальная концентрация стеариновой кислоты – 0.1 моль/л, растворитель – додекан, температура – 150^{o}C, парциальное давление водорода – 20 МПа.

Анализ жидкой фазы проводился методом газовой хроматографии масс-спектрометрии с помощью хроматографа GC-2010 и масс-спектрометра GCMS-QP2010S (SHIMADZU, Япония).

Результаты и выводы

На рисунке 1 представлены кривые расходования стеариновой кислоты в ходе гидрирования с использованием палладий-содержащих катализаторов на основе гидроксида алюминия и сверхсшитого полистирола.

Активность катализаторов оценивалась путем сравнения коэффициентов, полученных при обработке кинетических кривых, а также селективности катализаторов по целевому продукту реакции. Для полученных зависимостей (Рис. 1) проводили линейное преобразование шкалы времени, достигая наложения всех кривых на одну, выбранную в качестве стандарта [10] (Рис. 2 а).

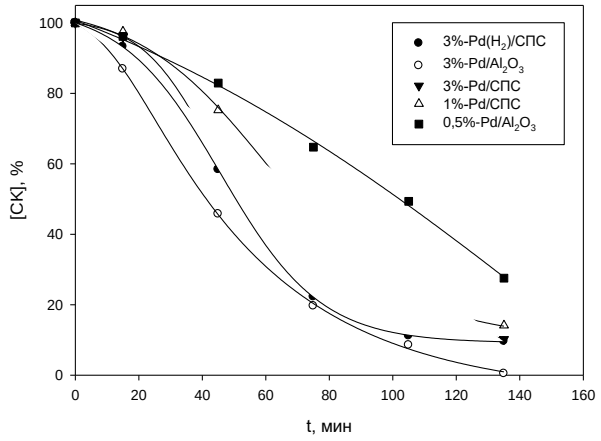
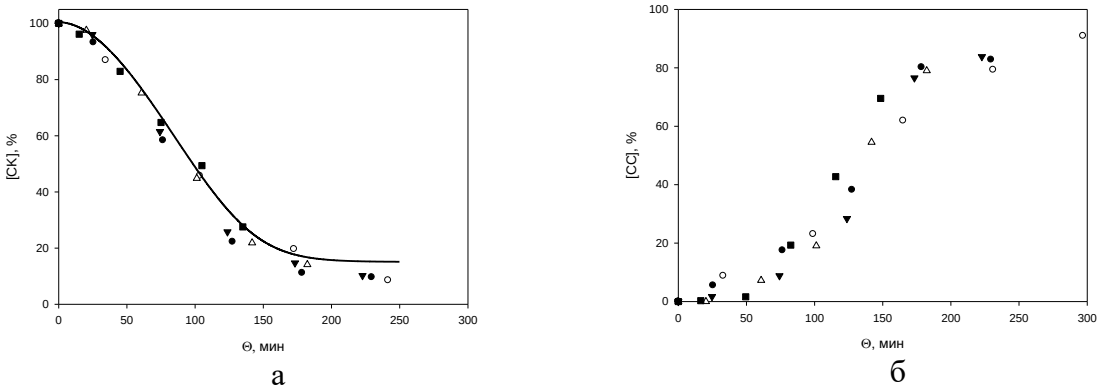


Рис. 1 – Кинетические кривые гидрирования стеариновой кислоты

Следует отметить, что линейное преобразование времени приводит не только к совмещению кинетических кривых расходования субстрата, но и к совпадению кинетических кривых образования продукта реакции – стеарилового спирта (Рис. 2б).



а б

Рис.2 – Линейное преобразование кинетических кривых (а – субстрата; б – продукта)

Чтобы определить применимость линейного преобразования времени и правильность вычисления коэффициента (Рис. 2а, Таблица 1), было найдено формальное математическое описание обобщенной кривой, выраженное в виде дифференциального уравнения (1).

$$\frac{d[СК]}{dt} = -\frac{\eta \cdot k(I) \cdot (1 - \exp(-k_f \cdot \tau)) \cdot [К] \cdot [СК]}{(1 + К \cdot [СК])} \quad (1)$$

где $k_f = 0.01$ мин$^{-1}$;

$k(I) = 2.7$ мин$^{-1}$;

$К = 0.023$ (%$^{-1}$);

τ – приведенное время, как произведение $\eta \cdot t$.

Полученное уравнение хорошо описывает изменение экспериментальных значений концентрации стеариновой кислоты во времени (кривая на Рис. 2а).

Таблица 1 – Активность катализаторов

Катализатор	Коэффициент трансформации, η	Селективность, %	Конверсия при максимальной селективности, %
0.5%-Pd/Al_2O_3	1.00	96.0	72.5
3%-Pd/Al_2O_3	2.30	91.3	99.6
1%-Pd/СПС	1.35	92.0	85.9
3%-Pd/СПС	1.65	93.3	89.8
3%-Pd(H_2)/СПС	1.70	91.6	90.4

Основываясь на экспериментальных и расчетных данных, можно сделать следующие выводы:

- так как кинетические кривые расходования субстрата и накопления продукта практически полностью совпадают в координатах концентрация - приведенное время, то процессы, протекающие на выбранных катализаторах, идентичны, поскольку ($\tau = \eta \cdot t$);
- полученный коэффициент трансформации η, служит относительной характеристикой активности катализатора;
- наиболее активным в процессе гидрирования карбоксильной группы жирных кислот является катализатор 3%-Pd/Al_2O_3.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант № 15-08-00245 А) и Российского научного фонда (грант № 15-13-20015).

Список литературы

1. *Нагорнов С.А.* Получение биодизельного топлива: современные тенденции, проблемы и пути их решения / С.А. Нагорнов, С.И. Дворецкий, С.В. Романцова, и др. // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2009. – № 10(24). – С. 55 – 60.
2. *Ольховская У.* Биотоплива второго поколения: за и против / У. Ольховская // The Chemical Journal. – Декабрь, 2008. - № 12. – С. 38 – 42.
3. *Li L.* Catalytic hydrothermal conversion of triglycerides to non-ester biofuels / L. Li, E. Coppola, J. Rine, J.L. Miller, D. Walker // Energy Fuels. – 2010. – Vol. 24. – P. 1305 – 1315.
4. *Lestari S.* Diesel-like hydrocarbons from catalytic deoxygenation of stearic acid over supported Pd nanoparticles on SBA-15 catalysts / S. Lestari, P. Maki-Arvela, K. Eranen, J. Beltramini, G.Q. Max Lu, D.Yu. Murzin // Catal Lett. – 2010. – Vol. 134. – P. 250 – 257.
5. *Manyar H.G.* Highly Selective and Efficient Hydrogenation of Fatty acids to Alcohols using Pt supported over TiO_2 catalysts / H.G. Manyar, C. Paun, R. Pilus, D.W. Rooney, J.M. Thompson, Ch. Hardacre // Chemical Communications. – 2010. – Vol. 46. – P. 6279–6281.
7. *Zhu H.J.* Reductions of carboxylic acids and esters with $NaBH_4$ in diglyme at 162^oC / H.J. Zhu, Ch.U. Pittman // Synthetic communications. – 2003. – Vol. 33(10). – P. 1733–1750.
8. *Sad M.R.* Hidrogenacion selectiva de metil esteres de acidos grasos para obtencion de alcoholes grasos. Perspectivas actuales, catalizadores y mecanismos de reaccion. / M.R. Sad, V.A. Mazzieri, C.R. Vera, C.L. Pieck // Avances en Quimica. – 2007. – Vol. 2(2). – P. 17-24.
9. *Simasatitkul L.* Design methodology for bio-based processing: Biodiesel and fatty alcohol production. / L. Simasatitkul, A. Arpornwichanop, R. Gani // Computers and Chemical Engineering. – 2013.
10. *Шмид Р.* Неформальная кинетика. Пер. с англ. / Р. Шмид, В.Н. Сапунов – М.: Мир. – 1985. – 264 с.

02.00.15

В.А. Стригина[1], В.Ю. Долуда[1], В.Г. Матвеева[1], А.С. Скворцов[1], М.Г. Сульман[1,2], Э.М. Сульман[1], Е.В. Ребров[1,3]

[1]Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии, Тверь, vstrigina@yandex.ru

[2]Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук

[3]University of Warwick, School of Engineering, Coventry, UK

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОФАЗНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУРФУРОЛА

Гидрирование фурфурола является сложным многоступенчатым каталитическим процессом, в связи с чем, разработка катализаторов, способных синтезировать необходимые полупродукты является важной научно технической задачей. В статье отражены современные тенденции применения каталитических систем в жидкофазном гидрировании фурфурола.

Ключевые слова: *фурфурол, гидрирование, катлизатор, биомасса*.

Введение

Современные проблемы топливо-энергетического сектора экономики, связанные с уменьшением запасов ископаемых топлив фокусируют научные исследования на возможности применения возобновляемых ресурсов в качестве альтернативных источников энергии. Одним из возможных решений данной проблемы является использование пиролизной жидкости, получаемой при температурной переработке биомассы в качестве биотоплива [1]. Однако непосредственное её применение в качестве замены автотранспортного топлива, затруднительно в связи с низкими эксплуатационными показателями (низкие октановые и цетановые числа, полимеризации в процессе хранения). В связи с этим пиролизная жидкость требует глубокой химико-технологической переработки, которая чаще всего включает в себя процессы гидрирования и деоксигенирования. Наиболее часто встречающимся компонентом пиролизной жидкости являются фурфурол и его производные. Обычно фурфурол и его производные подвергаются каталитическому восстановлению до соответствующих спиртов или алициклических соединений. Также возрастающий интерес к химии фурановых соединений обусловлен широкой перспективой использования его производных в различных областях химической промышленности. Продукты процесса гидрирования фурфурола используются в качестве эффективных пластификаторов, полупродуктов синтеза фармацевтических препаратов, пестицидов и гербицидов [2]. Большое количество работ посвящено исследованию процессов гидрирования фурфурола в спирты при использовании металлов в качестве катализаторов на различных подложках, с использованием промоторов [3-5]. В таблице 1 представлены значения селективности и выхода фурфурурилового спирта в процессе каталитического гидрирования фурфурола на катализаторах переходных металлов.

Таблица 1 – Гидрирование фурфурола на катализаторах переходных металлов

Катализатор	Т, К	P_{H2}, МПа	Выход фурфурилового спирта, %	Селективность, %	Ссылка
10%Cu/SiO_2	503	0.10	68	98	[3]
5%Ni/SiO_2	503	0.10	19	25	[4]
2.2%Ni/SiO_2	373	10.03	-	76	[4]
5%Ni-2%Fe/SiO_2	523	0.10	12	6.4	[5]

Металлы группы IB, например Cu, легко катализируют процесс гидрирования фурфурола в фурфуриловый спирт с низким выходом 2-метилфурана. Металлы группы IB значительно менее активны, чем другие металлы. Однако, селективность процесса гидрирования карбонильной группы является достаточно высокой, при этом двойные C=C связи в фураниловом кольце остаются непрореагировавшими. Селективность процесса образования фурфурилового спирта выше 98% была достигнута на монометаллических Cu/SiO_2 катализаторах [3]. При проведении реакции гидрирования фурфурола на Ni/SiO_2 катализаторе при температуре 503 К наблюдали низкое значение селективности по отношению к фурфуриловому спирту (25%) (таблица 1). Небольшая селективность обусловлена появлением реакции декарбонилирования и реакции раскрытия фуранилового кольца с образованием, кроме фурфурилового спирта, тетрагидрофурфурилового спирта и 2-метилфурана, бутаналя, бутанола и бутана в значительных количествах [4]. В работе [5] исследовалось превращение фурфурола в среде H_2 на Ni и Ni-Fe биметаллических катализаторах на SiO_2 подложке при давлении 0.10 атм в диапазоне температур 483 – 523 К. На монометаллическом Ni катализаторе фурфуриловый спирт и 2-метилфуран являлись основными продуктами. Добавление Fe в Ni/SiO_2 катализатор способствовало четкому увеличению выхода 2-метилфурана. Кроме того, в отличие от процесса гидрирования фурфурола с использованием монометаллического Ni катализатора, в котором не образовывалось C_5 продуктов, в результате использования Ni-Fe катализатора получали пентанол в значительных количествах. Известен процесс гидрирования фурфурола в присутствии ультрадисперсного Ni-B аморфного катализатора с добавлением Fe в качестве промотора. Доказано, что Ni-B аморфный сплав является отличным катализатором для многих реакций гидрирования. Однако он показал низкую активность и низкую селективность в отношении фурфурилового спирта. Добавление переходного металла с образованием биметаллического катализатора способствовало улучшению и активности, и селективности, и также стабильности процесса гидрирования [5]. Металлы платиновой группы (Rh, Pd, Pt и Ir) также использовали для гидрирования фурфурола на различных подложках. Они все проявляют высокую активность, в частности, при низких температурах (например, ниже 473 К). При применении данных катализаторов наблюдали высокие значения селективности процесса гидрирования фурфурола. При увеличении температуры в результате раскрытия кольца возрастал выход фурана и его вторичных C_4 продуктов, выход фурфурилового спирта быстро уменьшался, становясь незначительным около температуры 523 К [6-8]. В таблице 2 представлены значения селективности и выхода фурфурурилового спирта при каталитическом гидрировании фурфурола с использованием металлов платиновой группы в качестве катализаторов.

Таблица 2 – Гидрирование фурфурола на металлах платиновой группы

Катализатор	Т, К	P_{H2}, МПа	Выход фурфурилового спирта, %	Селективность, %	Ссылка
$1\%Pd/SiO_2$	503	0.10	10	14	[6]
$2\%Ir/TiO_2$	363	1.01	-	55	[7]
$1\%Pt/SiO_2$	273	10.03	-	99	[8]
$2\%Pt/TiO_2$	423	0.10	33.5	61.2	[8]
$Pt/TiO_2/SiO_2$	423	0.10	64.1	93.9	[8]
$Pt/TiO_2/MgO$	423	0.10		97.8	[8]
$Pt/ZrO_2/TiO_2$	423	0.10	59.2	96.3	[8]

В работе S. Sitthisa и соавт. представлены пути реакции гидрирования фурфурола на Pd катализаторах, нанесенных на SiO_2. Фурфуриловый спирт являлся побочным продуктом при использовании данной каталитической системы (таблица 2), в то время как фуран – основным продуктом [6]. В работах P. Reyes и сотрудников в гидрировании фурфурола применяли Ir катализаторы на TiO_2 подложке. При использовании в качестве прекурсора

металла гексахлориридиевой кислоты H_2IrCl_6 на поверхности катализатора оставалось небольшое количество хлора, способствуя увеличению кислотности на его поверхности и, таким образом, образованию бифункционального катализатора. В исследованиях с данными каталитическими системами образовывался побочный продукт – полуацеталь, в то время, как при использовании катализаторов с более низкой кислотностью был выявлен только фурфуриловый спирт. При проведении процесса при более высоких температурах наблюдали повышение селективности по фурфуриловому спирту до 100% [7]. В исследованиях [8] все платиносодержащие катализаторынанесенные на оксиды переходных металлов, показали хорошую активность в селективном гидрировании. При проведении реакции при низких температурах (423 – 473 К) с применением катализаторов, нанесенных на MgO, наблюдали высокую селективность процесса гидрирования фурфурола (таблица 2) при низком выходе фурфурилового спирта из-за образования побочных продуктов. Катализаторы, нанесенные на SiO_2 или TiO_2, показали значительную активность и селективность в исследуемом процессе. Использование $Pt/ZrO_2/TiO_2$ и $Pt/TiO_2/SiO_2$ каталитических систем позволило существенно увеличить выход и селективность процесса (таблица 2). Таким образом, основываясь на полученных литературных данных можно сделать вывод о значительной селективности образования фурфурилового спирта, которую позволяют получить традиционно используемые катализаторы, однако конверсия фурфурола остается невысокой, поэтому разработка катализаторов, способных синтезировать необходимые полупродукты является важной научно технической задачей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 15-08-00305 А и Российского научного фонда (грант № 15-13-20015).

Список литературы

1. *Malinowski A., Wardzinska D.* Catalytic conversion of furfural towards fuel biocomponents // CHEMIK. 2012. №66(9). P. 982-990.
2. *Alonso D.M., Jesse Q.B., James A.D.* Catalytic conversion of biomass to biofuels / // Green Chemistry. 2010. № 12. P. 1493-1513.
3. *Sitthisa S., Sooknai T., Ma Y., Babuena P.B., Resasco D.E.* Kinetics and mechanism of hydrogenation of furfural on Cu/SiO_2 catalysts // Journal of catalysis. 2011.№277. p. 1-13.
4. *Surapas S., Resasco D.E.* Hydrodeoxygenation of Furfural Over Supported Metal Catalysts: A Comparative Study of Cu, Pd and Ni // Catal Lett. 2011. №141. P. 784–791
5. *Li H., Luo H., Zhuang L., Dai W., Qiao M.* Liquid phase hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over the Fe-promoted Ni-B amorphous alloy catalysts // Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 2003. № 203. P. 267-275.
6. *Surapas S., Pham T., Pramsomsri T., Sooknoi T., Mallinson R.G., Resasco D.E.* Conversion of furfural and 2-methylpentanal on Pd/SiO_2 and $Pd-Cu/SiO_2$ catalysts // Journal of Catalysis. 2011. №280. P. 17-27.
7. *Reyes P., Salinas D., Campos C., Murcia J., Rojas H., Fierro J.* Selective hydrogenation of furfural on Ir/TiO_2 catalysts // Quim. Nova. 2010. № 4. Vol. 33. P. 777-780.
8. *An K., Musselwhite N., Kennedy G., Pushkarev V.V., Robert Baker L., Somorjai G.A.* Preparation of mesoporous oxides and their support effects on Pt nanoparticle catalysts in catalytic hydrogenation of furfural // Journal of Colloid and Interface Science. 2013. №392. 122–128.

02.00.15

Б.Б. Тихонов, А.И. Сидоров, П.Ю. Стадольникова, О.В. Матвеева, Н.В. Лакина

Тверской государственный технический университет,
Тверь, science@science.tver.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МУЛЬТИФЕРМЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА И ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ

В работе изучены свойства ферментативных систем на основе 2 ферментов класса оксидоредуктаз (пероксидазы хрена и глюкозооксидазы) в реакции окисления о-дианизидина. Процесс основан на окислении глюкозооксидазой β-D-глюкозы в присутствии кислорода до β-D-глюконо-δ-лактона и H_2O_2 и использовании последней для окисления о-дианизидина. Доказана возможность ковалентной иммобилизации данной мультиферментной системы на ионообменных смолах.

Ключевые слова: *пероксидаза хрена, глюкозооксидаза, мультиферментная система, глюкоза, о-дианизидин, иммобилизация.*

Ароматические соединения относятся к классу наиболее опасных загрязнителей водных ресурсов [1]. Задача удаления органических загрязнителей из промышленных стоков в настоящее время полностью не решена [2]. Перспективным направлением исследований в этой сфере является использование катализаторов на основе иммобилизованных ферментов [3]. Широко востребованными являются ферменты, относящиеся к классу оксидоредуктаз, прежде всего - пероксидаза и глюкозооксидаза. Пероксидаза хрена (ЕС 1.11.1.7) – гем-содержащий фермент, катализирующий окисление большинства фенольных и других ароматических соединений в присутствии перекиси водорода [4]. Глюкозооксидаза (ЕС 1.1.3.4) – флавопротеин, который катализирует окисление β-D-глюкозы и широко используется в различных сферах (биосенсоры, пищевой консервант и стабилизатор цвета и т.д.) [5]. Сопряженные ферментные системы на основе этих 2 ферментов находят широкое применение в различных процессах, прежде всего – в анализе различных жидкостей (в том числе биологических) [5]. Целью данного исследования было изучение свойств мультиферментных систем на основе пероксидазы хрена и глюкозооксидазы.

Методы и методики

Реактивы

В работе использовали следующие компоненты (в скобках – условное обозначение). Пероксидаза хрена (HRP) была получена из сердцевины корня хрена обыкновенного (Armoracia rusticana). Источником глюкозооксидазы (GOX) был препарат Multifect® GO 1500L (Genencor, A Danisco Division). Субстраты для исследования кинетики: о-дианизидин (прочный синий В, $C_{14}H_{16}N_2O_2$; Sigma); глюкоза ($C_6H_{12}O_6$; Fluka); фосфатные буферные растворы на основе KH_2PO_4 и NaOH (pH=6,0 и pH=7,0); перекись водорода (ООО «Росбио», 3%-ый раствор). Для иммобилизации HRP и GOX в качестве носителя использовались ионообменные смолы КУ 2-8 (ГОСТ 20298-74, размер зерен – 0.315 – 1.25 мм) и Dowex 50WX2 (Na^+-форма; 50-100 mesh; Fluka); модификатором являлся хитозан кислоторастворимый средней вязкости (400 кДа, Fluka); активирующий агент - глутаровый диальдегид ($C_5H_8O_2$; Acros organics; 25%-ый раствор).

Схема процесса

В данной работе в качестве субстрата используется о-дианизидин, образующий под воздействием пероксидазы хрена окрашенные продукты, регистрируемые при длине волны 460 нм:

$$O_2 + \text{β-D-глюкоза} \rightarrow \text{δ-глюконо-1,5-лактон} + H_2O_2 \quad (1)$$

$$\text{о-дианизидин (red)} + H_2O_2 \rightarrow \text{о-дианизидин (ox)} + H_2O \quad (2)$$

Получение пероксидазы из корня хрена

Пероксидаза хрена (HRP) была получена по известной методике из сердцевины корня хрена обыкновенного (Armoracia rusticana) [6].

Иммобилизация биферментной системы

Совместная иммобилизация глюкозооксидазы и пероксидазы проводилась на полимерных носителях - ионообменных смолах КУ-2-8 и Dowex. Иммобилизация проводилась 2 различными путями: адсорбционно (физический метод) и при помощи ковалентной сшивки (химический метод). При проведении иммобилизации методом физической адсорбции биферментная система (HRP, GOX) наносилась непосредственно на носитель (Dowex, КУ-2-8). Для иммобилизации химическим методом на носитель (Dowex, КУ-2-8) последовательно наносились хитозан, глутаровый диальдегид и биферментная система (HRP, GOX).

Методика проведения кинетических экспериментов

Реакции с нативными ферментами проводились в кювете спектрофотометра СФ-2000. Ход реакции наблюдался по увеличению оптической плотности реакционной смеси при λ = 460 нм (раствор сравнения – вода). Для изучения влияния pH на активность биферментной системы для приготовления раствора глюкозы использовались буферные растворы с различными значениями pH (1,68; 4,01; 6,0; 7,0; 9,18; 12,43). Изучение влияния температуры и активности иммобилизованной биферментной системы проводилось в термостатируемом реакторе. Первичные экспериментальные данные – зависимость оптической плотности реакционной смеси от времени, были пересчитаны в зависимость концентрации субстрата от времени по молярным коэффициентам поглощения согласно закону Бугера-Ламберта-Бера [7]. Константа Михаэлиса (K_M) и предельная скорость реакции окисления (V_m) были определены с помощью метода двойных обратных координат по начальной скорости реакции (V_0) при варьировании начальных концентраций о-дианизидина (C_0) [8].

Результаты и обсуждение

Результаты, полученные в ходе варьирования начальной концентрации о-дианизидина в системе HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза, иллюстрирует рис. 1.

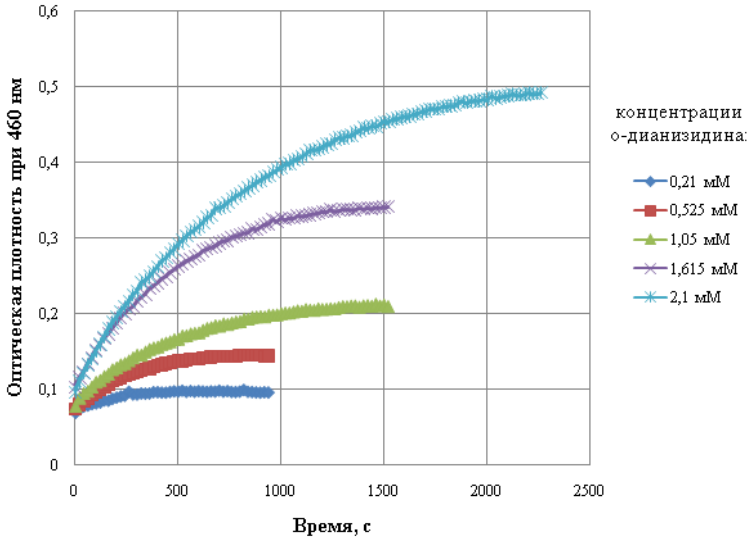


Рис. 1 – Ход реакции в системе HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза при различных начальных концентрациях о-дианизидина (t = 25°C)

Из этих данных были рассчитаны значения кинетических параметров для системы HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза (V_m = 0,1·10^{-3} ммоль/л·с; K_M = 0,02 ммоль/л). Эти данные оказались несколько хуже соответствующих результатов, полученных для системы HRP-о-дианизидин-H_2O_2 (V_m = 0,38·10^{-3} ммоль/л·с; K_M = 0,05 ммоль/л). Этот факт может быть объяснен многостадийностью процесса, а также недостаточно быстрым образованием H_2O_2 в реакции β-D-глюкозы до D-глюконо-δ-лактона, которая является лимитирующей стадией процесса.

Также было выявлено, что оптимальное значение pH для системы HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза – pH = 6,0. Результаты температурных экспериментов приведены показали, что оптимальной для проведения ферментативной реакции является температура 25 ºС. Результаты исследования процесса иммобилизации биферментной системы приведены на рис. 2.

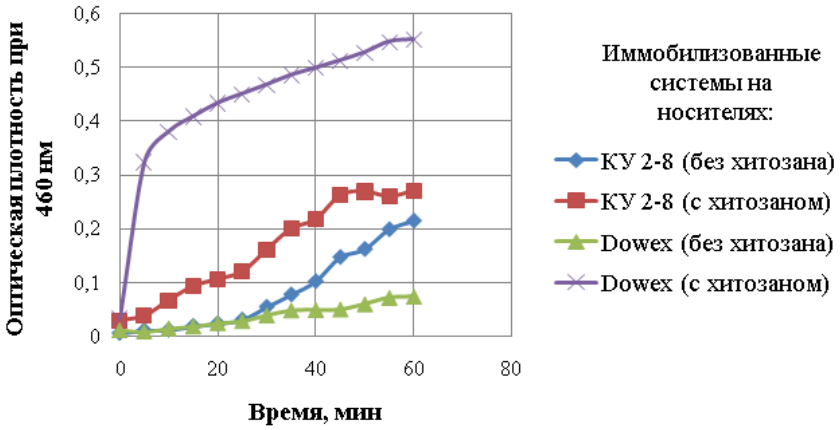


Рис. 2 – Ход реакции окисления о-дианизидина при различных температурах в системе HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза при различных методах иммобилизации

Из рисунка видно, что системы, полученные нековалентной иммобилизацией демонстрируют более низкую каталитическую активность и стабильность вследствие непрочного связывания фермента с носителем и последующего его диффундирования в раствор. Наилучший результат показала ферментная система на носителе Dowex, модифицированном хитозаном.

Выводы

Таким образом, в ходе экспериментов были исследованы свойства биферментной системы на основе пероксидазы хрена и глюкозооксидазы. Выявлено, что оптимальное значение pH для системы HRP-GOX-о-дианизидин-глюкоза – pH = 6,0, оптимальная температура - 25ºС. Доказана возможность ковалентной иммобилизации данной мультиферментной системы на ионообменных смолах (КУ 2-8 и Dowex 50WX2).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 15-08-00535 и 14.08-01218).

Список литературы

1. *Гурвич Я.А., Кумок М.* Химия и технология промежуточных продуктов и органических красителей. М.: Высшая школа, 1968. 360 с.
2. *Wilberg K.Q., Nunes D.G., Rubio J.* Removal of phenol by enzymatic oxidation and flotation // Braz. J. of Chem. Eng. - 2000. - Vol. 17. - P. 4-7.
3. *Karam J. Nicell J.A.* Potential applications of enzymes in waste treatment // J. Chem. Tech. Biotechnol. - 1997. - Vol. 69. - P. 141–153.
4. *Глазова, Н.В.* Влияние ионов кальция при разработке сорбционно-хроматографического метода выделения пероксидазы из экстракта / Н.В. Глазова, А.Н. Серкова // Сорбционные и хроматографические процессы. – 2013 .- Т. 13, вып. 3. - С. 377-384.
5. Glucose oxidase — An overview / S.B. Bankar, M.V. Bule, R.S. Singhal, L. Ananthanarayan // Biotechnology Advances. - 2009. - № 27. - P. 489–501.
6. *Тихонов Б.Б., Сидоров А.И., Сульман Э.М.* Биокатализатор для очистки сточных вод от фенолов на основе пероксидазы хрена, иммобилизованной на модифицированных хитозаном ионообменных смолах // Катализ в промышленности. – 2007. - № 3 - с. 48-50.
7. *Варфоломеев, С.Д.* Химическая энзимология / С.Д. Варфоломеев. - М.: «Академия», 2005. — 480 с.
8. Биотехнология: Учеб.пособие для вузов. В 8 кн. Кн. 7: Иммобилизованные ферменты / И.В. Березин, Н.Л. Клячко, А.В. Левашов и др. – М.: Высш. шк., 1987. – 159 с.

02.00.15

А.С. Торозова[1], Э.М. Сульман[1], П.В. Синицына[1], П. Мяки-Арвела[2], К.П. Волчо[3], Д.Ю. Мурзин[2], И.Ю. Тямина[1]

[1]Тверской государственный технический университет, Химико-технологический факультет, Кафедра биотехнологии и химии, Тверь
[2]Университет Або Академи, Лаборатория индустриальной химии, Турку
[3]Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения РАН, Новосибирск, dmitry.murzin@abo.fi

КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИОКСИНОЛА С ОБЕЗБОЛИВАЮЩИМ ЭФФЕКТОМ

В настоящей работе представлены результаты по подбору и тестированию условий и катализаторов для осуществления реакции взаимодействия эпоксида вербенола с бензальдегидом. Целевой продукт реакции представляет собой диоксинол с выраженным обезболивающим действием. Для проведения реакции были использованы три различных альдегида и протестированы следующие катализаторы: H-Beta-300, H-Beta-150, H-Beta-25 и 5 мас.% Fe-Beta-150.

Ключевые слова: *цеолиты, эпоксид вербенола, биологически активные вещества с обезболивающим эффектом.*

Эпоксид *цис*-вербенола взаимодействует с бензальдегидами в присутствии природной монтмориллонитовой глины асканит-бентонит с образованием гетероциклического продукта, обладающего обезболивающим эффектом, и продуктов изомеризации исходного эпоксида – диола и гидроксикетона [1]. Гетероциклический продукт является структурным аналогом тетрагидроканнабинола, который в настоящее время привлекает к себе особое внимание из-за проявляемой биологической активности [1]. Схема реакции взаимодействия эпоксида вербенола с бензальдегидами представлена на рис.2.

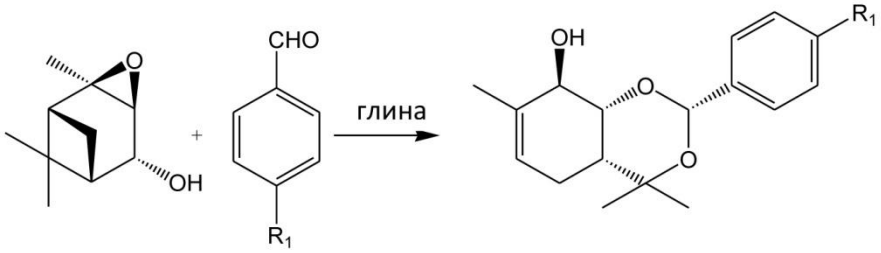


Рис.1. Схема реакции взаимодействия эпоксида вербенола с бензальдегидами
R_1: F, Cl, Br, NO_2 [2]

Обезболивающий эффект компонентов с остовом типа 2-арил-4,4,7-триметил-4a,5,8,8a-тетрагидро-4*H*-бензо[d][1,3]диоксин-8-ола изучен ранее в работе [2]. Реакции были проведены с избытком монтмориллонитовой глины в дихлорметане в качестве растворителя при комнатной температуре, выход составил 10-29%. Так как целевой продукт проявляет высокую биологическую активность и может использоваться как лекарственное средство, то задача синтеза данного соединения является важной в наши дни. Цель настоящей работы заключается в подборе активного катализатора на основе цеолитов для получения продукта, обладающего обезболивающим эффектом.

Структура выбранного для тестирования цеолита типа Beta образована mor (t-tes), bea и mtw (t-mtw) композитными строительными блоками. Максимальный диаметр сферы, которая может проходить сквозь поры, составляет 5.95 Å [3].

Экспериментальная часть. Эксперименты по взаимодействию эпоксида вербенола с бензальдегидами проводились в четырехгорлой стеклянной колбе объемом 250 мл, с использованием тетрагидрофурана, этилацетата, N,N-диметилацетамида и толуола в качестве растворителя. Условия проведения реакции в среде инертного газа: температура 25-70°C,

скорость перемешивания 390 оборотов в минуту. В колбу загружали катализатор (размер частиц цеолитов менее 90 мкм) и выдерживали его в течение 30 мин при температуре 250°C. Далее вносили растворитель объемом 90 мл и при достижении необходимой температуры – 10 мл раствора эпоксида вербенола. Пробы анализировали методом газовой хроматографии и масс-спектрометрии. Для проведения реакции были использованы три различных альдегида, бензальдегид (БА), 4-фторбензальдегид (ФБА), 4-нитробензальдегид (НБА). Были протестированы следующие катализаторы: H-Beta-300, H-Beta-150, H-Beta-25 и 5 мас.% Fe-Beta-150. Исходные цеолиты были синтезированы в Zeolyst International. NH_4-Beta-25, NH_4-Beta-150 и NH_4-Beta-300 были преобразованы в протонные формы прокаливанием в муфельной печи при 500°C. Цеолит H-Beta-150 был модифицирован водным раствором нитрата железа обработкой в течение 4 ч с использованием ультразвука, далее катализатор просушивался в течение 24 ч.

Результаты и обсуждение. Тестирование было осуществлено в диапазоне температур 25-70°C с различными растворителями, также варьировались начальная концентрация эпоксида вербенола и соотношение между эпоксидом вербенола и альдегидом (см. Таб.). Было установлено, что эффект присутствия фтор- или нитрогруппы минимальный.

Таблица. Влияние параметров процесса на конверсию эпоксида вербенола и селективность по основным продуктам

Эксперимент	T, °C	m(кат), мг	Растворитель, мл	Молярное соотношение ЭВ/альдегид	Конверсия, %	Селективность по целевому продукту, %	Селективность по продуктам изомеризации, %	Селективность по неизвестным продуктам, %
1. H-Beta-300 m(ЭВ)=0.300 г m(ФБА)=0.227г	25	75	ТГФ 100	1/1	25	<1	65	35
2. H-Beta-25 m(ЭВ)=0.300 г m(ФБА)=0.227г	40	150	ТГФ 100	1/1	66	<1	83	17
3. H-Beta-25 m(ЭВ)=0.307 г m(ФБА)=0.233г	60	150	ТГФ 50	1/1	74	<1	79	21
4. H-Beta-25 m(ЭВ)=0.303 г m(ФБА)=0.456г	70	150	ЭА 50	1/2	100	1	74	25
5. H-Beta-25 m(ЭВ)=0.303 г m(ФБА)=1.141г	70	300	Т 50	1/5	100	13	48	39
6. H-Beta-25 m(ЭВ)=0.301 г m(НБА)=0.426г	70	150	Т 50	1/2	100	<1	65	34
7. 5 мас.% Fe-Beta-150 m(ЭВ)=0.308 г m(БА)=0.9582 г	70	300	Т 50	1/5	100	9	55	36
8. 5 мас.% Fe-Beta-150 m(ЭВ)=0.303 г m(ФБА)=1.148г	70	300	Т 50	1/5	100	10	74	16

Сокращения: ТГФ – тетрагидрофуран, ЭА – этилацетат, Т – толуол, ДМА - N,N-диметилацетамид

Время реакции: 120 мин.

Реакция взаимодействия ЭВ и ФБА при низких температурах не идет (см. Таб., эксперименты 1-2), при этом в основном были обнаружены продукты изомеризации ЭВ. Из экспериментов 3-5 (см. Таб.) следует, что возрастание конверсии и селективности происходит с изменением растворителя в сторону понижения диэлектрической константы и увеличением соотношения ЭВ/альдегид. Избыток альдегида является важным параметром для осуществления процесса. Для катализаторов H-Beta-25 и 5 мас.% Fe-Beta-150

образование целевого продукта происходило не только из субстрата, но и из продукта изомеризации ЭВ. Например, в первом случае начальное соотношение между продуктом изомеризации и целевым продуктом было равно 7, а после истечения 120 минут – нулю. Аналогичная ситуация наблюдалась в случае 5 мас.% Fe-Beta-150. Надо отметить, что Бренстедовская и Льюисовская кислотность по всем кислотным центрам (слабые, средние и сильные) для катализатора 5 мас.% Fe-Beta-150 составляют 211 и 116 ммоль/г, соответственно, что превышает кислотность H-Beta-300 более чем в три раза и находится в одном диапазоне значений кислотности катализатора H-Beta-25.

Из полученных данных можно сделать вывод, что наиболее эффективным были катализаторы с высокой кислотностью H-Beta-25 и 5 мас.% Fe-Beta-150 с селективностью 13% и 10%, соответственно.

Для тестирования в избытке бензальдегида (соотношение эпоксид вербенола к бензальдегиду 1:133) был выбран модифицированный цеолит 5 мас.% Fe-Beta-150.

Каталитическое тестирование проводили в течение 2 ч при температуре 40°C, используя 300 мг катализатора, начальная концентрация эпоксида вербенола составляла 0.016 моль/л. Основным продуктом реакции был целевой продукт – диоксинол, а также продукты изомеризации и неидентифицированные продукты. Кинетические данные представлены на рис. 3.

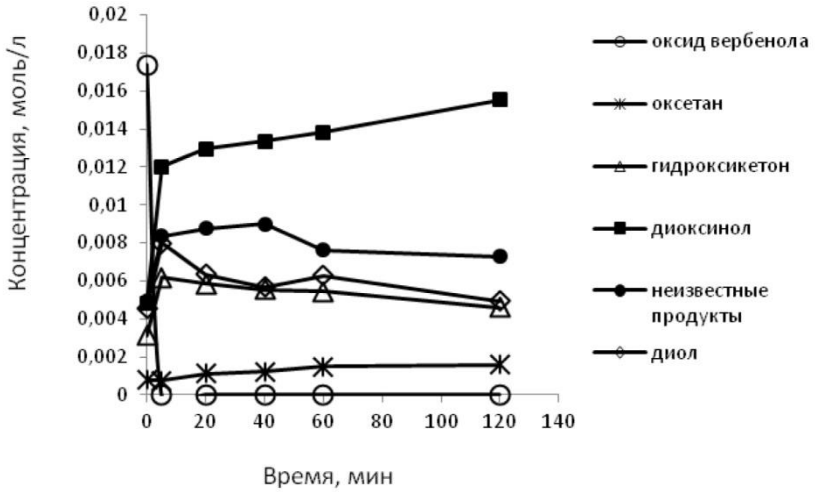


Рис.2. Зависимость концентрации эпоксида вербенола и продуктов его взаимодействия с бензальдегидом от времени для катализатора 5 мас.% Fe-Beta-150

На представленном графике видно, что начальная скорость реакции велика и 100% превращение субстрата происходит еще в первые 5 минут реакции. Также можно сделать вывод о том, что образование целевого продукта идет из продукта изомеризации, диола. Селективность по целевому продукту составила 46% при 100% конверсии эпоксида вербенола.

Список литературы

1. *Il'ina, I.V.; Korchagina, D.V.; Volcho, K.P.; Salakhutdinov, N.F.*; Reaction of (–)-*cis*-verbenol epoxide with aromatic aldehydes over montmorillonite K10 clay, Russian Journal of Organic Chemistry 46 (7), 2010, 1002-1005

2. *Kurbakova, S.Yu.; Il'ina, I.V.; Pavlova, A.; Korchagina, D.; Yarovaya O.; Tolstikova, T.; Volcho, K.P.; Salakhutdinov, N.F*; Synthesis and analgesic activity of monoterpenoid-derived 2-aryl-4,4,7-trimethyl-4a,5,8,8a-tetrahydro-4H-benzo[d][1,3]dioxin-8-ols, Medicinal Chemistry Research, 23, 2014, 1709-1717

3. International zeolite association http://www.iza-structure.org/databases/

02.00.01

Е.А. Фарберова к.х.н., Е.А. Тиньгаева к.х.н., А.Д. Чучалина, А.Р. Кобелева к.т.н.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
химико-технологический факультет, кафедра химии и биотехнологии,
Пермь, teengaeva@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО АКТИВНОГО УГЛЯ

Изучено влияние степени измельчения неспекающегося каменного угля на технологические параметры процесса получения гранулированного активного угля и его качество. Установлено, что увеличение доли частиц мелкой фракции (0,1–40 мкм) в каменноугольной пыли позволяет улучшить его сорбционные характеристики.

Ключевые слова: *каменный уголь; гранулированный активный уголь; гранулометрический состав; истинная плотность; кажущаяся плотность; карбонизация; активация.*

Гранулированные активные угли – это цилиндрические гранулы с определенным диаметром и длиной. Они изготавливаются из измельченного в пыль каменноугольного сырья и связующего путем приготовления угольно-смоляной композиции, формования ее в гранулы, карбонизации и последующей активации перегретым водяным паром [1,2].

Приготовление пыли каменного угля - одна из важных стадий получения гранулированных активных углей (ГАУ), так как степень его измельчения и однородность состава пылевидных частиц может существенно влиять на технологические параметры получения ГАУ и на характеристики получаемого активного продукта [3].

Настоящая работа посвящена изучению влияния степени измельчения неспекающегося каменного угля на технологические характеристики процесса получения ГАУ и его качество.

В качестве объектов исследования выбраны неспекающийся каменный уголь Кузбасского угольного бассейна Бачатского разреза и композиционное связующее, характеристики которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исходных материалов

Каменный уголь	Композиционное связующее
Содержание зольных компонентов – 3,7 мас.%	Выход кокса – 16,5 мас.%
Содержание летучих веществ – 18,5 мас.%	Вязкость при 40°С – 0,960 Па·с 60°С – 0,259 Па·с

С целью получения пыли каменного угля с различным фракционным составом проводили размол исходного угля в шаровой мельнице в течение различного времени (от 1 до 4 часов, образцы СС-1, СС-2, СС-3, СС-4 соответственно).

С помощью лазерного анализатора размеров частиц «Mastersizer 2000» (Malvern) проведены исследования гранулометрического состава проб пыли неспекающегося каменного угля. В таблице 2 приведены результаты анализа.

Таблица 2 – Гранулометрический состав пыли

Размер частиц, мкм	Содержание частиц, % в образцах пыли			
	СС-1	СС-2	СС-3	СС-4
0,1–40	79,54	86,81	88,64	95,68
40–63	8,60	6,69	6,53	3,26
63–100	6,52	3,74	3,86	1,06
100–2000	5,35	2,77	0,97	0,00

По результатам измерения размера частиц пыли, основной фракцией во всех пробах являлись частицы с размером 0,1–40 мкм. Кривые, представленные на рис. 1, отражают характер изменения содержания частиц определенных размеров в зависимости от времени измельчения каменного угля.

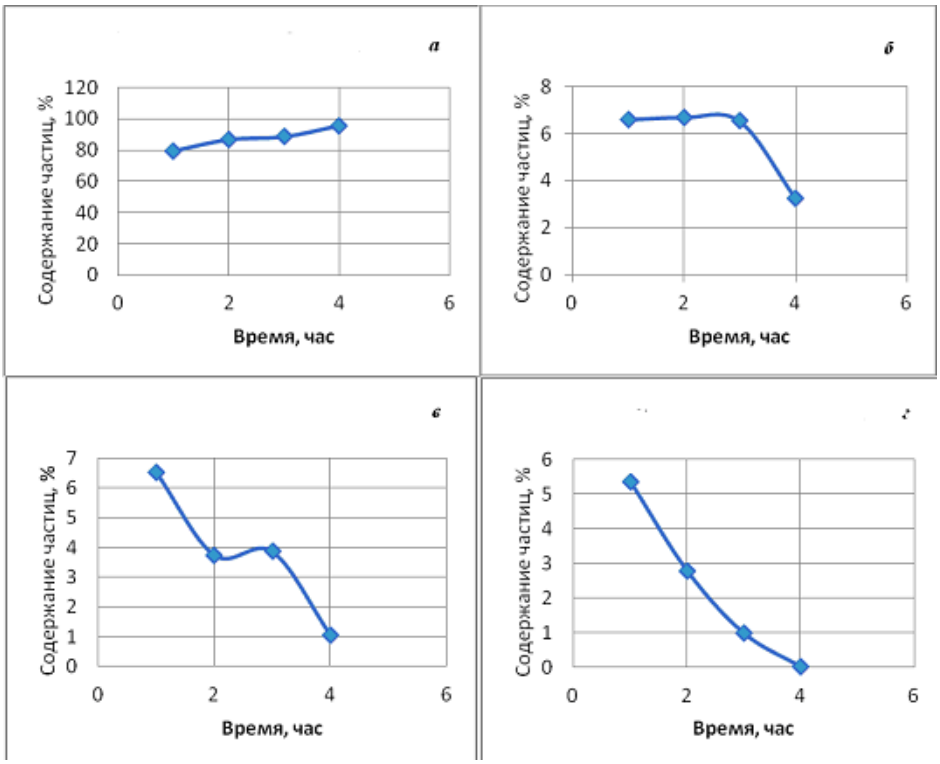


Рис. 1 – Зависимость гранулометрического состава пыли от времени размола каменного угля
а - фракция 0,1–40 мкм; *б* - фракция 40–63 мкм;
в - фракция 63–100 мкм; *г* - фракция 100–2000 мкм

Принимая во внимание близкие значения содержания основных фракций в образцах пыли, полученных при размоле в течение 2 и 3 часов, для дальнейших исследований использовали образцы, время размола которых составило 1, 3 и 4 часа.

Для исследования влияния степени измельчения сырья на качество ГАУ получена серия образцов гранулированных сорбентов. В двухлопастном смесителе готовили угольно-смоляную композицию (УСК) путём смешивания пыли и связующего и определяли их соотношение (таблица 3).

Таблица 3 – Состав угольно-смоляной композиции

Образец	Соотношение	
	пыль, %	связующее, %
СС-1	73,0	27,0
СС-3	70,5	29,5
СС-4	70,0	30,0

При увеличении степени измельчения каменного угля возрастает количество связующего, необходимого для получения пластичной пасты, что в дальнейшем приводит к увеличению массовой доли летучих веществ в гранулах (таблица 4).

Гранулы формовали на шнековом прессе через фильеры с диаметром отверстия 4 мм. Сырые гранулы сушили при температуре 150°С, карбонизовали в среде CO_2 при температуре (500±20)°С, обезлетучивали при температуре (800±50)°С в среде CO_2 и активировали в среде перегретого водяного пара при температуре (900±50)°С до степени обгара порядка 45–50%.

В таблицах 4–8 представлены характеристики образцов ГАУ по стадиям их получения.

С увеличением времени размола истинная плотность сырых гранул возрастает, а кажущаяся плотность несколько снижается.

На основании значений кажущейся плотности гранул (отношение массы гранулы к ее объему) на разных стадиях получения рассчитаны коэффициенты объемной усадки гранул по формуле [4]:

$$\rho_2 = \rho_1 \cdot k \cdot x_m ,$$

где k – коэффициент объемной усадки гранул;

ρ_1 и ρ_2 – кажущаяся плотность гранул на предыдущей и последующей стадиях;

x_m – массовый выход продукта на соответствующей стадии.

Таблица 4 – Характеристики сырых гранул

Показатели	Образец		
	СС-1	СС-3	СС-4
Массовая доля воды, %	10,1	6,9	6,7
Массовая доля золы, %	4,9	4,6	4,8
Массовая доля летучих веществ, %	29,8	32,8	31,1
Истинная плотность, г/см^3	1,367	1,362	1,384
Кажущаяся плотность, г/см^3	0,992	0,995	0,956

Таблица 5 – Характеристики карбонизованных гранул

Показатели	Образец		
	СС-1	СС-3	СС-4
Массовая доля золы, %	6,5	5,7	6,3
Массовая доля летучих веществ, %	-	10,0	9,2
Насыпная плотность, г/дм^3	644	615	620
Прочность при истирании, %	88	86	83
Суммарный объём пор по воде, см^3/г	-	0,29	0,29
Истинная плотность, г/см^3	1,477	1,479	1,506
Кажущаяся плотность, г/см^3	0,981	0,966	0,889
Коэффициент объемной усадки	1,224	1,243	1,185
Выход продукта	0,808	0,781	0,785

Как видно из таблицы 5, с увеличением степени измельчения каменного угля коэффициент объемной усадки гранул в процессе их карбонизации снижается незначительно, истинная плотность гранул (отношение массы гранулы к ее объему без учета пор) возрастает.

Таблица 6 – Характеристики обезлетученных гранул

Показатели	Образец		
	СС-1	СС-3	СС-4
Массовая доля золы, %	7,2	6,7	7,0
Насыпная плотность, г/дм^3	725	686	694
Прочность при истирании, %	94	92	91
Суммарный объём пор по воде, см^3/г	-	0,33	0,33
Истинная плотность, г/см^3	1,850	1,858	1,874
Кажущаяся плотность, г/см^3	1,029	1,065	0,966
Коэффициент объемной усадки	1,07	1,22	1,19
Выход продукта	0,900	0,903	0,915

По данным таблицы 6 прочность обезлетученных гранул при истирании снижается с увеличением доли мелкой фракции в пыли.

С увеличением степени измельчения угля, в основном, наблюдается рост истинной плотности обезлетученных гранул. Полное представление об изменении истинной и кажущейся плотности гранул на различных стадиях термообработки отражают кривые, представленные на рис. 2, 3.

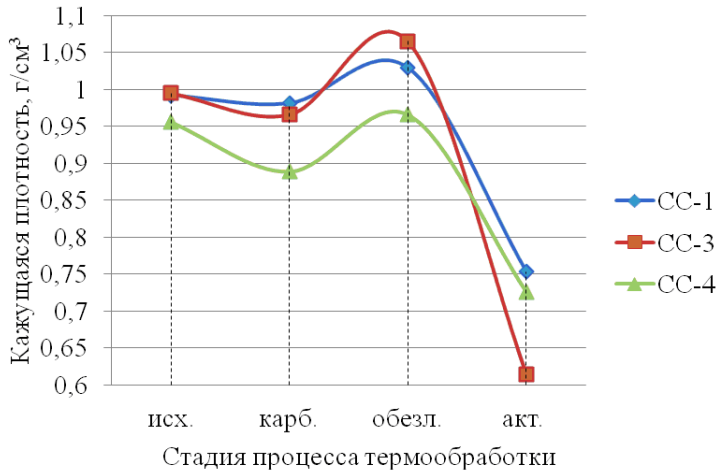


Рис. 2 – Зависимость кажущейся плотности гранул по стадиям термообработки

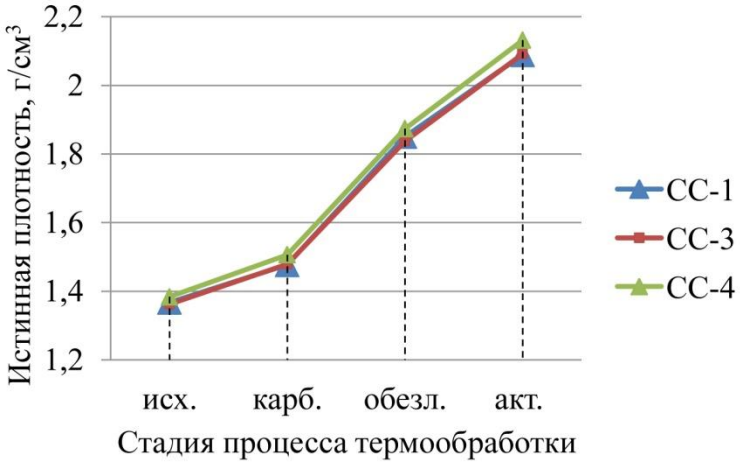


Рис. 3 – Зависимость истинной плотности гранул по стадиям термообработки

Таблица 7– Характеристика гранул после конечной стадии активации

Показатели	Технические требования [5]	Образец		
		СС-1	СС-3	СС-4
Массовая доля золы, %	не более 15	13,1	12,1	13,0
Насыпная плотность, г/дм^3	фиксируется	541	516	521
Прочность при истирании, %	не менее 80	86	84	84
Суммарный объём пор по воде, см^3/г	не регламентируется	0,70	0,69	0,66
Равновесная активность по толуолу, г/дм^3	не менее 150	155	154	161
Адсорбционная активность по йоду, %	не менее 75	94	100	98
Истинная плотность, г/см^3	фиксируется	2,089	2,091	2,132
Кажущаяся плотность, г/см^3	фиксируется	0,753	0,614	0,726
Коэффициент объемной усадки	фиксируется	0,710	0,613	0,799

На стадиях обезлетучивания и активации заметного влияния гранулометрического состава исходной каменноугольной пыли на коэффициент объемной усадки гранул не прослеживается.

Как видно из таблицы 7, все образцы активных углей соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к ним. Равновесная активность по толуолу с увеличением степени измельчения каменного угля несколько возрастает.

В таблице 8 приведены характеристики пористой структуры образцов гранулированных активных углей, полученных с использованием каменноугольной пыли различной степени измельчения.

Таблица 8–Характеристики пористой структуры активных углей

Показатель	Образец		
	СС-1	СС-3	СС-4
Удельная поверхность по БЭТ, $м^2/г$	1065	1142	1166
Поверхность микропор по методу Дубинина-Радушкевича, $м^2/г$	1222	1309	1347
Предельный объем адсорбционного пространства, $см^3/г$	0,503	0,529	0,524
Объем микропор по методу Дубинина-Радушкевича, $см^3/г$	0,434	0,465	0,478
Полуширина пор по методу Дубинина-Радушкевича, нм	0,74	0,75	0,80

Увеличение степени измельчения каменного угля при получении гранулированных активных углей приводит к развитию пористой структуры, наблюдается увеличение объема микропор, но при этом несколько возрастает их размер.

Вывод

В результате проведенных исследований установлено, что увеличение доли частиц мелкой фракции (0,1–40 мкм) в каменноугольной пыли позволяет повысить сорбционную емкость получаемых гранулированных активных углей и способствует развитию их пористой структуры.

В работе представлены результаты собственных исследований, выполненных в соответствии с постановлением Правительства России №218 от 09.04. 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичных производств».

Список литературы

1. *Мухин В.М., Тарасов А.В., Клушин В.Н*. Активные угли России.– 2000.– М.: Металлургия.– 352 с.

2. *Глушанков С.Л., Фарберова Е.А., Зорина Е.И., Тиньгаева Е.А.* Усовершенствование технологии получения гранулированного активного угля мелкого зернения АГ-5 // Журнал прикладной химии. 2014. Т.83. Вып.6. С.714–720.

3.*Олонцев В.Ф.* Российские активные угли. Пермь: Мультиграф. –1995.– 89 с.

4. *Miura S. and Silvestone P.L.* Change of pore Properties During carbonization of coking Coal // Carbon – 1980. –V.18,N.2. – P. 93–108.

5. ГОСТ 8703-74 Уголь активный рекуперационный. Технические условия. Изд. стандартов. 1998, 8 с.

02.02.04

Н.М. Хлынова

Тюменский государственный нефтегазовый университет
khlynova.natalia@gmail.com

ИНВЕРСИОННО-ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОДА

Показана возможность расчета на основе экспериментальных данных фрактальной размерности твердой поверхности электрода. Методом инверсионной вольтамперометрии осуществляется электроосаждение малорастворимого вещества на поверхности твердого электрода с последующим электрорастворением монослойной анодной пленки и нахождения количества осажденного вещества в монослое. Частицы осажденного вещества используются в качестве элементов покрывающего поверхность электрода множества.

Ключевые слова: *Фрактал, фрактальная размерность, электроосаждение, электрорастворение, монослой.*

Фрактальные объекты в отличие от компактных гладких объектов имеют размерность, которая не выражается целым числом. Фрактальные объекты, так же как и нанообъекты проявляют специфические физико-химические свойства [1] отличные от свойств индивидуальной твердой фазы.

Для гетерогенных систем шероховатости и дефекты поверхности самоподобны на разных уровнях. Величина фрактальной размерности, с помощью которой описывают такие фрактальные материалы, как было указано в работе [2] лежит в пределах $2 \leq D < 3$: значение 2 указывает на гладкую, упорядоченную структуру поверхности, промежуточное значение – на шероховатую поверхность, значения близкие к 3 означает наличие грубо разупорядоченной поверхности.

Итак, одной из основных современных задач изучения физико-химических процессов, протекающих на границе раздела фаз является определение фрактальной размерности различных поверхностей.

Известные физические способы определения фрактальной размерности объекта, размеры частиц которого лежат в нанометровом диапазоне, сводятся к количественному анализу его изображения или картины малоуглового рассеянния света (рентгеновских лучей, пучка протонов, потока электронов) нанообъектом. Изображение оцифровывается и обрабатывается по алгоритму, зависящему от типа исследуемого объекта. Существуют различные варианты метода анализа микрофотографий, описанных в [2]. Все они используют соотношение «число элементов покрывающего множества – радиус, описывающий изучаемый кластер», дающего определение фрактальной размерности физического объекта.

При определении фрактальной размерности физического объекта путем математической обработки изображения данного объекта, полученного с помощью просвечивающей электронной микроскопии либо сканирующей электронной микроскопии, необходимо учитывать эффекты, приводящие к ошибке в полученном значении размерности. В работе [3] был проведен анализ трех различных методик определения фрактальной размерности двумерных объектов, и было показано, что во всех методиках наблюдается весьма значительное завышение размерности. Такая ошибка является следствием двух эффектов: 1) искажение изображения, вносимое прибором (приборное разрешение и шумы) и процедурой оцифровки изображения (пиксельный эффект), 2) собственная ошибка метода определения размерности.

Авнир с соавторами [4] предложил использовать молекулы органических веществ в качестве элементов покрывающего множества при их адсорбции на поверхности твердой фазы.

В методе инверсионной вольтамперометрии на поверхности твердого электрода происходит осаждение пленки металла или малорастворимого соединения из разбавленных растворов электролитов, содержащих микроконцентрации определяемых веществ [5]. Известно, что путем электроосаждения и дальнейшего электровосстановления пленок металла или малорастворимого соединения довольно часто удается выделить монослой осадка на поверхности твердого электрода [6].

Результаты исследования монослоев малорастворимых солей, образующихся на поверхности серебряного поликристаллического электрода, в растворах, содержащих микроконцентрации тиоцианид-ионов, метаарсенит-ионов и гексацианоферрат (II)-ионов [6] и на поверхности монокристаллического медного электрода в растворах [7], содержащих микроконцентрации гидрофосфат-ионов, гидроксид-ионов, тиоцианид-ионов и гексацианоферрат (II)-ионов, представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

В таблицах использованы следующие обозначения: q – количество осадка, соответствующее максимальному заполнению поверхности монослоем соединения, n – количество молей осаждаемого вещества, приходящееся на единицу массы материала электрода в монослое, σ – площадь поперечного сечения частицы осажденного на электроде вещества.

Таблица 1– Влияние площади поперечного сечения частиц электроосажденного вещества на поверхностную концентрацию вещества на серебряном электроде

Соединение	q,мкКл	Количество измерений	σ, Å^2	lg σ	n, моль/г	lg n
$AgAsO_2$	40±1	5	9,42	0,974	8,27	0,918
$AgSNC$	38±1	5	9,78	0,990	7,96	0,901
$Ag_4[(CN)_6]$	140±4	5	10,21	1,009	7,60	0,881

Таблица 2– Влияние площади поперечного сечения частиц электроосажденного вещества на поверхностную концентрацию вещества на медном электроде

Соединение	q,мкКл	Количество измерений	σ, Å^2	lg σ	n, моль/г	lg n
$CuHPO_4$	82±2	5	2,21	0,344	4,63	0,666
$CuOH$	116±3	5	0,70	–0,156	14,76	1,169
$CuCNS$	28±1	5	2,87	0,458	3,56	0,551
$Cu_4[(CN)_6]$	48±1	5	6,70	0,826	1,53	0,185

По тангенсу угла наклона зависимости lg n – lg σ определим фрактальную размерность твердого серебряного поликристаллического (рис.1) и медного монокристаллического электрода (рис.2):

$D = -2 \operatorname{tg}\alpha$

Получены значения D = 2.18 и D = 2.02 для поликристаллического и монокристаллического металлических электродов соответственно. Как и следовало ожидать из физических соображений, для монокристаллического электрода практически наблюдается совпадение фрактальной и топологической размерности.

Список литературы

1. *Смирнов Б.М.* Фрактальные кластеры// Успехи физических наук, 1986, т. 149, т.2, с.177-219.
2. *Федер Е.* «Фракталы», М:, Мир, 1991, 254 с.
3. *Podsiadlo P., Stachowiak G.W.* Evaluation of boundary fractal methods for the characterization of wear particles// Wear, 1998, 217, pp. 24-34.
4. *Avnir D. (Ed.),* The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry: Surfaces, Colloids, Polymers. Wiley, Chichester, 1989. 441p.
5. *Н.М. Хлынова, К.С. Чемезова.* Особенности электроосаждения пористой анодной пленки на металлах в разбавленных растворах// Научно-технический вестник Поволжья, № 4, 2013, с 87-93.
6. *Н.М. Хлынова, К.С.Чемезова.* Анодные пленки в инверсионных электрохимических методах. Тюмень: Издательство ТюмГНГУ, 2005, 203 с.
7. *Г.К. Севастьянова.* Инверсионные хронопотенциометрия и вольтамперометрия малорастворимых соединений на медном электроде: дис.... канд. хим. наук: 02.02.04. Тюмень: 1988. 234 с.

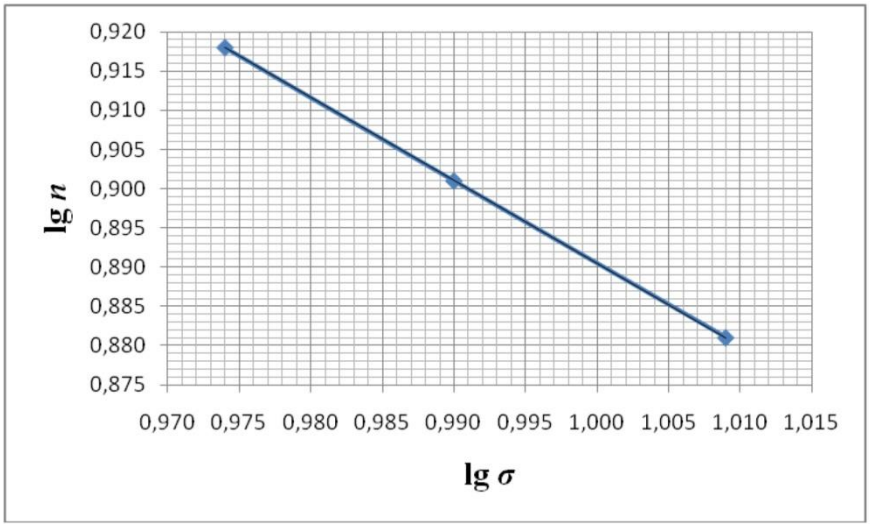


Рис.1– Зависимость количества частиц на поверхности серебряного поликристаллического электрода от площади поперечного сечения частиц в логарифмических координатах

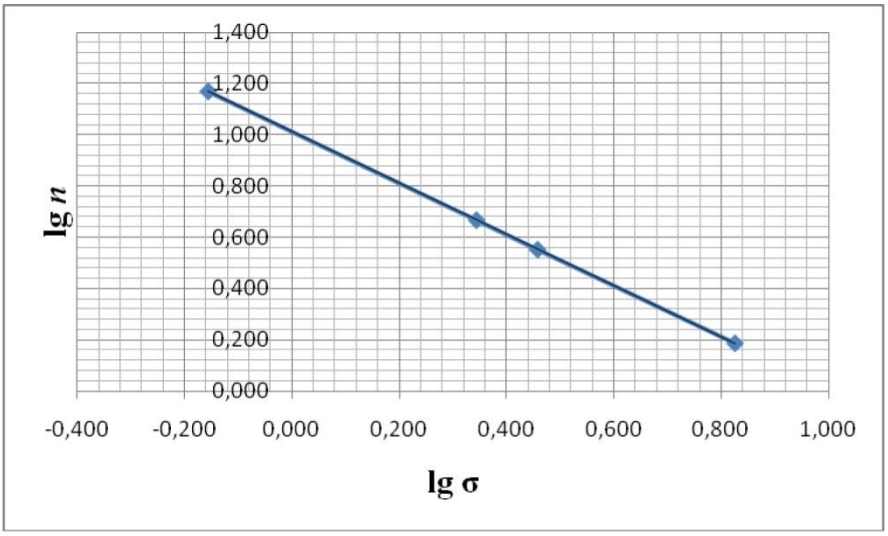


Рис. 2– Зависимость количества частиц на поверхности медного монокристаллического электрода от площади поперечного сечения частиц в логарифмических координатах

02.00.03

Е.И. Шиманская[1] к.х.н., А.А. Степачёва[1] к.х.н., Ю.В. Луговой[1] к.т.н., Э.М. Сульман[1] д.х.н., А.Е. Филатова[1], М.Г. Сульман[1,2], д.х.н., Е.В. Ребров[1,3] д.х.н

[1]Тверской государственный технический университет,
химико-технологический факультет, кафедра Биотехнологии и химии,
Тверь, Россия, shimanskaya-tstu@yandex.ru
[2]Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия
[3]University of Warwick, School of Engineering, Coventry, UK

ПЕРЕРАБОТКА ЛИГНИНА И ЛИГНИН-СОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ЖИДКИЕ ТОПЛИВА

Изучен процесс гидролитической переработки лигнин-содержащего сырья с использованием полярных растворителей в присутствии палладий-содержащих катализаторов. Найдено, что использование пропанола-2 позволяет достичь высоких степеней конверсии субстрата (до 80%) с получением ароматических соединений.

Ключевые слова: *гидрогенолиз, биомасса, катализатор, лигнин, бензол, толуол, фенол.*

Биомасса является одним из важнейших ресурсов для получения альтернативных источников энергии. Современные исследования, посвященные путям переработки биомассы, выделяют следующие направления конверсии растительного сырья в топлива [1]: прямое сжигание; пиролиз с получением горючих газов, жидкого топлива и твердого остатка; переэтерификация масел с получением биодизельного топлива; биологическое разложение биомассы в биоэтанол, биометанол и метан. К одному из направлений, способствующих достижению целей получения новых альтернативных источников энергии, относится производство биотоплив из переработанных отходов производств, например, лигнина [2, 3]. Лигнин как составная часть древесины – наиболее трудно утилизируемый отход производства. Лигнин представляет собой трехмерный аморфный полимер, состоящий из метоксилированных фенилпропановых структур (Рис. 1) [4]. Состав, молекулярная масса и размер молекулы лигнина отличаются от растения к растению, причем количество лигнина в целом снижается в следующем порядке: хвойные породы > лиственные породы > травы [3, 5]. Природный лигнин – полифункциональное соединение, содержащее –ОН – фенольные и алифатические, -СО, –СООН группы [6].

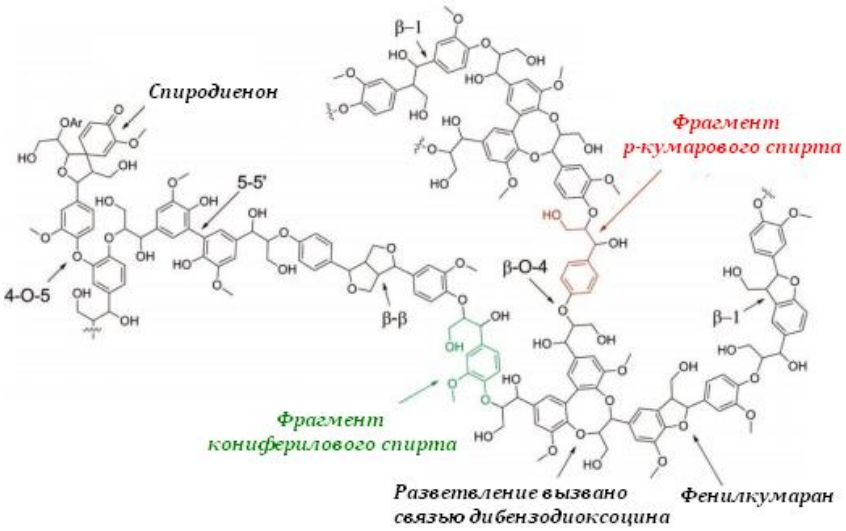


Рис. 1 – Схематическое изображение структуры лигнина

Поскольку в состав лигнина входят гваяцилпропановые, сирингилпропановые и *n*-оксифенилпропановые структуры [6], при его окислительной или восстановительной деструкции образуются ароматические и фенольные соединения, наиболее важными из которых считают ванилин, сиреневый альдегид, *n*-гидроксибензальдегид, пирокатехин, пирогаллол, фенол [3]. Можно выделить две группы методов переработки лигнина. К первой группе относится биотехнологическая переработка лигнина, заключающаяся в получении органоминеральных удобрений с использованием микроорганизмов и их ферментов. К другой группе методов можно отнести ряд процессов, основанных на каталитической переработке лигнин-содержащего сырья. Традиционным методом получения жидких топлив из растительной биомассы является пиролиз. Причем скорость термического разложения биомассы зависит от размера частиц и типа, а также скорости нагрева, конечной температуры, конфигурации реактора и наличия примесей. Быстрый пиролиз является относительно новой технологией для преобразования биомассы в топливо [7]. Бионефть, полученная методом быстрого пиролиза из лигнина (пиролитический лигнин), представляет собой сложную смесь из воды, органических кислот, альдегидов, кетонов, сахаров, фенольных смол и олигомеров [8, 9]. Другим перспективным методом переработки лигнин-содержащего сырья является его гидрогенолиз и гидроочистка. Сухой лигнин может быть каталитически преобразован в жидкие топлива при температуре значительно ниже, чем для пиролиза. Процесс гидропереработки включает в себя широкий спектр химических реакций таких как, деоксигенирование, гидрирование кольца, деметилирование и трансметилирование, причем эти реакции протекают одновременно, в результате чего образуется сложная смесь с составом близким к пиролитической бионефти. Низкое содержание кислорода в полученном продукте делает его химически более стабильным по сравнению с пиролизной жидкостью [10]. Гидрогенолиз, является наиболее перспективным методом для производства ароматических соединений из лигнина. По сравнению с пиролизом, гидрогенолиз в присутствии протонных растворителей приводит к более высокой суммарной конверсии, и более высоким выходам продукта [11]. К тому же, в случае гидрогенолиза требуется гораздо меньшая температура (300 – 600°C) [12]. Среди растворителей широко используются полярные жидкости, такие как тетралин [13], формиат натрия [14], муравьиная кислота [15].

В данной работе проводилось исследование процесса гидрогенолиза растительной биомассы (опилок) в присутствии палладий-содержащего катализатора. Эксперименты проводились в стальном периодическом реакторе Parr Series 5000 Multiple Reactor System (Parr Instrument, USA) при следующих условиях: масса субстрата – 1.0 г, масса катализатора – 0.1 г, температура – 200^{o}C, парциальное давление водорода – 10 МПа, объем растворителя – 30 мл. В работе использовались следующие полярные растворители: пропанол-2, вода, этанол. Анализ жидкой фазы проводился методом хромато-масс-спектроскопии, пробы жидкой фазы отбирались каждые 30 мин в течение 2 часов. Конверсия субстрата рассчитывалась по окончанию реакции, исходя из разницы начальной массы субстрата и массы сухого остатка.

Анализ жидкой фазы во всех экспериментах показал присутствие в катализате таких соединений, как бензол, толуол, фенол, *o*- и *n*-крезолы, циклогексан, метоксициклогексан (Таблица 1).

Таблица 1 – Результаты экспериментов по гидрогенолизу лигнин-содержащего сырья

Растворитель	Конверсия, %	Выход, %				
		C_6H_6	C_7H_8	Фенолы	C_6H_{12}	$C_6H_{11}OCH_3$
Вода	75.0	10.0	13.0	38.0	5.0	35.0
Пропанол-2	80.0	34.0	31.0	15.0	11.0	9.0
Этанол	67.0	31.0	27.0	12.0	22.0	8.0

Таким образом, наилучшие результаты были получены при использовании пропанола-2 в качестве растворителя. Необходимо отметить, что при проведении процесса гидрогенолиза субстрата в воде наблюдалось разделение катализата на две фазы: верхний слой содержал циклические и ароматические углеводороды, нижний – фенолы. Как видно из таблицы 1, при использовании воды в качестве растворителя главным образом протекают реакции гидролиза субстрата, тогда как при использовании спирта основными реакциями являются деполимеризация и дезоксигенирование.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 15-08-00245 А и Российского научного фонда (грант № 15-13-20015).

Список литературы

1. *Alonso D.M.* Catalytic conversion of biomass to biofuels [Text] / D.M. Alonso, J.Q. Bond, J.A. Dumesic // Green Chemistry. – 2010. - № 12. – P. 1493-1513.
2. *Perlack R.D.* Biomass as Feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion ton annual supply [Text] / R.D. Perlack [et al.] // U.S. Department of Energy.- 2005.
3. *Roy M.J.* Hydrodeoxygenation of lignin model compounds via thermal catalytic reactions [Text] / M. J. Roy // Georgia Institute of Technology. - December 2012. – P. 45.
4. *Prasongsuk S.* Decolourization of Pulp Mill Wastewater Using Thermotolerant White Rot Fungi [Text] / S. Prasongsuk [et al.] // Science Asia. – 2009. – Vol. 35. – P. 37-41.
5. *Zakzeski J.* The Catalytic Valorization of Lignin for the Production of Renewable Chemicals [Text] / J. Zakzeski [et al.] // Chem. Rev. – 2010. – Vol. 110. – P. 3552-3599.
6. *Simonova, V.V.* Methods of Industrial Lignins Utilization [Text] / V. V. Simonova, T. G. Shendrika, B. N. Kuznetsov // Journal of Siberian Federal University. Chemistry 4. – 2010. – Vol. 3. – P. 340-354.
7. *Kalita P.* Determination and comparison of kinetic parameters of low density biomass fuels [Text] / P. Kalita [et al.] // Journal Renewable and Sustainable Energy. – 2009. – Vol. 1. – Issue 2. – 12 p.
8. *Ingram L.* Pyrolysis of wood and bark in an auger reactor: Physical properties and chemical analysis of the produced bio-oils [Text] / L. Ingram [et al.] // Energy and Fuels. – 2008. – Vol. 22. – P. 614-625.
9. *Bulushev, D.A.* Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: A review [Text] / D. A. Bulushev, J. R.H. Ross // Catalysis Today. – 2011. – Vol. 171. – P. 1–13.
10. *Azadi P.* Liquid fuels hydrogen and chemicals from lignin: A critical review [Text] / P. Azadi, O.R. Inderwildi, R. Farnood, D.A. King // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2013. - № 21. – P. 506–523.
11. *Pandey M.P.* Lignin depolymerization and conversion: a review of thermochemical methods [Text] / M.P. Pandey, C.S. Kim // Chemical Engineering & Technology. – 2011. – Vol. 85. – P. 38.
12. *Dorrestijin E.* The occurrence and reactivity of phenoxyl linkages in lignin and low rank coal [Text] / E. Dorrestijin, L.J.J. Laarhoven, I.W.C.E. Arends, P. Mulder // Journal of Analytical Application in Pyrolysis. – 2000. – Vol. 54. – P. 153.
13. *Kudsy M.* Pyrolysis of kraft lignin in molten ZnCl2KCl media with tetralin vapor addition [Text] / M. Kudsy, H. Kumazawa, E. Sada // Canadian Journal of Chemical Engineering. – 1995. – Vol. 73. – P. 411-415.
14. *Gonçalves A.R.* Integrated Processes for Use of Pulps and Lignins Obtained from Sugarcane Bagasse and Straw [Text] / A.R. Gonçalves, U. Schuchardt // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2002. – Vol. 98–100. – P. 1213.
15. *Kleinert M.* Towards a lignocellulosic biorefinery: Direct one-step conversion of lignin to hydrogen-enriched bio-fuel [Text] / M. Kleinert, T. Barth // Energy Fuels. – 2008. – Vol. 22. – P. 1371-1379.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

05.13.18

В.Н. Абузяров, д.т.н., И.А. Акимов

Филиал Московского технологического института «МТИ» в г. Оренбурге,
кафедра информатики и автоматизации,
«Оренбургский государственный педагогический университет», кафедра математического анализа и методики преподавания математики, Оренбург, it@mti_orenburg.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСТАНОВКАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Статья посвящена выявлению причин влияющих на качество продукции из композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

Ключевые слова: *технологический процесс, помехи, погрешность, композиционные материалы, установка автоматического ведения технологического процесса.*

В установках автоматического ведения технологического процесса при изготовлении изделий из композиционных материалов с использованием вычислительных машин неизбежно возникают различные погрешности, начиная от погрешности метода, погрешностей в линиях коммутации и заканчивая помехами и погрешностями в вычислительной машине. [1]

Вместе с тем часть возникающих неточностей удается избежать при использовании программных пакетов MatLab, MathCad, Mathematika и др.

Наиболее желаемый результат получится в случае реализации высокоскоростных микроконтроллеров [2].

В работах посвященных общим вопросам по проблеме изготовления композиционных материалов Н.Н. Лебедева и В.М. Майзеля Н.Н.Безухова, И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра., Уэйнера, Гейтвуда Б.Е и других авторов недостаточно внимания уделялось воздействию электромагнитной составляющей.

Обобщенная структурная схема автоматизированной системы управления показана в соответствии с рисунком 1.

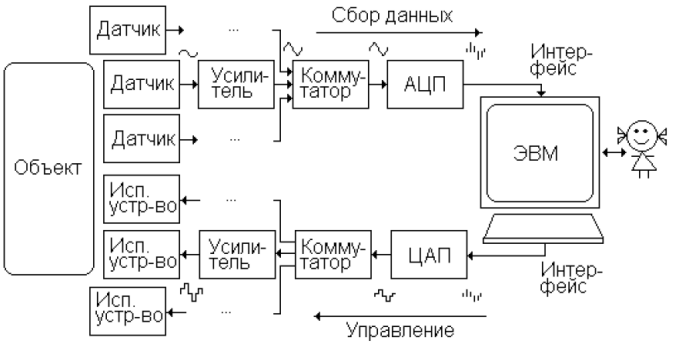


Рис. 1 – Обобщенная структурная автоматизированная система управления

На структурной схеме представлена универсальная классическая автоматизированная система управления, применяемая за рубежом (КАМАК). В ней имеются датчики, усилители, коммутаторы, преобразователи, а также вычислительная машина, которая обрабатывает сигналы с датчиков, сигналов обратной связи и вырабатывает управляющие команды.

Присутствие оператора, контролирующего реакцию системы и поведение объекта, в такой схеме управления обязательно.

Альтернативная автоматизированная система, составляющая основу при производстве изделий из композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса, представлена в соответствии с рисунком 2.

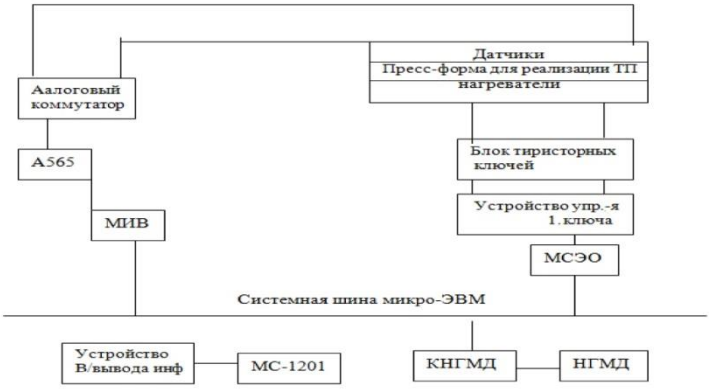


Рис. 2 – Классическая автоматизированная система управления технологическими процессами.

В таких системах управления используются линии коммутации, датчики с заведомо расширенным диапазоном погрешности (для датчиков температуры – плюс, минус 5 градусов), многочисленные промежуточные звенья, каждое из которых вносит дополнительно новые погрешности и возможные помехи (тиристорные ключи в момент замыкания) и т.д.

Основными внешними факторами, влияющими на АВТП, являются помехи из сети: импульсные помехи, длительные помехи, импульсное электрическое поле, импульсное магнитное поле, разряды электростатических зарядов.

Для следящего устройства помехозащищенность имеет количественные показатели. Так в отношении внешних помех введем отношение

$$P = \frac{f_c}{f_\Sigma}, \tag{1}$$

где, f_c – усредненная частотность сбоев

f_Σ – усредненная частотность помех

P – помехозащищенность.

Помехам свойственны амплитуда A и длительность τ. Возьмем среднюю частотность поступления помех $f_{A\tau}$, где A и τ имеют одинаковые значения, тогда частотность сбоев $f_{cA\tau}$ будет меньше частоты $f_{A\tau}$ так, как появление сбоя будет еще зависеть от состояния запоминающих и логических элементов.

Помехи могу появляться случайным образом и длительно, в этом случае отношение $P = \frac{f_c}{f_\Sigma}$ будет устремлено к пределу, который называют вероятностью сбоя

$$P_c\ (A,\tau) = \frac{f_{cA\tau}}{f_{A\tau}} = \lim_{T\to\infty}\frac{m}{n}, \tag{2}$$

где n – количество помех за время T

m – количество сбоев.

Плотность помех в установке АВТП равна

$$\Theta\ (A,\tau) = \frac{f_{A\tau}}{f_\Sigma} \tag{3}$$

где $\Theta\ (A,\tau)$ плотность помех

$f_{A\tau}$ – средняя частота наступления помех

f_Σ – усредненная частотность помех.

Усредненная частота сбоев на установке

$f_c = \iint_0^\infty f_{A\tau}\, P_c\ (A,\tau)\, dAd\tau = f_\Sigma \iint_0^\infty P(A,\tau) P_c\ (A,\tau)$dAdτ.

Тогда

$$P = \iint_0^\infty P(A,\tau) P_c\ (A,\tau)\text{dAd}\tau,$$

если помеху можно выразить одним параметром (амплитудой), тогда

$$P = \int_0^{\infty} P(A)\, P_c\,(A) dA$$

В случае роста А и τ функция $P_c\,(A,\tau)$ монотонно возрастает в пределах от нуля до единицы. Крутизна функции аппроксимируется пороговой функцией вида

$$P_c\,(A,\tau) = \begin{cases} \beta, если\ \tau < \tau_{пор}\ или\ A < A_{пор;} \\ 1, \ если\ \tau \geq \tau_{пор}\ и\ A \geq A_{порб}\ , \end{cases}$$

где $A_{пор,}\ \tau_{пор}$ – пороговые значения аргументов.

Тогда

$$P = \int_0^{A_{пор}} \int_0^{\infty} \beta p(A,\tau)\, dAd\tau + \int_{A_{пор}}^{\infty} \int_0^{\tau_{пор}} \beta p(A,\tau)\, dAd\tau + \int_{A_{пор}}^{\infty} \int_{\tau_{пор}}^{\infty} P(A,\tau)\, dAd\tau$$

$$= \beta + (1 - \beta) \int_{A_{пор}}^{\infty} \int_{\tau_{пор}}^{\infty} P(A,\tau)\, dAd\tau. \qquad (4)$$

При независимых аргументах А, τ

$$P(A,\tau) = P(A)P(\tau) \text{ и}$$

$$\Theta = \beta + (1 - \beta) \int_{A_{пор}}^{\infty} p(A)\, dA \int_{\tau_{пор}}^{\infty} p(\tau) d\tau.$$

Экспоненциальные функции вида

$$\text{P(B)} = \bar{B}^{-1} e^{\frac{-B}{\bar{B}}}$$

аппроксимируют плотность распределения амплитуд, а также длительность импульсных помех.

Тогда

$$\Theta = \beta + (1 - \beta) \int_{A_{пор}}^{\infty} p(A)\, dA \int_{\tau_{пор}}^{\infty} p(\tau) d\tau.$$

преобразуем к виду

$$\Theta = \beta + \left(1 - \beta\right) e^{\frac{-A_{пор}}{\bar{A}}} e^{\frac{-\tau_{пор}}{\bar{\tau}}}, \qquad (22)$$

где $\bar{A}, \bar{\tau}$ – математическое ожидание аргументов А и τ.

В случае описания помехи одним аргументом плотность помех выразится зависимостью

$$\Theta = \beta + \left(1 - \beta\right) e^{\frac{-A_{пор}}{\bar{A}}}. \qquad (23)$$

На практике данная формула не учитывает влияния электромагнитной составляющей (A,τ).

Таким образом оценить влияние Θ удается только для конкретного объекта, также чтобы получить достоверный статический результат требуется значительная частота следования помех, что происходит редко.

Функцией одного аргумента (амплитуды) можно выразить восприимчивость АВТП к импульсным помехам цепи питания, электрическим полям и электрическим разрядам.

Функцией двух аргументов (амплитудой и частотой) восприимчивость к длительным помехам из сети питания.

Таким образом, используя приведенные расчеты можно существенно снизить возникновение бракованной продукции в установках АВТП.

Список литературы

1. *Лапчик М.П.* Численные методы: Учеб. пособие для студ. вузов / М.П. Лапчик, М.И. Рагулина, Е. Н. Хеннер; Под ред. М.П. Лапчика. – 2-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – С. 9

2. *Абузяров В.Н.* «Математическое моделирование системы управления производством композиционных материалов» Научно-технический вестник Поволжья №2 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – С. 70

3. *Гурвич И.С.* Защита ЭВМ от внешних помех. – 2-е изд., перераб. и доп. – Энергоатомиздат, 1984. – С. 68

05.13.18

В.Н. Абузяров, д.т.н., И.А. Акимов

Филиал Московского технологического института «МТИ» в г. Оренбурге,
кафедра информатики и автоматизации,
«Оренбургский государственный педагогический университет», кафедра математического анализа и методики преподавания математики, Оренбург, it@mti_orenburg.ru

ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ

Статья посвящена математическому моделированию процесса управления температурой в стационарных установках. Усовершенствованию установки автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

Ключевые слова: *технологический процесс, установка АВТП, математическая модель, композиционные материалы, температура, распределенные параметры.*

Объект управления представляет собой пресс-форму, состоящую из двух частей (нижней и верхней).

В полость между частями помещается заготовка будущего изделия из композиционных материалов и подключается электронагрев по заданному режиму.

В результате происходит проникновение связующего материала в многослойные конструкции из стеклоткани. Изделия, прошедшие технологический цикл, обладают повышенными прочностными характеристиками, легче и долговечнее металлов, стойкие к воздействию коррозии.

Процесс изготовления изделий из композиционных материалов относится к процессу с распределенными параметрами, в котором распределение температуры происходит по объему нагреваемого тела и относится к замкнутым системам. [1, 2]

Тогда T=T(t,x,y,z) в любой точке пространства M=M(x,y,z)

В случае установки автоматического ведения технологического процесса будем рассматривать длинномерную заготовку.

Сделаем допущения:

– установка имеет коэффициентом теплопроводности λ_1

– связь с внешней средой осуществляется через зазор по всей площади, который не влияет на температурное поле ($\frac{d_0}{H}$ много меньше 1)

– влияние внешней среды установлено в соответствии с законом Ньютона и с коэффициентом теплообмена α_1

– лучистая энергия точечная, равномерная

– объект управления можно представить в виде стержня диаметром d, с коэффициентом теплопроводности λ

– поверхность имеет одинаковую температуру.

Установка имеет i – участков, в каждом имеется j - нагревательных элемента. Сопротивление термонагревателя будем считать равной соответствующей температуре при заданном напряжении.

Тогда

$$\vartheta_{ij} = b_{ij} \frac{u_{ij}^2(t)}{R_{ij}} , \quad (1)$$

$$u_H \geq u_{ij} \geq 0 , \quad (2)$$

где b_{ij} - коэффициент преобразования напряжения в температуру

R_{ij} - сопротивление нагревателя

u_{ij} - значение напряжения

u_H - номинальное напряжение

В этом случае сопротивление термонагревателя в зависимости от температуры будет:

$$R_{ij}(T) = (1 + \alpha_T \vartheta_{ij}) R_{ij} \quad (3)$$

Будем рассматривать лучистый теплообмен, в котором объект с температурой ϑ_{ij} излучает энергию по закону Стефана - Больцмана т.е.

$$q_{ij} = \varepsilon\sigma\vartheta_{ij}^4, \quad (4)$$

где q_{ij} - плотность потока лучистой энергии от нагревательного элемента радиуса r_0 ;

ε - излучение объекта

σ - постоянная Стефана - Больцмана.

Тогда плотность потока излучения будет

$$g_{ij} = \varepsilon\sigma \left[\frac{b_{ij} U_{ij}^2 (t)}{(1 + \alpha_T v_{ij}) R_{ij}} \right]^4 \quad (5)$$

температурное поле подчиняется закону теплопроводности:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta T \, b = 0 \quad (6)$$

где T - температура объекта.

Тогда граничные условия теплообмена можно представить в виде:

$$\left[-\lambda \frac{dT}{dn} = \gamma(Q_1 + Q_0) - g_1 + \alpha(T_c - T_s) \right] \text{ при } y = y_0 \quad (7)$$

$$\left[-\lambda \frac{dT}{dn} = \gamma(Q_2 + Q_0) - g_2 + \alpha(T_c - T_s) \right] \text{ при } y = y_{0+d} \quad (8)$$

$$\left[-\lambda \frac{dT}{dn} = 0 \right] \quad \text{при } x = x_0 \quad (9)$$

$$\left[-\lambda \frac{dT}{dn} = 0 \right] \text{ при } \text{ при } x = x_0 + l \quad (10)$$

где q_1, q_2 - плотность лучистой энергии

Q_1, Q_2 - плотность энергииQ_0 - плотность потока лучистой энергии от стенок печи;

γ - коэффициент поглощения содержимом объекта

α - коэффициент теплообмена

T_c - температура воздуха

T_s - температура наружной части установки.

Тогда при критерии

$$B_i = \frac{\alpha d}{\lambda} \leq 0{,}25 \quad (11)$$

температура поверхности установки есть функция длины и времени, тогда температура:

$$\bar{T}(x,t) = \frac{1}{d} \int_{y_0}^{y_0+d} T(x,y,t) dy \ . \quad (12)$$

Проинтегрируем и уравнение примет вид:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} - \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x^2} - \left[\frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y_0 + d} - \frac{\partial T}{dy} \Big|_{y_0} \right] \frac{1}{d} = 0 \quad (13)$$

Тепловой поток лучистой энергии от точечных нагревательных элементов будет:

$$Q_1(x,t) = \sum_{k=1}^{i} \sum_{s=1}^{j/2} \frac{hp_{i,(2s-1)}(t)}{r^3_{i,(2s-1)}(x)};$$
$$Q_2(x,t) = \sum_{k=1}^{i} \sum_{s=1}^{j/2} \frac{hp_{i,(2s)}(t)}{r^3_{i,(2s)}(x)}, \quad (14)$$

где h - расстояние до наружной части установки

r_{ij} - расстояние от нагревателя x_{ij} до точки с координатой x ,

$$r_{ij} = \sqrt{(x - x_{ij})^2 + h^2}, \quad (15)$$

где x_{ij} - координата нагревателя

лучистая энергии в соответствии законом Стефана - Больцмана будет:

$$q_1 = \varepsilon_1 \sigma T^4(x,y,t)\Big|_{y=y_0}, \quad (16)$$

$$q_2 = \varepsilon_1 \sigma T^4(x,y,t)\Big|_{y=y_0+d}, \quad (17)$$

где ε_1 – излучение материала установки.

Выразим $q_1 + q_2$ используя среднюю температуру установки:

$$q_1 + q_2 = 2\varepsilon_1 \sigma \overline{T}^4(x,t). \quad (18)$$

Предположим, что поток однороден тогда плотность в соответствии с законом Стефана - Больцмана:

$$Q_0 = \varepsilon_2 k \sigma \overline{T}_1^4(t), \quad (19)$$

где ε_2 – излучающая способность стенок печи;

k - коэффициент плотности потока излучения стенок установки к поверхности объекта.

Список литературы

1. *Усынин Ю.С.* Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов / Ю.С. Усынин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 121.

2. *Втюрин В.А.* Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Программно-технологические комплексы: Учебное пособие. СПбГЛТА, 2007. – С. 29

05.13.18

А.И. Акимов

Московский технологический институт, филиал в г. Оренбурге,
кафедра Информатики и автоматизации, Оренбург, akimoff11@mail.ru

ЗАДАЧА ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ПОЛОГО МНОГОСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

В работе представлены результаты изучения охлаждения композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП) после завершения процесса полимеризации. Для разработки систем управления производством композиционных материалов нужны знания естественного охлаждения изделия от температуры полимеризации до температуры окружающей среды, чтобы исключить опасные остаточные термонапряжения, которые выявляются в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: *композиционные материалы, термонапряжения, установки АВТП, температура полимеризации, остаточные термонапряжения.*

Высокое качество изготовления композиционных материалов достигается при соблюдении определенных технических и технологических требований. Охлаждение готового изделия от температуры полимеризации до температуры окружающей среды также проводится по заданному температурному режиму. Не соблюдение режима охлаждения (2˚-3˚ в минуту) приводит к остаточным термонапряжениям, которые очень опасны в период эксплуатации готового изделия. Основные усилия исследователей и производственников направлены на совершенствование технологических процессов изготовления композиционных материалов.

Одним из методов изготовления композиционных материалов служит полимеризация, производимая в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП). Основным элементом их является специальная пресс-форма с электроподогревом. Кроме того, для процесса полимеризации необходим режим равномерного прогрева и удержания температуры на определенном уровне с последующим плавным охлаждением.

В данной работе рассматривается задача об охлаждении полого многослойного цилиндрического тела из композиционных материалов от температуры полимеризации до температуры окружающей среды для последующего использования для разработки систем управления производством композиционных материалов в установках АВТП. Так как диаметр изделия значительно меньше длины изделия ($2R << l$), то можно считать что цилиндр бесконечной длины.

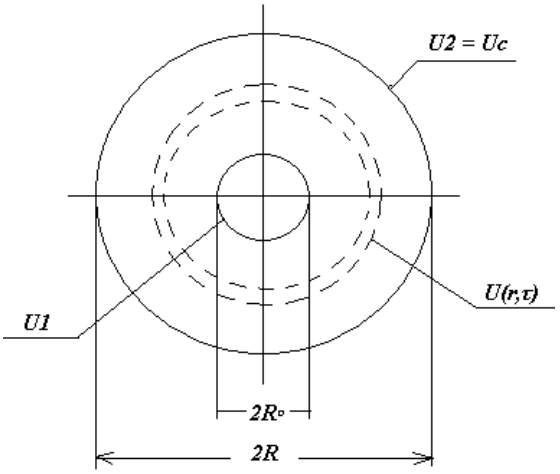


Рис.1 Перпендикулярный разрез цилиндра

После завершения полимеризации пресс-форма отключается от нагревания.

В начальный момент времени температура внешней и внутренней поверхности цилиндра одинакова и равна температуре полимеризации (U_1=160° или 165° в зависимости от материала связующего).

Охлаждение начинается от внешней стороны цилиндра. Следовательно краевые условия следующие

$$U(r,0) = f(r), \quad (1)$$
$$U(R,\tau) = U_c = const, \quad (2)$$
$$U(R_0,\tau) = U_1 = const, \quad (3)$$

где R – радиус внешней поверхности изделия, R_0 – радиус внутренней поверхности изделия. Учитывая, что температура распространяется в радиальном направлении, то искомую функцию представим в виде *U(r,τ)*, где *r* – переменный радиус цилиндра, *τ* – время.

В начальный момент (после отключения пресс – формы) на внешней поверхности цилиндра температура охлаждается до температуры окружающей среды U_c, которая поддерживается постоянно на протяжении всего процесса охлаждения.

Необходимо найти распределение температуры внутри цилиндра в любой момент времени $U(r,\tau)$, т.е решить уравнение

$$c\rho\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial\tau} = \lambda\left(\frac{\partial^2(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial U(r,\tau)}{\partial r}\right), R_0 < r < R, \tau > 0, \quad (4)$$

где c, ρ, λ – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности вещества.

Для сплошного цилиндра решение уравнения Бесселя приведено в виде [2]:

$C_r(r) = AJ_0(kr) + BY_0(kr)$

Для полого цилиндра $r = R_0 \neq 0$, следовательно нельзя полагать $B = 0$, т.к. функция Бесселя 2–го рода $Y_0(kr)$ в промежутке $R_0 < r < R$ будет конечной.

Следовательно, решение уравнения теплопроводности в полом цилиндре имеет вид

$$U(r,\tau) = [AJ_0(kr) + BY_0(kr)]e^{-ak^2\tau}, \quad (5)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – температуропроводность, $J_0(kr), Y_0(kr)$ – функции Бесселя 1-го и 2-го рода.

Для уравнения (4), предполагая $U_1 = U_c = 0$, получено упрощенное решение [3]

$$U(r,\tau) = \frac{\pi^2}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_n^2 J_0^2(k_n R)V_0(k_n r)}{J_0^2(k_n R_0) - J_0^2(k_n R)}\int_{R_0}^{R} r\,f(r)V_0(k_n r)dr \cdot e^{-ak_n^2\tau}, \quad (6)$$

где

$$V_0(k_n r) = J_0(k_n r)Y_0(k_n R_0) - J_0(k_n R_0)Y_0(k_n r),$$
$$V_1(k_n r) = J_1(k_n r)V_0(k_n R_0) - J_0(k_n R_0)Y_1(k_n r).$$

Собственные числа k_n или характеристические числа определены из уравнения

$$J_0(kR)Y_0(kR_0) - J_0(kR_0)Y_0(kR) = 0. \quad (7)$$

Рассмотрим случай, когда U_1 и U_c не равны нулю.

Будем искать решение поставленной задачи в виде

$$U(r,\tau) = \varphi(r) + \psi(r,\tau), \quad (8)$$

где функция $\varphi(r)$ должна удовлетворять уравнению

$$\frac{d^2\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r}\frac{d\varphi^2}{dr} = 0 \quad (9)$$

и граничным условиям

$$\varphi(R_0) = U_1, \varphi(R) = U_c. \quad (10)$$

Функция $\psi(r,\tau)$ удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial\psi(r,\tau)}{\partial\tau} = a\left(\frac{\partial^2\psi(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial\psi(r,\tau)}{\partial r}\right), R_0 < r < R, \tau > 0 \quad (10')$$

и граничным условиям

$$\psi(R_0,r) = 0, \psi(R,\tau) = 0\,, \tag{11}$$

и начальному условию

$$\psi(r,0) = f(r) - \varphi(r) \tag{12}$$

Очевидно, что функция $U(r,\tau)$ будет удовлетворять дифференциальному уравнению (4) и граничным условия (2) и (3), т.е.

$$U(R_0,\tau) = \varphi(R_0) + \psi(R_0,r) = U_1 + 0 = U_1;$$
$$U(R,\tau) = \varphi(R) + \psi(R,\tau) = U_c + 0 = U_c;$$
$$U(r,0) = \varphi(r) + \psi(r,0) = \varphi(r) + f(r) - \varphi(r) = f(r).$$

Для решения уравнения (9) введем новую переменную $\frac{d\varphi}{dr} = z$. Тогда уравнение примет вид

$$\frac{dz}{dr} + \frac{1}{r}z = 0 \tag{13}$$

Решение ее имеет вид

$$z = \frac{c}{r} = \frac{d\varphi}{dr} \tag{14}$$

Интегрируя еще раз, получим

$$\varphi(r) = C\ln r + D \tag{15}$$

Постоянные C и D определим из граничных условий (10):

$$C = \frac{U_c - U_1}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)},\quad D = \frac{U_1 \ln R - U_c \ln R_0}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)}. \tag{16}$$

Подставив в (15) получим

$$\varphi(r) = \frac{U_1 \ln\frac{R}{r} - U_c \ln\frac{r}{R_0}}{\ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \tag{17}$$

Функция $\varphi(r)$ представляет собой распределение температуры в полом цилиндре, в стационарном состоянии.

Решение $\psi(r,\tau)$ можно получить из (6), заменив $f(r)$ на $[f(r) - \varphi(r)]$:

$$\psi(r,\tau) = \frac{\pi^2}{2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{k_n^2 J_0^2(k_nR)V_0(k_nr)}{J_0^2(k_nR_0) - J_0^2(k_nR)}\cdot e^{-ak_n^2\tau} \times\left[\int_{R_0}^{R} r\,f(r)V_0(k_nr)dr - \int_{R_0}^{R} r\,\varphi(r)V_0(k_nr)dr\right] \tag{18}$$

Второй интеграл в (18) можно вычислить, если вместо $\varphi(r)$ подставить его значение из (17).

Используя формулы для $V_0(k_nR)$ и $V_1(k_nR)$, получим

$$\int_{R_0}^{R} r\,\varphi(r)V_0(k_nr)dr = U_c\frac{2R}{\pi k_n^2 R_0}\cdot\frac{J_0(k_nR_0)}{J_0(k_nR)} - \frac{2U_1R}{\pi k_n^2 R_0} = \frac{2[U_cJ_0(k_nR_0) - U_1J_0(k_nR)]}{\pi k_n^2 J_0(k_nR)}. \tag{19}$$

Окончательное решение получим в виде

$$U(r,\tau) = \frac{1}{\ln m}\left[U_1\ln\frac{R}{r} + U_c\ln\frac{r}{R_0}\right] +$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\frac{V_0\left(\mu_n\cdot\frac{r}{R_0}\right)e^{-\mu_n^2F_0}}{J_0^2(\mu_n)-J_0^2(\mu_n m)}\times$$

$$\times\left\{\frac{\pi^2}{2R_0^2}\mu_n^2J_0(\mu_n m)\int_{R_0}^{R} r\ f(r)V_0\left(\mu_n\frac{r}{R_0}\right)dr\right.$$

$$\left.-\pi J_0(\mu_n m)[U_cJ_0(\mu_n)-U_1J_0(m\mu_n)]\right\},$$

где $\mu_n = k_nR_0;\ m=\frac{R}{R_0};\ F_0=\frac{a\tau}{R_0^2}$.

Корни μ_n определяются из характеристического уравнения

$$J_0(\mu)Y_0(m\mu)-J_0(m\mu)Y_0(\mu)=0. \qquad (21)$$

Список литературы

1. *Акимов А.И.* Математическое моделирование теплофизических процессов в автоматических установках производства композиционных материалов. // Материалы VIII Всероссийской научно – технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» : г.Пенза, 2008 г. – с.271—274.
2. *Тюков Н.И.* Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических процессов изготовления изделий из композиционных материалов. / Н.И.Тюков, И.А. Акимов, А.И., А.И. Акимов - Уфа : РИО БашГУ, 2003. - 256с.
3. *Акимов А.И.* Применение метода изотермических поверхностей для решения задач тепломассообмена в многослойных конструкциях // Образовательная среда сегодня и завтра: Сб. научн. тр. VIII межд. научн.-практ. конф. -М.: ФГБОУ ВПО «МГИУ», 2013. -С.311-313.
4. *Акимов А.И.* Автоматизация процессов принятия решений при сопровождении технологических процессов изготовления изделий / А. И. Акимов, А. Н. Новиков // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Междунар. молодежная науч.-техн. конф. Уфа: Изд. Уфим. гос. авиац. техн. ун-та, 2001. С. 1.
5. *Козлов, В.Н., Акимов, А.И., Фатыхов, М.А.* Зависимость механических свойств композиционных материалов от температурного режима полимеризации // Инженерная физика. 2009, № 9, С. 22-27
6. *Акимов И.А.* Экспериментальное исследование тепломассообмена в установке автоматического ведения технологического процесса и сопоставление теории эксперимента / И.А.Акимов, А.И.Акимов, М.А.Фатыхов // Электронная обработка материалов. -Кишинёв: РИЦ АН Молдавии, 2003. -№5. -С. 38-41
7. *Козлов В.Н., Трофимов П.А., Акимов А.И.* Обратное преобразование Ханкеля для смешанной краевой задачи на конечном интервале // Научно-технические ведомости СПбГПУ -Журн. -2011. -№ 1. -с 71-77
8. *Козлов В.Н., Акимов А.И., Фатыхов М.А.* Зависимость механических свойств композиционных материалов от температкрного режима полимеризации // Инженерная физика. 2009. №9.
9. *Козлов, В.Н.* Обратное преобразование Ханкеля для смешанной краевой задачи на конечном интервале / В.Н. Козлов, П.А. Трофимов, А.И. Акимов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.-2011.-№ 1 (116).-С. 71-77.
10. *Акимов И.А., Акимов А.И., Каракулина Е.О.* Исследование теплопередачи на втором этапе производства композиционных материалов методом полимеризации в установках автоматического ведения технологического процесса(АВТП) // Научно-технический вестник Поволжья - Журн.-2015. - № 1. - С. 31-38.

05.22.10

В.В. Аникеев, С.В. Елесин, В.Н. Пермяков

Тюменский государственный нефтегазовый университет,
кафедра сервиса автомобилей и технологических машин,
г. Тюмень, satm_tsogu@mail.ru

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА РЕСУРС ДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

В статье рассматривается проблема влияния сезонных условий на формирование ресурса двигателей. Проанализированы подходы к решению этой задачи. Предложена методика корректирования нормативов ресурса двигателей с использованием программного пакета «RESURS».

Ключевые слова: *ресурс двигателя, нормирование, закономерности, климат, имитационная модель, сезонная вариация, расход картерных газов.*

Эксплуатация автомобилей требует больших ежегодных затрат. Необходимость ежедневного, сезонного и периодического технического обслуживания, потребность в большом количестве запасных частей, горюче-смазочных материалов, технологическое оборудование и оснастка, используемые в процессе эксплуатации и обслуживания автомобилей требуют планирования и системного подхода в эксплуатации автомобилей.

Система нормирования ресурсов автомобильных двигателей, в существующем виде, не учитывает сезонную вариацию интенсивности и условий эксплуатации, поэтому в некоторых случаях нормы не соответствуют фактической долговечности.

Учитывая сложность изучаемого процесса, описание возможно только с помощью имитационной модели. При разработке данной модели представили процесс в виде системы, структурировали ее и установили закономерности взаимодействия элементов. Разработали математические модели этих закономерностей. Для проверки адекватности моделей и оценки численных значений их параметров провели экспериментальные исследования [1,2].

В несколько этапов собирались статистические данные об интенсивности эксплуатации, о фактических температурах воздуха, оценке интенсивности изменения расхода картерных газов при различных температурах воздуха.

Объемы выборок в каждой точке плана рассчитывались исходя из относительной ошибки 5% и доверительной вероятности 95%. Обработка данных об изменении среднемесячных пробегов автомобилей показала, что эта закономерность хорошо описывается гармоническим рядом с числом гармоник от 2-х до 4-х [3]

$$l = 2{,}49 + 1{,}54 \cdot Cos\,(30 \cdot (T - 2{,}07)) + 0{,}62 \cdot Cos\,(30 \cdot (2T - 11{,}18)) + 0{,}29 \cdot Cos\,(30 \cdot (3T - 5{,}37)),$$ км/мес.,

где T – время в месяцах.

Значения доли пробега автомобилей в зимний период изменяются от 0,21 до 0,88. Причем для Севера Тюменской области этот интервал существенно меньше и составляет 0,43...0,88 [4].

Сбор данных о фактических температурах производился за несколько лет в городах Нижневартовске, Нефтеюганске, Сургуте, Урае, Тюмени. Наилучшую аппроксимацию эмпирических распределений имеет ТР-закон. В частности, для города Тюмени получен следующий закон [5,6]:

$$f(t) = \begin{cases} \dfrac{29{,}2 - t}{499} \cdot e^{-\left(\frac{29{,}2-t}{31{,}6}\right)^2}, x < 29 \\ 0, x \geq 29 \end{cases}$$

Проверка гипотезы о виде математической модели изменения среднемесячной температуры воздуха показала, что во всех случаях адекватна полигармоническая модель с числом гармоник 1...3. Например, для города Нижневартовска такая модель имеет вид.

$$t = 18{,}9 \cdot Cos(30 \cdot (T - 7{,}09)) + 0{,}63 \cdot Cos(30 \cdot (2T - 9{,}38)) - 4{,}1°\text{C}.$$

Показатель расхода картерных газов использовался для определения изменения ресурса двигателей.

В результате получены значения дифференциального показателя процесса изменения технического состояния, интенсивности изменения расхода картерных газов при различных наработках. Закономерность влияния наработки на интенсивность изменения расхода картерных газов по наработке описывается моделью:

$$q = 0{,}16 \cdot e^{0{,}0042 \cdot L}, \text{ л/(мин·тыс. км)}$$

Для проверки гипотезы, о виде математической модели, влияния температуры воздуха на интенсивность изменения расхода картерных газов и определения численных значений ее параметров, измерялся расход картерных газов при различных температурах воздуха [8].

Результаты эксперимента сгруппированы по интервалам температур воздуха и рассчитаны средние значения в каждом интервале. Полученные данные с вероятностью 0,95 адекватно описываются квадратичной моделью:

$$q = 0{,}69 + 0{,}00014 \cdot (t - 23{,}9)^2, \text{ л/(мин·тыс. км)}$$

Для оценки адекватности модели генерировались выборки ресурсов до капитального ремонта двигателей для различных условий эксплуатации. Полученные данные сравнивались с фактической долговечностью в этих условиях.

Анализ результатов имитационного эксперимента показал, что различие расчетных и фактических средних ресурсов двигателей не превышает 10 % и составляет 7,3%, что свидетельствует о адекватности данной модели. Фрагмент результатов моделирования представлен на рис. 1.

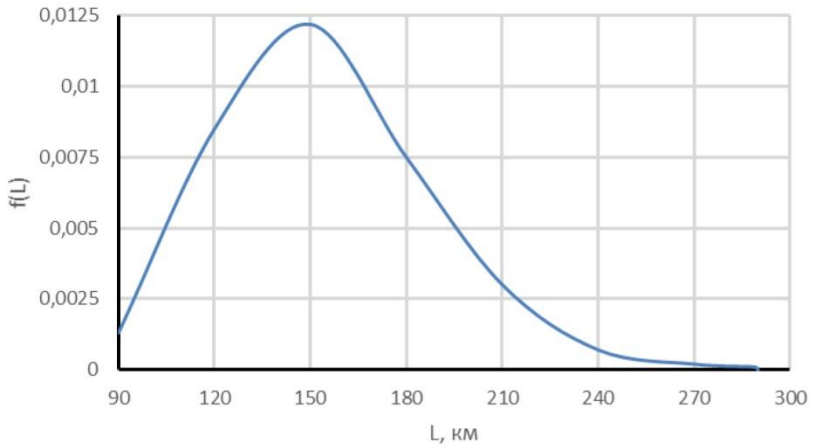


Рис. 1. Распределение реализаций наработок двигателя до предельного состояния

Для оценки степени влияния доли пробега автомобиля в зимний период на ресурс двигателей, проведен имитационный эксперимент для 34-х различных закономерностей изменения интенсивности эксплуатации по времени, с различными значениями Δ_w (в пределах от 0,0 до 1,0) (рис. 2).

Приведенная зависимость адекватно описывается линейной моделью:

$$L = 192{,}3 - 53{,}9 \cdot \Delta_з, \text{ тыс. км}$$

Таким образом, имитационный эксперимент подтвердил гипотезу о существенном влиянии $\Delta_З$ на ресурс двигателей [8] т.к. коэффициент корреляции составляет 0,97 при уровне значимости 0,99.

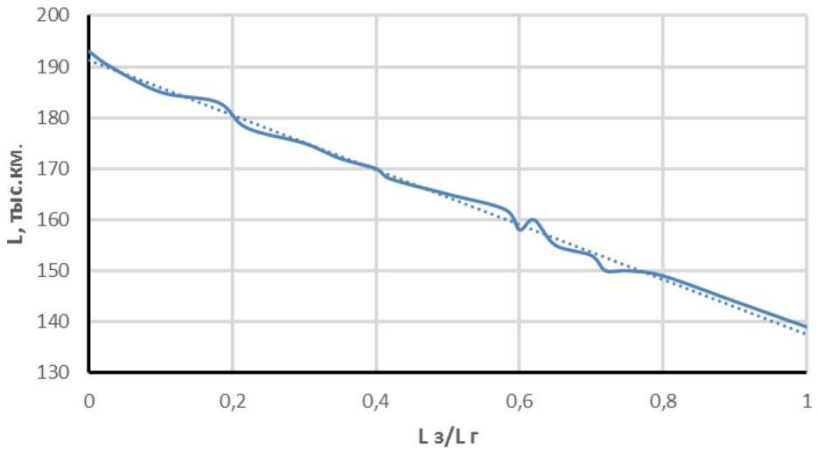


Рис. 2. Влияние доли пробега автомобиля в зимний период на ресурс двигателей

С помощью полученных результатов можно корректировать нормативы ресурса автомобильных двигателей с учетом сезонной вариации интенсивности и условий эксплуатации. Предполагается два варианта использования результатов.

Вариант 1. Использование программного пакета «RESURS», на основе которого можно рассчитать ресурс двигателей, в определенных условиях.

Вариант 2. Использование таблиц корректирующих коэффициентов, рассчитанных ранее с использованием программного пакета «RESURS».

Список литературы

1. *Захаров, Н.С.* Влияние неравномерности интенсивности эксплуатации автомобилей на время простоя исполнителей технического обслуживания [Текст] / Н.С. Захаров, Г.В. Абакумов, В.Н. Карнаухов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – № 12-2. – С. 167-173.2.

2. *Захаров, Н.С.* Использование ТР-распределения при моделировании процессов изменения качества автомобилей // Известия вузов. Нефть и газ. - 1999. - №3. - С. 105-111.

3. *Захаров, Н.С.* Факторы, влияющие на продолжительность простоя транспортно-технологических машин в текущем ремонте [Текст] / Н.С. Захаров, С.А. Савин, М.М. Иванкив, А.А. Лушников // Нефтяное хозяйство. – 2014. – №4. – С. 82-84.

4. *Кузнецов, Е.С., Болдин А.П., Власов В.М.*. Техническая эксплуатация автомобилей – М.: Наука, 2001. – 535 с.

5. *Новоселов, О.А.* Влияние сезонных условий на интенсивность эксплуатации бульдозеров при строительстве оснований для нефтегазовых объектов [Текст] / О.А. Новоселов, В.Н. Пермяков, Е.И. Макаров // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. – № 3. – С. 177-180.

6. *Новоселов, О.А.* Закономерности формирования расхода запасных частей для транспортно-технологических машин [Текст] / О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно–технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 288–290.

7. *Пермяков, В.Н.* Моделирование закономерностей распределения наработок на отказ бульдозеров при строительстве оснований для нефтегазовых объектов [Электронный ресурс] / В.Н. Пермяков, О.А. Новоселов, А.Н. Макарова // Инженерный вестник Дона. – 2014. – №2. − Режим доступа: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2435 (доступ свободный). − Загл. с экрана. – Яз. рус.

8. *Пермяков, В.Н.* Оценка надежности бульдозеров Б170М1Б.01В4 при строительстве оснований для нефтегазовых объектов [Текст] / В.Н. Пермяков, О.А. Новоселов, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 199-201.

9. *Гнеденко, Б.В., Беляев В.К., Соколов А.Д.* Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

05.13.10

А.В. Антонов, С.Г. Фомичев, Т.В. Бурнышева

Новокузнецкий институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Кемеровский государственный университет», факультет информационных технологий,
кафедра информационных систем и управления им. В.К. Буторина,
Новокузнецк, alexandr-15.12@mail.ru

ОЦЕНКА УРОВНЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРОИЗВОДСТВОМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И НЕТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОСТОЕВ

В статье проводиться анализ причин снижения объема выпускаемой продукции на предприятиях, связанных с различными остановками в технологии производства. Рассматривается коэффициент управляемости производства, который учитывает известные подходы к определению коэффициентов надежности технологий производства, используемых в расчетах объема выпускаемой продукции.

Ключевые слова: *технология производства, отказы оборудования, коэффициент управляемости производством.*

Если рассмотреть во времени показатели работы отдельного предприятия стабильно выпускающего продукцию на протяжении многих лет, то можно отметить закономерности динамики её показателей. Например, основной показатель производства – *фактический* объем выпускаемой продукции $Q_ф$ всегда ниже теоретически возможного её объема $Q_т$, достигаемого при условно непрерывной и безотказной работе предприятия. Такое положение на производстве возможно в том случае, если фактически затраченное рабочее время на производство продукции $T_р$ меньше теоретического, т.е. календарного времени исследуемого периода наблюдения, например, в течение суток $T_с$.

Следовательно, уровень управляемости производства показывают объемы продукции, произведенные за определенный период времени, причем:

– $Q_т$ – теоретический объем продукции (максимально возможный) показывает придел развития или совершенствования производства при безотказной непрерывной работе в течении суток $T_с$, которому соответствует полная управляемость производства;

– $Q_ф$ – фактический объем продукции показывает достигнутый уровень совершенствования производства за фактическое рабочее время суток $T_р$ как функции от общей продолжительности остановок $T_{ост}$, которому соответствует достигнутая управляемость производства.

Таким образом, под управлением производством будем понимать стремление к такому положению на производстве, при котором отклонения ΔQ объема выпускаемой продукции и отклонение затрат времени ΔT на её производство стремятся к нулю

$$\Delta Q = (Q_т - Q_ф) \to 0, \text{ при } Q_ф \to Q_т;$$
$$\Delta T = (T_с - T_р) \to 0, \text{ при } T_р \to T_с.$$

Следовательно, уровень достигнутой управляемости *производства* определим через отношение фактического объема производимой продукции $Q_ф$ к её теоретическому объему $Q_т$ или через отношение фактического времени работы $T_р$ к календарной продолжительности суток $T_с$. Данное отношение назовем *коэффициентом управляемости производства*,

$$K_{УП} = \frac{Q_ф}{Q_т} = \frac{T_р}{T_с}, \qquad (1)$$

где $K_{УП}$ – коэффициент управляемости производства, который учитывает известные подходы к определению коэффициентов надежности технологий производства, используемых в расчетах объема выпускаемой продукции.

Известные подходы к управлению делят производства по уровню управляемости: полностью управляемые, частично управляемые и неуправляемые [1].

В случае использования коэффициента управляемости производства любое производство можно считать *полностью управляемым*, если достигнут максимально возможный теоретический объем выпуска продукции Q_m за счет устранения всех четырех групп остановок $T_{от}$, $T_{онт}$, $T_{пт}$ и $T_{пнт}$ с использованием различных технико-технологических и организационных решений. Реализация этих решений, на настоящем уровне развития науки и техники, может оказаться экономически нецелесообразной, поэтому достигнутый уровень управляемости отражает достигнутый уровень развития технологии с возможной последующей его пошаговой корректировкой в сторону увеличения значений коэффициента управляемости [2].

Фактический объем выпускаемой продукции $Q_ф$ связаны с фактическим временем работы $T_р$ через теоретическую производительность $П_т$ выпуска продукции

$$Q_ф = П_т\, T_р, \qquad (2)$$

Основными причинами возникающих отклонений ΔQ и ΔT являются различные остановки выпуска продукции, поэтому для достижения цели управления управляющие воздействия должны быть направлены на сокращение их продолжительности $T_{ост}$ (рис. 1) [3].

В выражении (2) рабочее время, затрачиваемое на выпуск продукции $T_р$, зависит от продолжительности остановок $T_{ост}$

$$T_р = T_с - T_{ост}. \qquad (3)$$

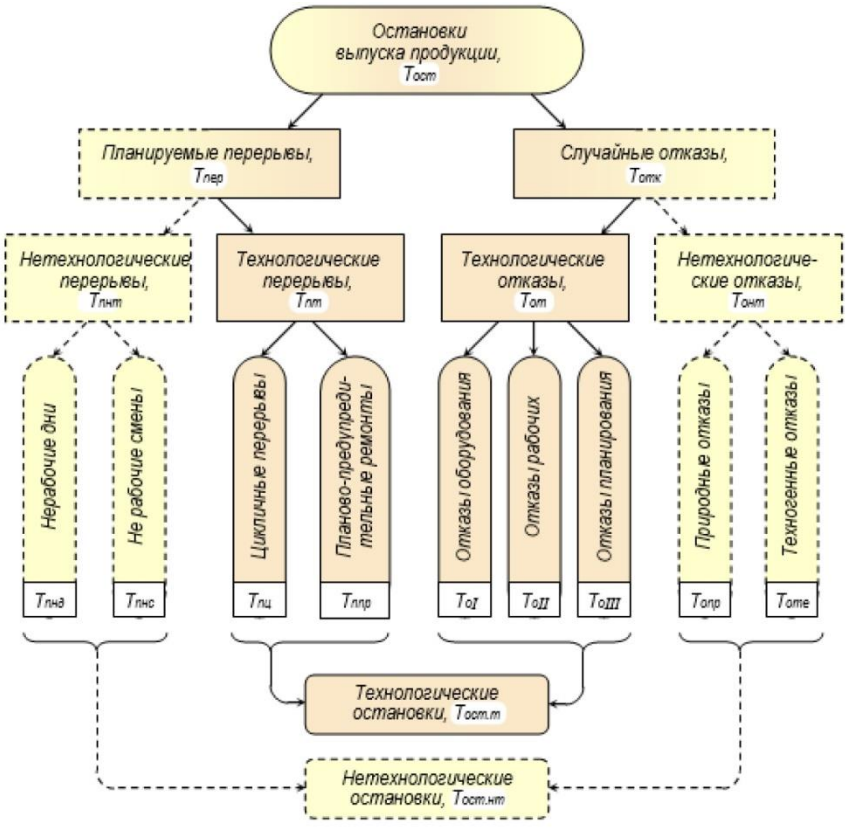


Рис. 1 – Полная структура остановок выпуска продукции на производстве

Все остановки выпуска продукции разделим на две части

$$T_{ост} = T_{пер} + T_{отк}, \qquad (4)$$

где $T_{пер}$ – продолжительность планируемых перерывов из-за цикличности технологий несовпадающей с периодами отчетности производства;

$T_{от}$ – продолжительность устранения случайных отказов, возникающих по различным причинам с прекращением выпуска продукции.

После подстановки всех остановок выпуска продукции (ВП), приведенных в структурной схеме на рисунке 2 получим:

$$T_{пер} = T_{пц} + T_{ппр} + T_{пнд} + T_{пнс}; \qquad (5)$$

$$T_{отк} = T_{оI} + T_{оII} + T_{оIII} + T_{опр} + T_{отф}, \qquad (6)$$

где $T_{пц}$ – продолжительность цикличных перерывов ВП за сутки заложенных в технологию, без которых её реализация не возможна;
$T_{ппр}$ – продолжительность планово-предупредительных ремонтов в технологии с остановкой ВП за сутки;
$T_{пнд}$ – продолжительность перерывов в виде нерабочих дней за сутки;
$T_{пнс}$ – продолжительность перерывов из-за нерабочих смен в сутках;
$T_{оI}$ – продолжительность остановок ВП из-за устранения отказов технологического оборудования за сутки;
$T_{оII}$ – продолжительность остановок ВП из-за отказов рабочих за сутки;
$T_{оIII}$ – продолжительность остановок ВП из-за отказов планирования;
$T_{опр}$ – продолжительность отказов из-за природных факторов за сутки;
$T_{отф}$ – продолжительность отказов из-за техногенных факторов за сутки.

После подстановки формул (5) и (6) в формулу (1) и группировки перерывов и отказов по их принадлежности к технологии получим следующие выражения

$$К_{УП} = 1 - \frac{T_{пц} + T_{ппр} + T_{оI} + T_{оII} + T_{оIII}}{T_c} - \frac{T_{пнд} + T_{пнс} + T_{опр} + T_{оте}}{T_c},$$

в котором слагаемые являются коэффициентами остановок выпуска продукции

$$\eta_{то} = \frac{T_{пц} + T_{ппр} + T_{оI} + T_{оII} + T_{оIII}}{T_c};$$

$$\eta_{нто} = \frac{T_{пнд} + T_{пнс} + T_{опр} + T_{оте}}{T_c},$$

где $\eta_{то}$ – *коэффициент технологических остановок* выпуска продукции;
$\eta_{нто}$ – *коэффициент нетехнологических остановок* выпуска продукции.

Полученные коэффициенты $\eta_{то}$ и $\eta_{нто}$, в отличие от часто используемого на предприятиях коэффициента готовности и остальных показателей надежности производства, показывают реальную долю снижения объема выпускаемой продукции из-за *технологических* и *нетехнологических* остановок.

Список литературы

1. Теория организации: учебник / Д. В. Олянич [и др.]. – Ростов н/Д: Феникс, 2008. – 408 с.
2. *Фомичев С.Г., Антонов А.В., Бурнышева Т.В.* Оценка эффективности применения способа управления аккумулирование массой // Научно-технический вестник Поволжья, 2014. - № 4. – С. 194-196;
3. *Фомичев С.Г., Антонов А.В., Бурнышева Т.В.* Способ управления технологией «Резервирование объекта» // Экономика и управление народным хозяйством: Сб. статей. Пенза, 2013. – С. 212-215.

05.09.10

Р.С. Ахметшин к.т.н., А.Ф. Анчугова, А.З. Гумеров к.т.н.

Набережночелнинский институт КФУ, кафедра «Электроэнергетика и электротехника»,
Набережные Челны, airat-79@mail.ru

ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ПОМЕЩЕНИИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Рассматривается помещение с двухфазной электропроводкой, уложенной по противоположным стенам помещения, к которому предъявлены повышенные требования к чистоте воздуха. Определяются условия, предъявляемые к монтажу системы электропроводки исходя из повышенных требований к чистоте воздуха.

Ключевые слова: *неэкранированные электрические проводники; частицы пыли; небалансная результирующая сила.*

Эффективность и экономичность в электрических сетях во многом зависят от симметрии величин токов и напряжений в фазных проводниках, по этой причине, эксплуатационники стремятся распределять электрическую нагрузку равномерно по фазным проводникам, это в свою очередь, приводит к тому, что в одном помещении с электрической нагрузкой прокладывают электропроводку двух или трех фаз.[1]

Ниже рассматривается случай прокладки в одном помещении с электрической нагрузкой двух фазных проводников и влияние их на чистоту воздуха в помещении.

К операционным помещениям медицинских учреждений и к помещениям чистых технологий предъявляются повышенные требования к чистоте воздуха.[2] При некорректной прокладке электрических проводников или использовании неэкранированных электрических проводников в указанных помещениях сохраняются сложности в удалении частиц пыли, находящихся во взвешенных состояниях.

Рассмотрим помещение с двухфазной системой электропроводки. Для упрощения принята симметричная электрическая нагрузка на обоих фазных проводах, а также условно принято, что электрическая проводка уложена симметрично по противоположным стенам помещения, к которой предъявлены повышенные требования к чистоте воздуха.

Электропроводка при этом может быть уложена в «кабель – канале» или под штукатуркой стен помещения изолированным проводом, возможно марок ПВ, НУПТ и других неэкранированных типов.[3,4]

На взвешенную частицу пыли, находящуюся в заданных выше условиях, воздействует электромагнитное поле с индукцией (рис.1 и 2):

$$B = \frac{\mu_0 \times I_m \times \sin \omega t}{2 \times \pi \times b},$$

где: b – расстояние от проводника с током I_A до частицы пыли, при этом расстояние между фазными проводниками равно $2 \times b$;

μ_0 - магнитная постоянная;

$i_A(t) = I_m \times \sin \omega t$ – ток в проводнике.

При этом закон изменения тока во втором проводнике, расположенном на противоположной стене равен:

$$i_B(t) = I_m \times \sin(\omega t - 120^0).$$

Силы, воздействующие на частицу пыли, соответственно равны:

$$\overline{F}_A = \overline{I}_A \times dl \times \overline{B},$$
$$\overline{F}_B = \overline{I}_B \times dl \times \overline{B},$$

где: $\overline{F}_A, \overline{F_B}$ – силы векторного произведения проводника длиной dl с током $\overline{I}$ на его индукцию $\overline{B}$ в точке расположения частицы пыли.

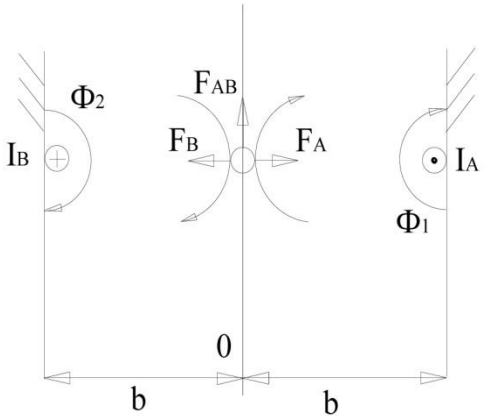


Рис. 1- Силы, воздействующие на частицу пыли

Частица пыли в любой момент времени находится под действием результирующей силы $\overline{F}_{AB}$, равной векторной сумме сил $\overline{F}_A, \overline{F_B}$ воздействующих на частицу пыли . По условиям задачи силы , с которой магнитное поле действует на элемент проводника длиной dl с током I равны:

$$\overline{F}_A = Fe^{j0};$$
$$\overline{F}_B = Fe^{-j120^0}.$$

Модули этих сил равны:

$$\left|\overline{F_A}\right| = \left|\overline{F_B}\right|.$$

Результирующая небалансная, от $\overline{F}_A$ и $\overline{F}_B$ воздействующая сила на заданную частицу пыли представляется отношением:

$$\frac{\overline{F}_A}{\overline{F}_B} = \frac{Fe^{j0}}{Fe^{-j120^0}} = 1e^{j120^0}.$$

Отношение модулей этих сил равно:

$$\frac{\left|\overline{F}_A\right|}{\left|\overline{F}_B\right|} = 1.$$

Векторная сумма сил равна:

$$\overline{F}_{AB} = \overline{F}_A + \overline{F}_B.$$

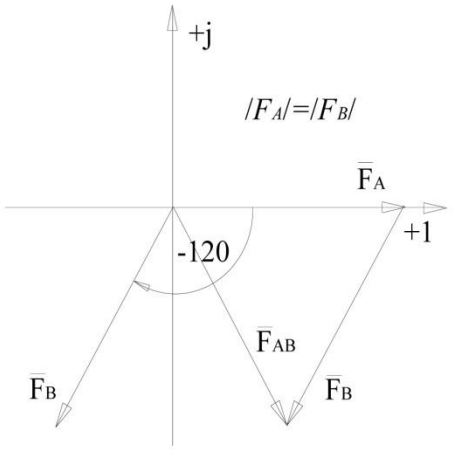


Рис. 2- Векторная сумма воздействующих сил

При симметричном расположении частицы пыли относительно проводников на любой момент времени присутствует небалансная результирующая сила, приводящая в движение в частности во вращение частицу пыли в помещении. Амплитуды токов в проводниках равны по величине по заданным условиям. Вектора индукции вокруг собственного проводника

разнонаправлены, а вектора электромагнитных сил развернуты относительно друг друга на 120^0. Плоскость кругового вращении частиц пыли перпендикулярна осям проводников с токами.

При выходе частицы пыли из оси 0 +j (1) частица пыли попадает в область доминирующего электромагнитного поля одного из проводников с током, что вызывает изменение траектории направления движения по дуге, т. е. по части окружности. Такое принудительное движение частицы пыли под действием электромагнитной силы затрудняет ее удаление с объема пространства помещения приложением дополнительной силы, например; создаваемые вентиляционными системами.

При выполнении рекомендаций к системе монтажа электропроводки должно быть безусловное выполнение требований электробезопасности в системе электроснабжения, в части схемы подключения и монтажа электропроводок в медицинских помещениях, в частности, рекомендуется выполнение требований приведенных в разделе литературы [2,3,4].

Рекомендация для контролю визуального или автоматического мониторинга чистоты воздуха в помещениях:

- в противоположных концах контролируемой комнаты на высоте не менее двух метров размещают металлические пластины черного цвета, при этом одна пластина должна быть подключена к положительному постоянному потенциалу, а другая - к отрицательному.

На практике токи в проводах, как правило, по модулю и по векторному углу не совпадают относительно введенному допущению, и частицы пыли могут быть расположены по всему объему помещения. В этих практических условиях результирующая небалансовая электрическая сила, приложенная к частице пыли будет во много превышать определенный расчетный минимум. Частица пыли находится в поле принудительного воздействия электромагнитной силы, что усложняет удаление её из помещения. Под пластинами, на высоте не более 1,8 метра предусматривается выключатели дистанционного управления подачи потенциала. При видимом появлении налета на пластинах можно судить о чистоте воздуха в помещении.

Выводы:

1.Для прокладки электропроводки в помещении использовать одну фазу;

2.При прокладке электропроводов двух и более фаз использовать экранированные проводники;

3.Принять во внимание информацию (2,3,4) рекомендованную в списке литературы.

Список литературы

1. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.

2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). М.:ГЛАВГОСЭНЕРГОНАДЗОР, 7-ое издание (утв. приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. N 204).

3. РТМ 42-2-4-80 «Операционные блоки. Правила эксплуатации, техники безопасности и производственной санитарии».

4. ГОСТ 50571.28-2006 ГОСТ Р 50571.28-2006 (МЭК 60364-7-710:2002) НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Электроустановки зданий Часть 7-710 ТРЕБОВАНИЯ К СПЕЦИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМ. Электроустановки медицинских помещений

05.22.10

А.В. Базанов к.т.н.,[1] В.И. Бауэр к.т.н.,[1] Е.С. Козин к.т.н.,[1] А.А. Мухортов[2]

[1] ФГБОУ ВО Тюменский государственный нефтегазовый университет (ТюмГНГУ), Институт транспорта, доценты кафедры «Сервис автомобилей и технологических машин», г. Тюмень, varnack0411@mail.ru

[2] АО «Транснефть - Сибирь», г. Тюмень

ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ТО И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ НЕФТЕПРОВОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В работе рассмотрены вопросы, связанные с выбором оптимального количества передвижных автомастерских для технического обслуживания и ремонта автомобилей и спецтехники, задействованных при ремонте нефтепровода. Выявлены закономерности влияния производственных факторов на потребность в автомастерских. Представлены рекомендации по определению оптимального количества передвижных автомастерских, а также по выбору места их базирования.

Ключевые слова: *передвижная авторемонтная мастерская, техническое обслуживание и ремонт, автомобили, специальная техника, ремонт нефтепровода.*

На сегодняшний день трубопроводный транспорт нуждается в систематическом обслуживании и своевременном ремонте. Многие участки магистральных нефтепроводов в Тюменской области достигли возраста в 20-30 лет и более лет. Из-за чего увеличивается объем работ по их выборочным ремонтам, в котором задействуется большое количество разнообразной спецтехники. Значительную долю операций по техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р) техники экономически целесообразно осуществлять на месте проведения работ по ремонту нефтепровода. Для этого возникает потребность в передвижных авторемонтных мастерских (ПАРМ) для ТО и Р автомобилей и спецтехники на объектах ремонта магистральных нефтепроводов (МН).

Проблема обеспечения оптимального количества ПАРМ на местах проведения выборочных ремонтов МН была затронута в работе [1]. Однако в производственных регламентах нет жестких требований по комплектации подразделений передвижными автомастерскими.

Таким образом, целью исследования является снижение затрат на ТО и Р техники путем определения оптимального количества ПАРМ.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. определение закономерностей влияния производственно-технологических факторов (ПТФ) на потребность в ПАРМ;
2. разработка рекомендаций по размещению передвижных автомастерских на элементах производственно-технической базы (ПТБ) и оценка экономической эффективности предложенных решений.

На первом этапе исследований произведен анализ ПТФ, влияющих на потребность в ПАРМ, который был рассмотрен в научных работах [2] и [3].

В результате расчетов были выявлены закономерности влияния ПТФ, таких как диаметр трубы, длина дефектного участка, расстояние от места проведения ремонта до места базирования автомастерских на потребность в ПАРМ для ТО и Р техники, участвующей при ремонте нефтепровода.

Зависимость требуемого количества ПАРМ от ПТФ при ремонте МН методом вырезки «катушки» представлена формулой(1), методом установки муфты – формулой(2), методом заварки, шлифовки – формулой(3):

$$X_{K}^{ПАРМ} = -1{,}685 + 0{,}00168 \cdot D_{ТР} + 0{,}054 \cdot L_{УЧ} \quad (1)$$

$$X_{M}^{ПАРМ} = -4{,}777 + 0{,}00168 \cdot D_{ТР} + 0{,}597 \cdot \ln(L_{ДЕФ}) \quad (2)$$

$$X_{З,Ш}^{ПАРМ} = -1{,}952 + 0{,}0015 \cdot D_{ТР} + 0{,}019 \cdot L_{ДЕФ} \quad (3)$$

где $X_{K}^{ПАРМ}, X_{M}^{ПАРМ}, X_{З,Ш}^{ПАРМ}$ – количество ПАРМ методом вырезки «катушки», методом установки муфты, методом заварки, шлифовки, соответственно, шт.; $D_{ТР}$ – диаметр трубы, мм; $L_{УЧ}$ – длина вырезаемого участка, м; $L_{ДЕФ}$ – длина дефектного участка, м.

Был определен рациональный радиус базирования ПАРМ (рис. 1). Если техника, задействованная в ремонте трубопровода, находится на расстоянии более 28 км от базы, то ПАРМ необходимо включать в выездную бригаду по ремонту МН. В противном случае допустимо нахождение ПАРМ на элементе ПТБ (табл. 1) [5].

Обеспечение запасными частями зачастую затягивает производственные процессы [6], поэтому возникает потребность в формировании соответствующей системы в привязке к рекомендациям по совершенствованию ПТБ, которая будет рассмотрена в будущем.

Если передвижная автомастерская проводит ТО и Р техники на нескольких ремонтах МН, то затраты намного меньше, чем транспортировка техники с данных ремонтов МН на элемент ПТБ.

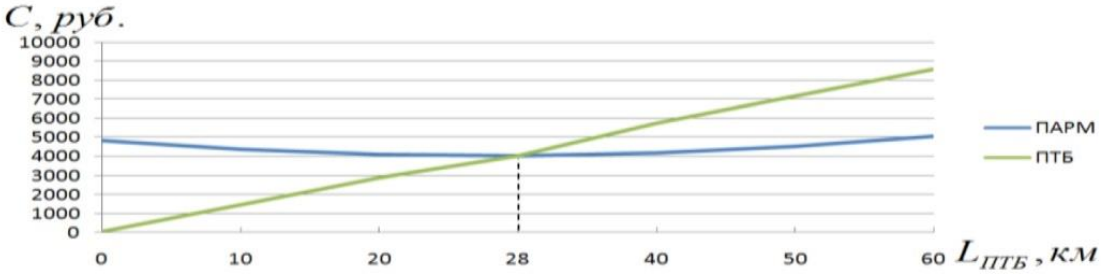


Рис. 1- Зависимость затрат от места базирования ПАРМ до места ремонта МН

Таблица 1- Рекомендации предприятиям по месту базирования ПАРМ

Вид ремонта	База	Расстояние от ПТБ до места ремонта МН, км	Dтр, мм	Lуч, мм	Количество ПАРМ, шт.
Катушка	ЛПДС	70	530 - 1220	5000 - 35000	2
	УМН	300	530 - 1220	5000 - 35000	8
Муфта	ЛПДС	70	530 - 1220	300 - 3000	1
	УМН	300	530 - 1220	300 - 3000	6
Заварка, шлифовка	ЛПДС	70	530 - 1220	32 - 80	1
	УМН	300	530 - 1220	32 -80	5

Также сформированы практические рекомендации по определению потребности в ПАРМ на каждом методе ремонта МН (табл. 2).

Таблица 2- Рекомендации предприятиям методом вырезки «катушки», методом установки муфты, методом заварки и шлифовки, соответственно

Потребность в ПАРМ		Длина дефектного участка методом вырезки «катушки», м									
		5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5	20,0	22,5	25,0	30,0
Диаметр трубы, мм	530	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	630	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	720	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
	820	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	920	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
	1020	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2
	1120	0	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	1220	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2

Потребность в ПАРМ		Длина дефектного участка методом установки муфты, мм									
		300	400	500	600	700	800	900	1000	2000	3000
Диаметр трубы, мм	530	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	630	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	720	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	820	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
	920	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2
	1020	0	1	1	1	1	1	1	1	1	2
	1120	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
	1220	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2

Потребность в ПАРМ		Длина дефектного участка методом заварки и шлифовки, мм						
		32	40	48	56	64	72	80
Диаметр трубы, мм	530	0	0	0	0	0	0	0
	630	0	0	0	0	0	0	1
	720	0	0	0	0	0	0	1
	820	0	0	0	0	0	1	1
	920	0	0	0	0	1	1	1
	1020	0	0	0	1	1	1	1
	1120	0	0	1	1	1	1	1
	1220	0	1	1	1	1	1	1

Возможный экономический эффект от использования разработанной методики представлен на рис. 2. Расчет проводился для каждого метода ремонта МН для двух вариантов организации ТО и Р автомобилей – с применением ПАРМ и с транспортировкой техники на элемент ПТБ.

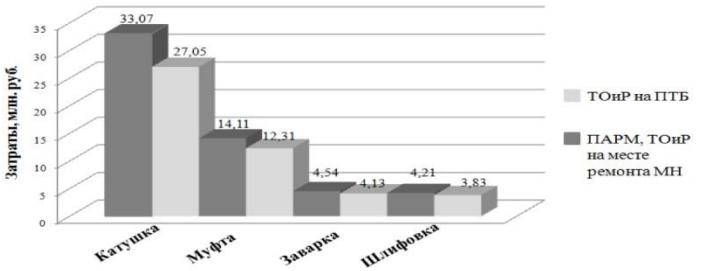


Рис. 2- Экономическая эффективность разработанных рекомендаций для различных видов ремонтов МН

Согласно формуле по определению экономической эффективности [4], экономический эффект по сравнению с существующим вариантом составляет для вырезки катушки – 18%, для установки муфты – 13%, для заварки, шлифовки – 9% в год.

В результате были получены следующие выводы:

1. Определены закономерности влияния наиболее значимых факторов – диаметр трубы, длина дефектного участка, расстояние от места ремонта трубопровода до места базирования ПАРМ на потребность в ПАРМ и представлены в виде аддитивных регрессионных моделей;
2. Разработаны рекомендации по размещению ПАРМ на элементах ПТБ: для метода вырезки «катушки» количество ПАРМ на ЛПДС – 2 шт., на УМН – 8 шт., для метода установки муфты – на ЛПДС – 1 шт., на УМН – 6 шт., для метода заварки, шлифовки – на ЛПДС 1 шт., на УМН – 5 шт;
3. Разработана методика определения оптимального количества ПАРМ и определен экономический эффект от ее применения для ремонта МН методом вырезки «катушки» – 18%, наложения композитной муфты –13%, заварки, шлифовки – 9%.
4. Расчет экономической эффективности разработанных рекомендаций проводился без учета одновременного ремонта нескольких участков МН. Что существенно повышает эффективность применения ПАРМ.

Список литературы

1. *Бауэр В.И. и др.* – Транспортно-технологический сервис процессов сооружения и ремонта линейной части магистральных трубопроводов/В. И. Бауэр. И др. – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 249 с.

2. *Козин Е.С.* Формирование рациональной структуры производственно-технической базы по ТО и ремонту спецтехники при ремонте магистральных нефтепроводов. Тюмень, автореферат дисс. на соискание ученой степени канд. тех. наук, 2013 г.

3. *Базанов А.В., Бауэр В.И., Козин Е.С., Терехов А.С.* Методика определения потребности в топливе для автотракторной техники при ремонте магистральных нефтепроводов // Автотранспортное предприятие. – 2012. - №8. – С. 49-53.

4. *Ильиных В.Д.* формирование рациональной структуры производства для проведения технического обслуживания и ремонта специальной техники предприятий нефтегазового комплекса. Тюмень, дисс. канд. тех. наук, 2001г.

5. *Мерданов Ш.М., Карнаухов Н.Н., Шефер В.В., Иванов А.А.* Эксплуатация подъёмно-транспортных, строительных и дорожных машин. Строительные машины : учебник . – Тюмень : ТюмГНГУ, 2012. – 456 с. - (2-е издание, переработанное и дополненное)

6. *Захаров Н.С., Абакумов Г.В., Кичигин С.Ю., Шевелев Е.С.* Проблемы обеспечения работоспособности автомобилей в условиях Западной Сибири // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2008. – № 1. – С. 76-77.

05.02.08

[1]Ф.Д. Байрамов, [2]Б.Ф. Байрамов, [3]А.Р. Фардеев

Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, кафедра механики и конструирования,
Набережные Челны, [1,2]bbairamov@gmail.com, [3]o.a.fardeeva@mail.ru

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ДИНАМИКИ

Разработана принципиальная схема подачи смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) с регулятором расхода жидкости. Регулирование расхода осуществляется за счёт изменения частоты вращения вала насоса. Проведено математическое моделирование динамики и получены условия устойчивости такой системы.

Ключевые слова: *автоматический регулятор расхода жидкости, система подачи смазочно-охлаждающих технологических средств, математическое моделирование динамики, устойчивость работы.*

На многих машиностроительных предприятиях для обеспечения подачи к металлорежущим станкам СОТС применяется система, упрощённая схема которой показана на рис. 1. Она состоит из электродвигателя *1*, системного центробежного насоса *2*, фильтрационного центробежного насоса *3*, чистового бака *4*, грязевого бака *5*, полосового фильтра *6*, переливного клапана *7* и двух трубопроводов. По первому трубопроводу жидкость подаётся из чистового бака к металлообрабатывающим станкам и от них в грязевой бак. По второму трубопроводу жидкость подаётся из грязевого бака в полосовой фильтр и от него в чистовой бак.

При работе системы загрязнённая жидкость стекает от металлообрабатывающих станков в грязевой бак. Фильтрационный насос *3* нагнетает жидкость из грязевого бака *5* в полосовой фильтр *6*, из которого очищенная жидкость стекает в чистовой бак *4*. Из чистового бака жидкость подаётся насосом *2* к металлообрабатывающим станкам.

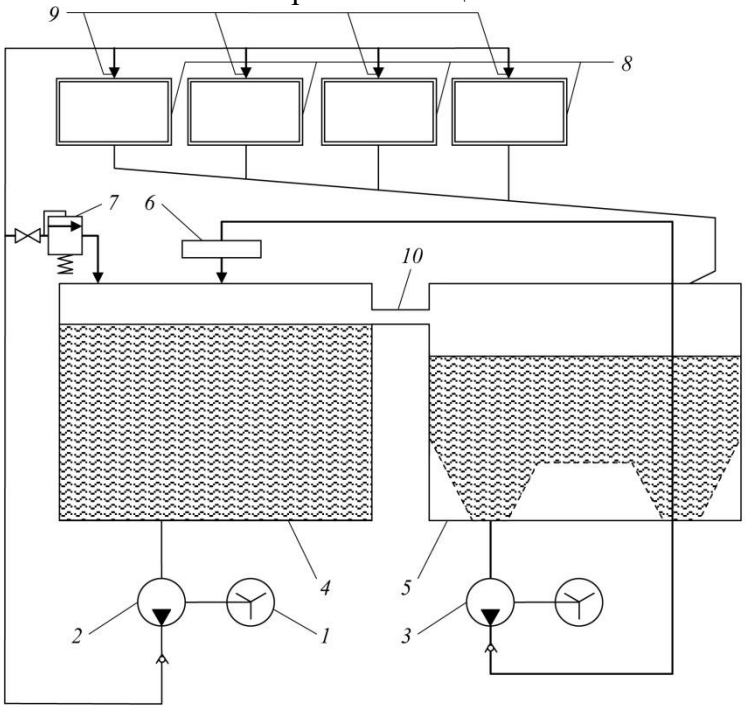


Рис. 1 – Схема системы подачи СОТС:
1 – электродвигатель; *2* – системный насос; *3* – фильтрационный насос; *4* – чистовой бак; *5* – грязевой бак; *6* – полосовой фильтр; *7* – переливной клапан; *8* – металлообрабатывающие станки; *9* – насадки; *10* – переливной канал.

Мощность фильтрационного насоса *3* превышает мощность системного насоса *2* на 10%. Поэтому жидкость постоянно сливается через переливной канал *10* из чистового бака *4* в грязевой бак *5*. Неизменное давление, с которым подаётся жидкость к станкам, обеспечивает переливной клапан *7*, который сливает часть подачи насоса *2* в чистовой бак при увеличении давления в трубопроводе выше требуемого.

Однако наиболее экономичным является регулирование расхода жидкости за счёт изменения частоты вращения вала двигателя насоса, исключающее непроизводительный слив части СОТС после насоса в бак. В связи с этим в модернизированной системе подачи СОТС переливной клапан *7* (рис. 1) предлагается заменить регулятором расхода жидкости (рис. 2), которым снабжается электродвигатель *1* системного насоса *2* (рис. 1).

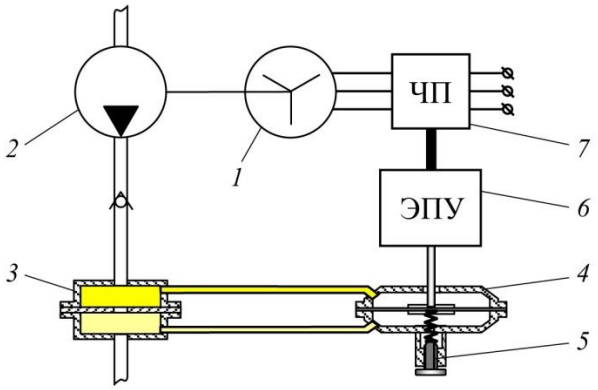


Рис. 2 – Регулятор расхода жидкости:
1 – электродвигатель; *2* – системный насос; *3* – датчик расхода;
4 – дифференциальный преобразователь давления; *5* – задатчик расхода;
6 – электромеханическое преобразующее устройство; *7* – частотный преобразователь.

Регулятор расхода работает следующим образом. Датчик расхода, представляющий собой сужающую диафрагму, измеряет расход жидкости косвенно через перепад давления. Эта разность давления преобразуется в перемещение мембраны дифференциального преобразователя. Мембрана связана штоком с электромеханическим преобразующим устройством (ЭПУ), в котором осуществляется преобразование перемещения штока мембраны в напряжение постоянного тока, пропорциональное этому перемещению. Напряжение ЭПУ управляет частотным преобразователем. Под воздействием этого управляющего напряжения частотный преобразователь, изменяя частоту напряжения питания, регулирует скорость вращения вала двигателя. Таким образом, осуществляется регулирование расхода подаваемой жидкости. Расчётное значение расхода устанавливается соответствующей затяжкой пружины задатчика *5*.

Модернизированная система, во-первых, более экономична, во-вторых, обеспечивает более равномерную подачу СОТС, что способствует повышению точности и качества обработки деталей на станках и меньшему износу инструмента.

Математическая модель. Уравнения динамики для электродвигателя, насоса, напорного трубопровода, датчика расхода с дифференциальным преобразователем, ЭПУ в отклонениях от номинального режима работы системы подачи СОТС соответственно имеют вид [1 – 3]:

$$2 \cdot \pi \cdot J \cdot \frac{d\Delta n}{dt} = \left(\frac{\partial M_Д}{\partial n} \right)_* \cdot \Delta n + \left(\frac{\partial M_Д}{\partial u} \right)_* \cdot \Delta u - \Delta M_H; \quad (1)$$

$$\Delta p_H = \Delta p_{H0} - \left(\frac{\partial p_H}{\partial G} \right)_* \cdot \Delta G + \left(\frac{\partial p_H}{\partial n} \right)_* \cdot \Delta n; \quad (2)$$

$$\frac{l_T}{F_T} \cdot \frac{d\Delta G}{dt} = \Delta p_H - \Delta p_П - k_T \cdot \Delta G; \quad (3)$$

$$\Delta s = k_1 \cdot \Delta G; \quad (4)$$

$$\Delta u = -k_2 \cdot S; \quad (5)$$

где $\Delta n = n - n_*$; $\Delta G = G - G_*$; $\Delta p_H = p_H - p_{H*}$; $\Delta p_{H0} = p_{H0} - p_{H0*}$; $\Delta s = s - s_*$; $\Delta p_П = p_П - p_{П*}$; $\Delta u = u - u_*$; $\Delta M_H = M_H - M_{H*}$; индекс $*$ указывает на значения величин в номинальном режиме; n – частота вращения вала электродвигателя; G – расход СОТС; p_{H0}, p_H – давления на входе в насос и на выходе из него; $p_П$ – давление на выходе из насадок; u – напряжение постоянного тока на выходе ЭПУ, которое является управляющим напряжением для частотного преобразователя; s – смещение мембраны дифференциального преобразователя; k_1, k_2 – положительные коэффициенты пропорциональности; J – суммарный момент инерции всех тел, кинематически связанных с валом электродвигателя; k_T – коэффициент, характеризующий сопротивление в трубопроводе; l_T, F_T – длина и площадь поперечного сечения трубопровода; $M_Д$, M_H – крутящие моменты электродвигателя и насоса.

Момент M_H имеет вид [1] $M_H = {G \cdot (p_H - p_{H0})}/{n \cdot \eta \cdot \rho}$, где η – полный КПД насоса; ρ – плотность жидкости. Разлагая функцию M_H в ряд Тейлора в окрестности номинального режима и сохраняя только члены первой степени относительно малых приращений, найдём:

$$M_H = \left(\frac{\partial M_H}{\partial n}\right)_* \cdot \Delta n + \left(\frac{\partial M_H}{\partial G}\right)_* \cdot \Delta G + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H}\right)_* \cdot (\Delta p_H - \Delta p_{H0}). \qquad (6)$$

В номинальном режиме $M_{Д_*} = M_{H_*} = const$, все переменные постоянные, $\Delta s = \Delta u = 0$ и регулятор расхода жидкости находится в нейтральном положении.

Далее будем предполагать $\Delta p_{H0} = \Delta p_П = 0$, т.е. возмущениями давлений на входе в насос и на выходе из насадок пренебрегаем.

Уравнения (1) – (6) описывают динамику системы подачи СОТС с регулятором расхода. Исключая переменные Δp_H, Δu, s, эти уравнения запишем в относительных отклонениях в безразмерной форме:

$$T_Д \cdot \frac{dn}{dt} = -a_1 \cdot n - a_2 \cdot g;$$
$$T_T \cdot \frac{dg}{dt} = a_3 \cdot n - a_4 \cdot g, \qquad (7)$$

где $n = \frac{\Delta n}{n_*}$; $g = \frac{\Delta G}{G_*}$; $T_T = \frac{l_T \cdot G_*}{F_T \cdot p_{H*}}$; $T_Д = \frac{2 \cdot \pi \cdot J \cdot n_*}{M_{Д*}}$;

$$a_1 = \left[-\left(\frac{\partial M_Д}{\partial n}\right)_* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial n}\right)_* + \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H}\right)_* \cdot \left(\frac{\partial p_H}{\partial n}\right)_* \right] \cdot \frac{n_*}{M_{Д*}};$$

$$a_2 = \left[\left(\frac{\partial M_H}{\partial G}\right)_* - \left(\frac{\partial M_H}{\partial p_H}\right)_* \cdot \left(\frac{\partial p_H}{\partial G}\right)_* \right] \cdot \frac{G_*}{M_{Д*}} + \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot u_*}{n_*} \cdot \left(\frac{\partial M_Д}{\partial u}\right)_*; \quad a_3 = \left(\frac{\partial p_H}{\partial n}\right)_* \cdot \frac{n_*}{p_{H*}};$$

$$a_4 = \left(\frac{\partial p_H}{\partial G}\right)_* \cdot \frac{G_*}{p_{H*}} + k_T \cdot \frac{G_*}{p_{H*}}.$$

Здесь $T_Д$, T_T – постоянные времени электродвигателя и трубопровода, остальные величины – безразмерные коэффициенты усиления.

Устойчивость. Характеристическое уравнение системы (7)

$$\lambda^2 + \frac{a_4 \cdot T_Д - a_1 \cdot T_T}{T_Д \cdot T_T} \cdot \lambda + \frac{a_2 \cdot a_3 - a_1 \cdot a_4}{T_Д \cdot T_T} = 0$$

будет иметь корни с отрицательными вещественными частями при выполнении неравенств

$$a_4 \cdot T_Д > a_1 \cdot T_T; \quad a_2 \cdot a_3 > a_1 \cdot a_4, \tag{8}$$

которые согласно критерию Рауса – Гурвица, являются необходимыми и достаточными условиями асимптотической устойчивости системы (7), т.е. номинального режима работы системы подачи СОТС с регулятором расхода жидкости.

Выводы

1. Разработана принципиальная схема подачи СОТС с автоматическим регулированием расхода жидкости за счёт изменения частоты вращения электродвигателя насоса.
2. Условия (8) могут быть использованы при проектировании системы подачи СОТС для рационального выбора значений параметров, обеспечивающих устойчивые режимы работы.

Список литературы

1. *Лепешкин А.В., Михайлин А.А., Шейпак А.А.* Гидравлика и гидропривод. Ч. 2. Гидравлические машины и гидропневмопривод. – М.: МГИУ, 2005. – 352 с.
2. *Иващенко Н.Н.* Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
3. *Байрамов Ф.Д., Байрамов Б.Ф., Мардамшин И.Г.* Математическое моделирование и устойчивость гидравлической системы с ветронасосным агрегатом // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2009. – № 4. – С. 103-106.

05.20.01

А.С. Баранов к.т.н.

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», кафедра «Автомобили и автомобильное хозяйство», baranowas@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ТЕЛА

Проводится анализ конструкции стенда для проведения лабораторных испытаний рабочих органов сельхозмашин. Предлагается конструкция стенда, применение которой снижает трудоемкость определения силы сопротивления среды движению тела и расширяет условия экспериментальных исследований. Для получения достоверных экспериментальных данных приведен расчет, даны рекомендации выбора места крепления рабочего органа на момент начала проведения испытаний.

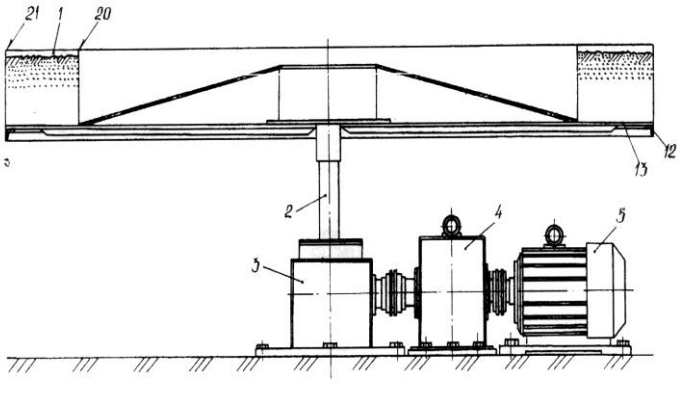
Ключевые слова: *лабораторные испытания, конструкция стенда, сила сопротивления среды движению тела.*

Все способы определения сопротивления почвы обработке можно разделить на три группы: стендовые испытания, испытания в полевых условиях и расчетные методы.

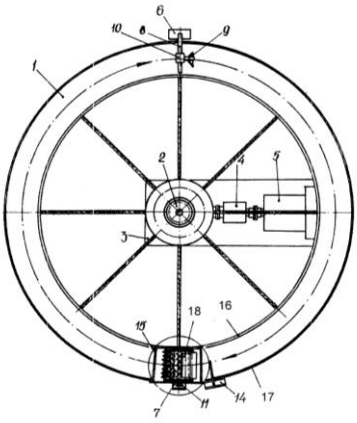
Недостатками испытаний в полевых условиях являются трудность точного определения параметров обработки почвы (глубины и углов установки почвообрабатывающего орудия), и как следствие, низкая точность измерений по причине колебаний буксирующей машины, а также зависимость результатов испытаний от метеорологических условий. Основной недостаток расчетных методов – сложность точного определения рабочей поверхности рабочего органа сельхозмашины. Таким образом, очевиден вывод о целесообразности использования стендовых испытаний для определения сопротивления почвообрабатывающих орудий.

Один из самых распространенных способов стендовых испытаний – проведение испытаний в почвенном канале. Существует ряд устройств, позволяющих проводить испытания в лабораторных условиях. Примером такого стенда может служить устройство для определения сопротивления и степени износа почвообрабатывающих рабочих органов (рисунок 1).

Данное устройство содержит вращающийся вертикальный вал с кольцевым желобом, заполненным почвой, и кронштейн для крепления испытуемого тела – почвообрабатывающего рабочего органа. Также устройство содержит блок приспособлений для обработки почвы и приспособление для уплотнения и перемещения почвы. Через тензометрическое устройство кронштейн соединен с испытуемым телом, которое перемещается в среде за счет вращения вертикального вала [1].



а) вид сбоку



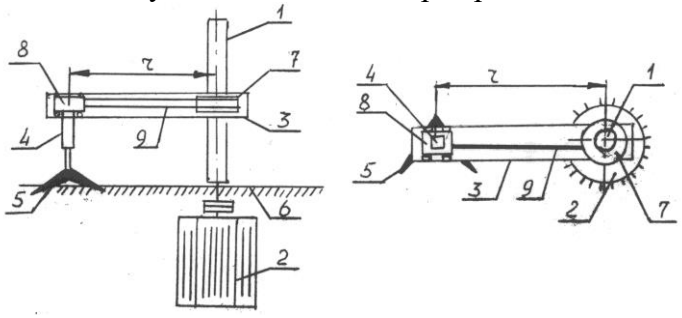
б) вид сверху

1 – кольцевой почвенный канал, 2 – вертикальный вал привода, 3 – угловой конический редуктор, 4 – многоступенчатый цилиндрический редуктор, 5 – электродвигатель, 6, 7 – стойки, 8 – горизонтальная радиально-направленная балка, 9- испытуемый рабочий орган, 10 – тензометрическое звено, 11 – опорный ролик, 12 – кольцевая шина, 13 – днище почвенного канала, 14 – Г-образный кронштейн, 15-опорная тележка, 16, 17 – направляющие почвенного канала, 18 – горизонтальная ось блока.

Рис. 1- Устройство для определения сопротивления и степени износа почвообрабатывающих рабочих органов

Основными недостатками рассмотренного устройства являются повышенная трудоемкость измерений, так как для получения конечных результатов необходима соответствующая подготовка почвы посредством приспособлений, а также узкие возможности осуществления экспериментальных исследований, связанные с характером среды.

Для ликвидации недостатков конструкции предлагается конструкция стенда для определения сопротивления среды движению тела, представленная на рисунках 2(а), 2(б) [2]. Отличительной особенностью данной конструкции является то, что содержащийся в стенде кронштейн, установленный радиально относительно центра вращения вала, жестко закреплен на вращающемся вертикальном валу, и стенд может быть снабжен устройством, изменяющим расстояние от испытуемого тела до центра вращения вала.



а) вид сбоку б) вид сверху

1-вертикальный вал; 2 – двигатель; 3 – кронштейн; 4-тензометрическое устройство; 5 – испытуемое тело; 6- исследуемая среда; 7- шкив; 8-блок; 9- трос

Рис. 2- Стенд для определения сопротивления среды движению тела.

Устройство, изменяющее расстояние от испытуемого тела до центра вращения вала, может быть выполнено в виде шкива, концентрично установленного и жестко закрепленного на валу. Соединение шкива с блоком, связанным с испытуемым телом, выполнено гибкой связью. Блок установлен на кронштейне с возможностью перемещения вдоль него.

Стенд для определения сопротивления среды движению тела содержит вертикальный вал 1, приводимый во вращение двигателем 2. Кронштейн 3 установлен радиально относительно центра вращения вала 1 и жестко закреплен на этом валу. Кронштейн 3 связан посредством тензометрического устройства 4, выполненного в виде стойки с тензодатчиками, с

испытуемым телом 5. Испытуемое тело 5 помещается в твердую, жидкую или газообразную среду 6 с возможностью перемещения относительно нее за счет вращения вала 1 относительно центра.

Также стенд может быть снабжен устройством, изменяющим расстояние от испытуемого тела до центра вращения вала. Это устройство может быть выполнено в виде шкива 7. Шкив концентрично установлен и жестко закреплен на вертикальном валу 1. Блок 8 соединен гибкой связью, например, тросом 9, со шкивом 7 и обладает возможностью перемещения вдоль кронштейна 3 посредством направляющих (на рисунке не показаны), установленных, например, внутри кронштейна 3. Также на рисунках дополнительно показано изменяющееся расстояние *r* от центра вращения вертикального вала 1 до испытуемого тела 5.

Работа стенда осуществляется следующим образом. Двигатель 3 начинает вращать вертикальный вал 1 вместе с закрепленным на нем кронштейном 3. Это движение передается испытуемому телу 5, сообщая ему круговое движение в твердой, жидкой или газообразной среде 6, на расстоянии r от центра вращения вала 1.

При использовании в стенде устройства, изменяющего расстояние от испытуемого тела до центра вращения вала, трос 9 наматывается на шкив 7, притягивая блок 8 по направляющим к центру вращения вала 1, вследствие чего расстояние *r* от центра вращения вала 1 до испытуемого тела 5 постепенно уменьшается, и испытуемое тело 5 движется по спирали каждый раз в невозмущенной среде.

Чтобы определить расстояние *r*, необходимое для получения достоверных экспериментальных данных, требуется сделать допущение о том, что условием получения достоверных данных является относительная разность скоростей движения крайних точек испытуемого рабочего органа, не превышающая 5%. Это условие можно записать следующим образом:

$$(V_1 - V_2) / V_2 \le 0.05,$$

где V_1, V_2 – соответственно скорости крайней внешней и крайней внутренней точки испытуемого рабочего органа;

$$V_1 = \acute{\omega} \cdot r_1 ; \quad V_2 = \acute{\omega} \cdot r_2,$$

где $\acute{\omega}$ – угловая скорость движения испытуемого рабочего органа,

r_1 и r_2 – расстояния от оси вращения соответственно до внешней и внутренней точек испытуемого рабочего органа.

Следовательно,

$$(r_1 - r_2) / r_2 \le 0.05; \quad r_1 = r + b/2; \quad r_2 = r - b/2,$$

где *r* - расстояние от оси вращения стенда до точки крепления рабочего органа;

b - ширина захвата рабочего органа.

$$[(r + b/2 - (r - b/2)] / (r - b/2) \le 0.05.$$

Отсюда следует, что

$$r \ge 20.5 \cdot b.$$

Расстояние от оси вращения стенда до места крепления рабочего органа на момент начала проведения испытаний должно составлять не менее 20.5 величин ширины захвата испытуемого рабочего органа.

Таким образом, использование предлагаемой конструкции стенда по сравнению с рассмотренными выше обеспечивает снижение трудоемкости определения силы сопротивления среды движению испытуемого тела, а также расширение условий экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Пат. 2105280 Россия, МПК[6] G 01 M 19/00, A 01 D 17/00. Устройство для определения сопротивления и степени износа почвообрабатывающих рабочих органов/ Салдаев А.М. Опубл. 20.02.98. Бюл. №5 (ч.II). Приоритет 09.11.95, № 95119014/13.

2. Пат. 2187087 Россия, МПК[7] G 01 M 19/00. Стенд для определения сопротивления среды движению тела/ Павлюк А.С., Баранов А.С., Бизяев С.Н., Павлюк С.А. Опубл. 10.08.2002, Бюл. №22 (ч.III). Приоритет 01.09.2000, № 2000122814/13.

05.02.07

Л.В. Беляев, к.т.н., И.В. Волкова, А.В. Жданов, к.т.н.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, blv_vlsu@mail.ru

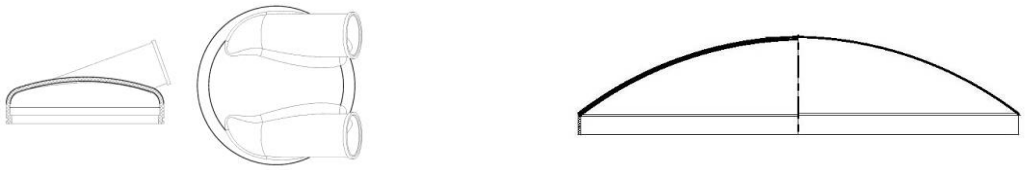
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ИСКУССТВЕННЫХ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА ИЗ ГЕМОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью данной статьи является описание материалов, применяемых для изготовления искусственных желудочков сердца российских систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца пульсирующего типа, а так же обзор и критический анализ возможных технологий для их изготовления.

Ключевые слова: *искусственный желудочек сердца, технологии изготовления, гемосовметимые материалы.*

В настоящее время применение аппаратов вспомогательного кровообращения (ВК) и искусственного сердца (ИС) является одним из наиболее радикальных методов лечения сердечной недостаточности. Для этих целей применяются как экстракорпоральные, так и имплантируемые системы механической поддержки кровообращения, построенные как на базе мехатронных модулей (ММ) так и имеющих стационарный или мобильный пневматический привод. Элементом систем ВК и ИС пульсирующего типа, в обеих указанных системах, непосредственно отвечающим за функциональные показатели, является искусственный желудочек сердца (ИЖС). Конструктивные особенности ИЖС и медико-технические требования [9,10] по гемо-, биосовместимости накладывают ряд требований на материалы и технологии применяемые при изготовлении корпуса ИЖС, мембраны или кровяного мешка.

В настоящее время наибольшее распространение для изготовления корпусов и мембран ИЖС (рис. 1) получили полимерные био- гемосовместимые материалы. Для наиболее распространенных импортных систем ВК и ИС применяются следующие материалы [11]: Carbothanet® PC3570A, Chronoflext® AR, Corethanet® 80A, и Corethanet® 55D, Tecoflext® EG80A , Tecothanet® TT-1074A.



а) б)

Рис. 1 – Изображения компонентов ИЖС: а – корпус; б – мембрана

Для изготовления отечественных пульсирующих систем ВК и ИС до 1991 года выпускалось три материала на основе полиуретана, используемых для изготовления систем ВК и ИС [10]: «Витур» (аналог Pellethane®), НПО «Полимерсинтез» Владимир; «Гемотан» (аналог Biomer®), опытное производство НИИ медицинских полимеров, Москва; «Силурем» или «СКУ-Мед 1» (аналог Cardiothane®), опытный завод синтетического каучука, Санкт-Петербург. Все указанные материалы обладают сходными физико-механическими свойствами, которые позволяют им обеспечить длительный срок работы элементов ИЖС в составе систем ВК и ИС. Прочность на разрыв изменяется в пределах 58,8 ÷ 73,5 МПа, относительное удлинение – 450 ÷ 700 %, остаточное удлинение менее 12 %. В настоящее время продолжается производство лишь одного из них – «Витура», выпускаемого ООО НПФ «ВИТУР» [12]. Номенклатура марок материала типа «Витур» представлена двумя большими группами материалов на основе простого и сложного полиэфиров и включает десять наименований [13]. Для изготовления корпуса и мембраны ИЖС были выбраны материалы марок «Витур» ТМ-0333-95 и «Витур» Т-1413-85, имеющие положительное

токсикологическое заключение, выданное ФГБУ "ВНИИИМТ" Росздравнадзора (г. Москва). Основные физико-механические свойства указанных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Номенклатура марок материала типа «Витур» и его основные физико-механические свойства

Показатель / Марка материала	Минимальная условная прочность при растяжении, МПа	Минимальное относительное удлинение при разрыве, %	Твердость по Шору А., усл. ед.	Минимальное сопротивление раздиру, Н/мм	Минимальное условное напряжение при 100% удлинении, МПа
ТМ-0333-95 (корпус ИЖС)	30	380	95	120	5
Т-1413-85 (мембрана ИЖС)	30	400	85	90	7

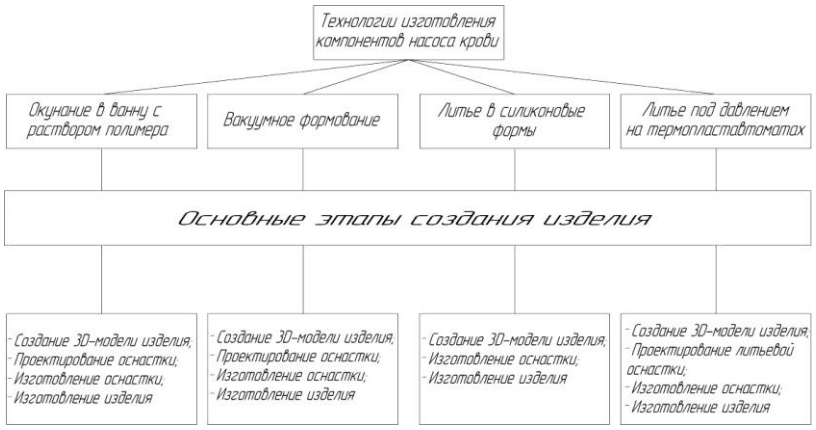
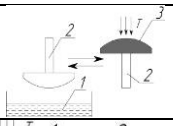
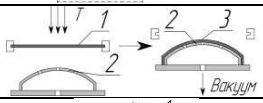
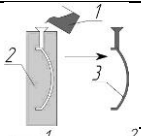
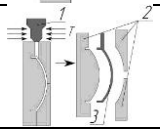


Рис. 2 – Технологии, применяемые для изготовления компонентов ИЖС и основные технологические этапы создания изделия

Для получения из исходного сырья, готовых к последующей сборке, корпуса и мембраны ИЖС, могут использоваться технологии (способы) представленные на рис. 2.

В табл. 2 приведены результаты сравнения технологий, применяемых для изготовления компонентов ИЖС по таким важным параметрам как производительность, качество изготовления и возможность внесения изменений в геометрию оснастки.

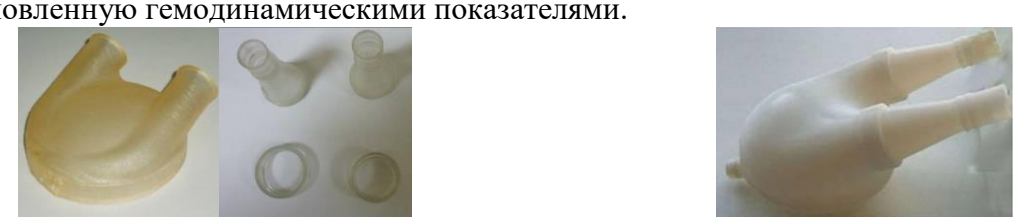
Таблица 2 - Результаты сравнения технологий изготовления

Метод изготовления	Принципиальная Схема	Производительность	Качество изготовления	Возможность изменения геометрии оснастки
Окунание в ванну с раствором полимера		минимальная	среднее	средняя
Вакуумное формование изделий		высокая	среднее	средняя
Литье в силиконовые формы		среднее	среднее	высокая
Литье под давлением на термоплставтоматах		высокая	высокое	минимальная

На принципиальных схемах в таблице обозначено: 1 – материал; 2 – оснастка; 3 – готовое изделие.

Новой, альтернативной технологией изготовления корпуса и мембраны ИЖС, является группа технологий, основанная на использовании аддитивных технологий (Additive technology) или технологий быстрого прототипирования (Rapid Prototyping), которые позволяют получить как отдельные компоненты ИЖС, так и сборку изделия в целом (рис. 3).

На основании рассмотренных особенностей технологий изготовления авторами предлагается использовать технологию окунания в ванну с раствором полимера для изготовления мембраны ИЖС, как тонкостенной детали, и технологию литья под давлением на термоплставтоматах – для изготовления корпуса ИЖС, имеющего сложную геометрию, обусловленную гемодинамическими показателями.



а) б)

Рис. 3 – Компоненты ИЖС, изготовленные с применением технологий быстрого прототипирования: а – корпус ИЖС и коннекторы; б – ИЖС в сборе

Начальным и основным этапом создания изделий является этап создания корректной трехмерной математической модели будущего изделия. Этап технологической подготовки производства корпуса ИЖС включал в себя проектирование технологической оснастки – пресс-фомы и анализ проливаемости для оценки качества будущей отливки, а так же определения оптимальных параметров пресс-формы. Для изготовления корпуса ИЖС, была разработана его 3-D модель, на основании которой выполнено проектирование технологической оснастки – пресс-фомы. После изготовления корпуса и мембраны ИЖС произведена их сборка (рис. 5).

а) б) в) г)

Рис. 5 – Компоненты ИЖС: а – 3-D модель мембраны ИЖС; б – пуансон для окунания; в – мембрана ИЖС из материала «Витур» Т-1413-85; г – корпус и мембрана ИЖС в сборе

Полученные указанными технологиями гемосовместимые корпус и мембрана ИЖС прошли успешные лабораторно-стендовые испытания в составе систем ВК и ИС пульсирующего типа с пневматическим и электромеханическим приводом ММ и могут быть рекомендованы для применения в составе имплантируемых и экстракорпоральных систем [17].

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-5860.2015.8.

Список литературы

1. Медико-технические требования на создание электромеханической имплантируемой системы обхода левого желудочка сердца. - М.: НИИТиИО, 2001. - 10 с.

2. *Шумаков В.И.* Искусственное сердце и вспомогательное кровообращение / В.И. Шумаков, В.Е. Толпекин, Д.В. Шумаков. – М.: Янус-К, 2003. – 376 с.

3. *Yang, M., Zhang, Z., Hahn, C., Laroche, G., King, M. W., and Guidoin, R.,* 1999, “Totally Implantable Artificial Hearts and Left Ventricular Assist Devices: Selecting Impermeable Polycarbonate Urethane to Manufacture Ventricles”, Journal of Biomedical Materials Research 48(1), pp. 13 –23.

4. ООО НПФ «ВИТУР» [Электронный ресурс] URL: http://www.vitur33.ru/. (дата обращения: 05.10.2015).

5. Синтез искусственных желудочков сердца с заданными гемодинамическими характеристиками / Владим. гос. ун-т. [под ред. В.В. Морозова]. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. – 180 с.

6. *Belyaev, L.V., Morozov, V.V., Zhdanov, A.V.,* 2013, “The experimental researches of pneumatic system of auxiliary blood circulation”, IJAO, 36(8) p. 544.

05.09.12

Н.Н. Беспалов к.т.н., С.С. Капитонов к.т.н., М.В. Ильин к.т.н., А.В. Евишев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, кафедра Электроники и наноэлектроники, Саранск, ka-mgu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ПРОТИВО-ЭДС В НАГРУЗКЕ

В статье рассматриваются особенности работы однофазного однополупериодного тиристорного преобразователя в электроприводе постоянного тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС. Представлены результаты моделирования работы преобразователя при различных значениях противо-ЭДС в нагрузке. Получена зависимость величины ёмкости снабберного конденсатора, необходимого для ограничения амплитуды коммутационных перенапряжений, от значений противо-ЭДС.

Ключевые слова: *электропривод постоянного тока, тиристорный преобразователь, противо-ЭДС, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.*

В современной силовой электронике электропривод является одним из самых распространённых устройств. В состав электропривода входит силовой преобразователь электроэнергии, предназначенный для управления двигателем [1]. Достаточно часто в системах управления электроприводов постоянного и переменного тока используются тиристорные преобразователи (ТП) переменного напряжения в постоянное. Регулируемое постоянное напряжение используется для питания якорных цепей и обмоток возбуждения двигателей постоянного тока. Подобная нагрузка на эквивалентной схеме замещения обычно представлена в виде последовательного соединения резистора с сопротивлением, равным суммарному активному сопротивлению якорной цепи, суммарной индуктивности, а также противо-ЭДС с полярностью, противоположной полярности напряжения источника питания [2]. Представляет интерес исследовать режимы работы ТП при различных значениях противо-ЭДС в нагрузке.

Рассмотрим процессы, протекающие в ТП при работе на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС, на примере простейшей однофазной однополупериодной схемы [2], представленной на рис. 1.

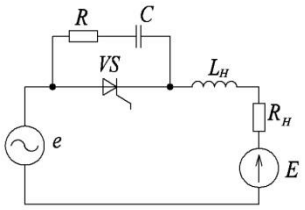
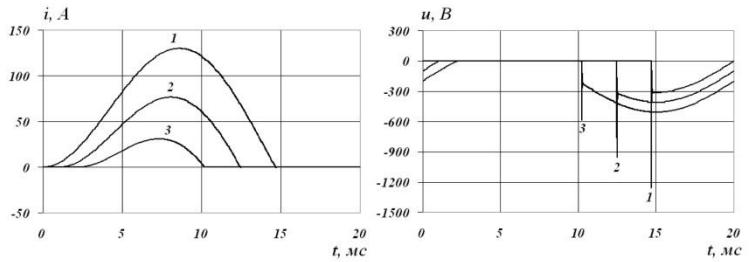


Рис. 1 – Однофазная однополупериодная схема ТП

На рис. 1 введены следующие обозначения: *e* — источник питающего напряжения; *VS* — исследуемый тиристор; *R* и *C* – резистор и конденсатор снабберной цепи; R_H — сопротивление нагрузки; L_H – сумма индуктивностей контура коммутации; *E* — противо-ЭДС.

Для исследования схемы, изображённой на рис. 1, в качестве источника *e* выбран источник синусоидального напряжения, действующее значение которого равно 220 В, частотой 50 Гц. Сопротивление нагрузки R_H = 1 Ом, сумма индуктивностей контура коммутации L_H = 10 мГн [2]. При моделировании использовалась модель силового тиристора Т161-200 [3, 4], разработанная в среде Multisim. Величина предельного тока данного тиристора составляет I_{TAVm} = 200 А, повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии и обратного напряжения $U_{D(R)RM}$ = 600 В [5, 6], что в 2 раза превышает величину амплитуды напряжения источника *e*. В среде Multisim проведено моделирование схемы без учёта влияния снабберной *RC*-цепи при значениях противо-ЭДС: 1 — *E* = 1 В; 2 — *E* = 100 В; 3 — *E* = 200 В. Результаты моделирования представлены на рис. 2.



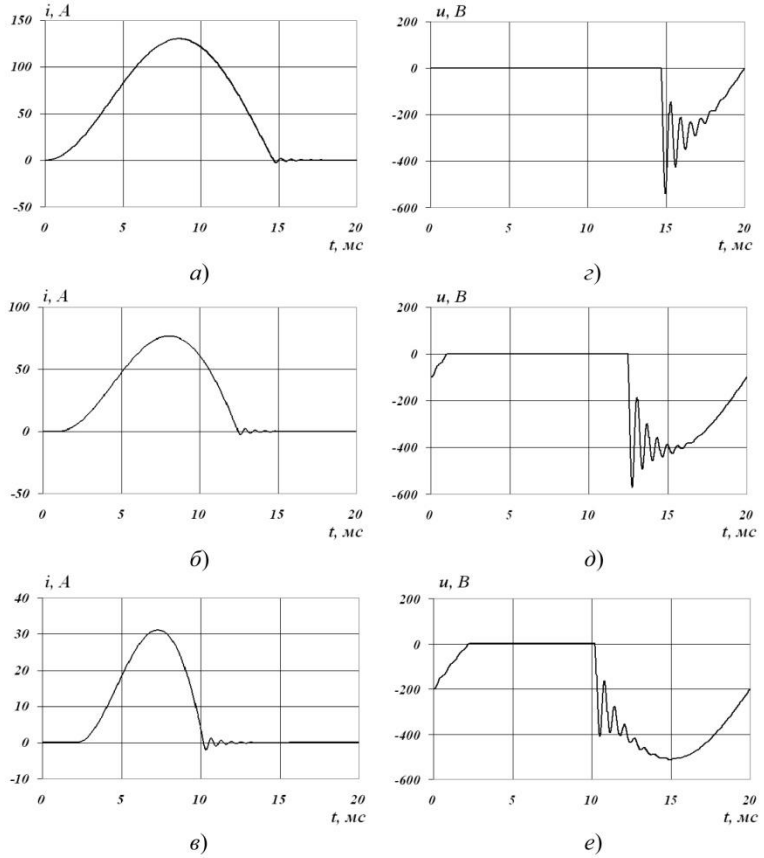
а) *б*)

Рис. 2 – Токи, протекающие через тиристор *VS* (*а*) и напряжения на нём (*б*) при следующих значениях противо-ЭДС: 1 — 1 В; 2 — 100 В; 3 — 200 В

Из рис. 2*а* видно, что при величине противо-ЭДС E = 1 В длительность импульса тока, протекающего через тиристор, существенно превышает длительность положительной полуволны питающего напряжения, равную 10 мс, вследствие наличия в контуре коммутации индуктивности L_H. С увеличением значения противо-ЭДС до E = 200 В амплитуда и длительность тока значительно уменьшаются до 30 А и 10,5 мс, соответственно.

Из рис. 2*б* следует вывод о том, что с увеличением значения противо-ЭДС от 200 В величина амплитуды коммутационного перенапряжения уменьшается от 1300 В до 610 В. Однако, величина амплитуды перенапряжения во всех случаях превышает значение напряжения класса тиристора.

Для защиты тиристора от коммутационного перенапряжения используются защитные снабберные *RC*-цепи. В соответствии со стандартными методиками расчёта величин параметров снабберных цепей для моделирования выбраны значения сопротивления снабберного резистора R = 20 Ом и ёмкости снабберного конденсатора C = 1 мкФ [7]. Исследованы процессы, протекающие в схеме (рис. 1), с учётом влияния снабберной *RC*-цепи при различных значениях противо-ЭДС. Результаты моделирования изображены на рис. 3.



а) *г*)

б) *д*)

в) *е*)

Рис. 3 – Токи, протекающие через тиристор *VS* (*а*, *б*, *в*) и напряжения на нём (*г*, *д*, *е*) при следующих значениях противо-ЭДС: 1 — 1 В (*а*, *г*); 2 — 100 В (*б*, *д*); 3 — 200 В (*в*, *е*)

Рис.3 показывает, что рекомендуемых значений параметров снабберных цепей достаточно для того, чтобы ограничить величину амплитуды коммутационного перенапряжения для всех рассмотренных случаев. Однако, для значения противо-ЭДС E=200В величина ёмкости снабберного конденсатора завышена, поскольку значение амплитуды коммутационного перенапряжения лежит существенно ниже напряжения класса тиристора, равного 600 В. Таким образом, требуется оптимизация значения ёмкости снабберного конденсатора в зависимости от величины противо-ЭДС с целью минимизации массогабаритных показателей ТП. На рис. 4 приведён график зависимости оптимальной ёмкости снабберного конденсатора от величины противо-ЭДС для заданного режима работы ТП.

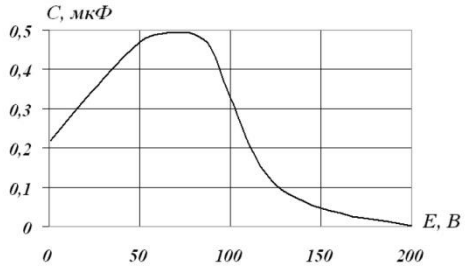


Рис. 4 – Зависимость ёмкости снабберного конденсатора от противо-ЭДС

На рис. 4 наблюдается максимум ёмкости конденсатора C = 0,5 мкФ при величине противо-ЭДС E = 75 В. Подобная зависимость обусловлена сочетанием двух параметров, влияющих на амплитуду коммутационного перенапряжения: 1) величина запасённой в индуктивности L_H энергии, зависящая от амплитуды и длительности прямого тока; 2) значение напряжения на тиристоре в момент его переключения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при проектировании ТП для электропривода значения ёмкостей снабберных конденсаторов следует выбирать, исходя из возможных режимов работы преобразователя. Это позволит уменьшить массогабаритные показатели ТП и защитить его тиристоры от коммутационных перенапряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-20057).

Список литературы

1. *Тутаев Г.М.* Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели / Г. М. Тутаев, И. В. Гуляев, И. В. Маняев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. — № 4. — С. 2–7.

2. *Чиликин М.Г.* Общий курс электропривода / М. Г.Чиликин, А. С. Сандлер // М. : Энергоиздат, 1981.

3. *Беспалов Н.Н.* Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, С.В. Лебедев//Электроника и электрооборудование транспорта. 2012.— Вып.№4.—С.30–35.

4. *Беспалов Н.Н.* Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости / Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов // Нелинейный мир. 2011. – Вып. 8. — С. 500–506.

5. *Bespalov N.N.* Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state / N.N.Bespalov, M.V.Ilyin, S.S.Kapitonov//11TH International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012.—Novosibirsk: IEEE,2012.—№1.—P.143–147.

6. *Беспалов Н.Н.* Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. – Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2014. — Т. 1. — С. 362–364.

7. *Беспалов Н.Н.* Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, А.В. Капитонова // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань : Научно-технический вестник Поволжья, 2014. — Вып. № 1. — С. 65–68.

05.09.12

Н.Н. Беспалов к.т.н., С.С. Капитонов к.т.н., М.В. Ильин к.т.н., А.В. Евишев

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, кафедра Электроники и наноэлектроники, Саранск, ka-mgu@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ВЕЛИЧИН ИНДУКТИВНОСТИ НАГРУЗКИ

В статье исследуются работа однофазного однополупериодного тиристорного преобразователя в электроприводе постоянного тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС. Проведено моделирование работы преобразователя при различных значениях суммарной индуктивности нагрузки. Представлена полученная зависимость величины ёмкости снабберного конденсатора, от значений суммарной индуктивности нагрузки.

Ключевые слова: *тиристорный преобразователь, электропривод постоянного тока, суммарная индуктивность нагрузки, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.*

На сегодняшний день электропривод является устройством, потребляющим большую часть электроэнергии, вырабатываемой электростанциями. Главными составными элементами любого электропривода являются электродвигатель и силовой преобразователь [1]. В электроприводах постоянного тока для выпрямления переменного напряжения в постоянное и управления электродвигателем используются тиристорные преобразователи (ТП). Формируемое ТП постоянное напряжение подаётся на якорные цепи и обмотки возбуждения. При моделировании ТП используется эквивалентная схема замещения данной нагрузки, которая представлена последовательным соединением резистора с сопротивлением, равным суммарному активному сопротивлению якорной цепи, суммарной индуктивности, а также противо-ЭДС с полярностью, противоположной полярности напряжения источника питания [2]. Поскольку на работу ТП особое влияние оказывает величина суммарной индуктивности нагрузки, проведём исследование режимов его работы при различных значениях данного параметра.

Для исследования режимов работы ТП на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС выбрана простейшая однофазная однополупериодная схема [2], изображённая на рис. 1.

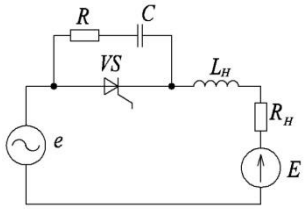
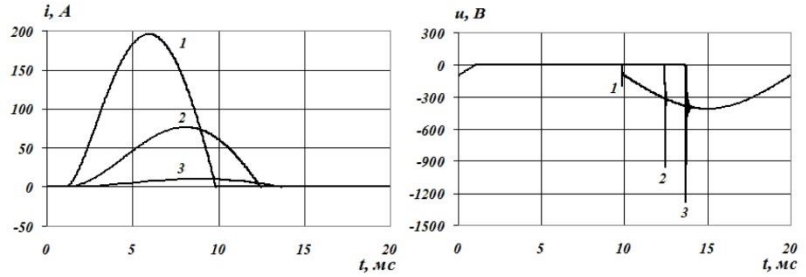


Рис. 1 – Однофазная однополупериодная схема ТП

На рис. 1 используются следующие обозначения: *e* — источник питающего напряжения; *VS* — исследуемый тиристор; *R* и *C* – резистор и конденсатор снабберной цепи; R_H — сопротивление нагрузки; L_H —суммарная индуктивность нагрузки; *E* — противо-ЭДС.

При моделировании схемы, представленной на рис. 1, в качестве источника *e* выбран источник синусоидального напряжения, действующее значение которого равно 220 В, частотой 50 Гц. Сопротивление нагрузки R_H = 1 Ом, величина противо-ЭДС E = 100 В [2]. Для исследования применялась модель силового тиристора Т161-200, созданная в среде Multisim [3, 4]. Значение предельного тока данного тиристора составляет I_{TAVm} = 200 А, повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии и обратного напряжения $U_{D(R)RM}$ = 600 В, что в 2 раза превышает величину амплитуды напряжения источника *e* [5, 6]. В среде Multisim проведено моделирование схемы без учёта влияния снабберной *RC*-цепи при значениях суммарной индуктивности: 1 — L_{H1} = 1 мГн; 2 — L_{H2} = 10 мГн; 3 — L_{H3} = 100 мГн [2]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.



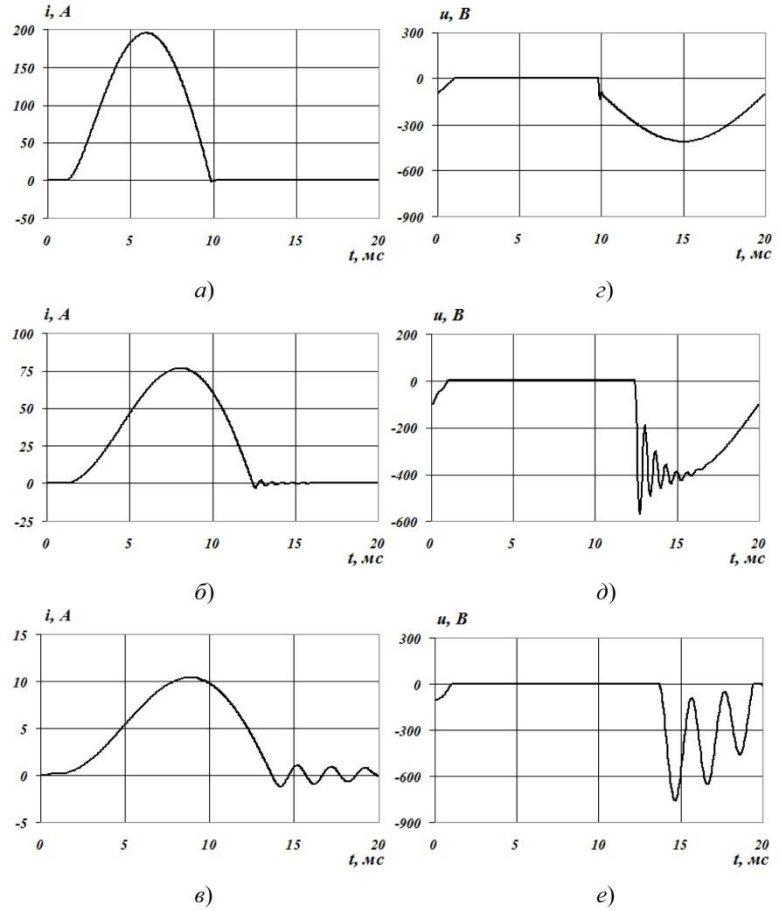
а) *б*)

Рис. 2 – Токи, протекающие через тиристор *VS* (*а*) и напряжения на нём (*б*) при следующих значениях суммарной индуктивности: 1 — 1 мГн; 2 — 10 мГн; 3 — 100 мГн

Из рис. 2*а* видно, что при увеличении значения суммарной индуктивности от 1 мГн до 100 мГн длительность импульса тока, протекающего через тиристор, существенно увеличивается и превышает длительность положительной полуволны питающего напряжения, равную 10 мс. Кроме того величина амплитуды прямого тока уменьшается с 200 А до 15 А.

Рис. 2*б* показывает, что с увеличением значения суммарной индуктивности величина амплитуды коммутационного перенапряжения возрастает от 200 В до 1300 В. При L_{H2} = 10 мГн и L_{H3} = 100 мГн величины амплитуды перенапряжения превышают значение напряжения класса тиристора.

Защита тиристора от коммутационных перенапряжений обеспечивается с помощью снабберных *RC*-цепей. В соответствии со стандартными методиками расчёта выбраны значения сопротивления снабберного резистора R = 20 Ом и ёмкости снабберного конденсатора C = 1 мкФ [7]. Исследованы процессы, протекающие в схеме (рис. 1), с учётом влияния *RC*-цепи при различных значениях суммарной индуктивности. Результаты моделирования изображены на рис. 3.



а) *г*)

б) *д*)

в) *е*)

Рис. 3 – Токи, протекающие через тиристор *VS* (*а*, *б*, *в*) и напряжения на нём (*г*, *д*, *е*) при следующих значениях суммарной индуктивности: 1 —1 мГн; 2 — 10 мГн; 3 — 100 мГн

Рис. 3 показывает, что при L_{H1} = 1 мГн и L_{H2} = 10 мГн рекомендуемых значений параметров снабберных цепей достаточно для того, чтобы ограничить величину амплитуды коммутационного перенапряжения. Однако, при L_{H3} = 100 мГн значение амплитуды перенапряжения превышает величину напряжения класса тиристора. Таким образом, требуется оптимизация значения ёмкости снабберного конденсатора в зависимости от величины суммарной индуктивности с целью обеспечения защиты ТП от коммутационных перенапряжений. На рис. 4 представлен график зависимости оптимальной ёмкости снабберного конденсатора от величины суммарной индуктивности для заданного режима работы ТП.

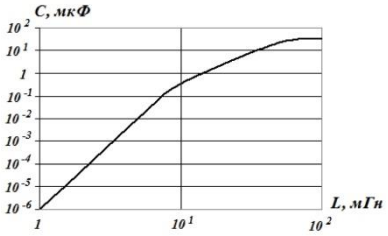


Рис. 4 – Зависимость ёмкости снабберного конденсатора от величины суммарной индуктивности нагрузки

На рис. 4 наблюдается нелинейное возрастание ёмкости снабберного конденсатора при увеличении значения суммарной индуктивности нагрузки. Характер данной зависимости близок к экспоненциальной.

Таким образом, в результате проведённого исследования установлено, что величина суммарной индуктивности нагрузки оказывает существенное влияние на значение ёмкости снабберного конденсатора. Значения ёмкостей снабберных конденсаторов при проектировании ТП для электропривода следует выбирать на основе оценки величины суммарной индуктивности. Подобный подход позволит оптимизировать массогабаритные показатели ТП и защитить его тиристоры от коммутационных перенапряжений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-20057).

Список литературы

1. *Тутаев Г.М.* Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели / Г.М. Тутаев, И.В. Гуляев, И.В. Маняев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2010. — № 4. — С. 2–7.

2. *Чиликин М.Г.* Общий курс электропривода / М.Г.Чиликин, А.С. Сандлер // М.: Энергоиздат, 1981.

3. *Беспалов Н.Н.* Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, С.В. Лебедев // Электроника и электрооборудование транспорта. 2012. — Вып. №4. — С.30–35.

4. *Беспалов Н.Н.* Выравнивание напряжений на последовательно распределенных силовых полупроводниковых приборах в состоянии низкой проводимости / Н. Н. Беспалов, С. С. Капитонов // Нелинейный мир. 2011. – Вып.8. — С. 500–506.

5. *Bespalov N.N.* Current generator for testing power semiconductor devices in high conduction state / N.N.Bespalov, M.V.Ilyin, S.S.Kapitonov//11TH International conference on actual problems of electronic instrument engineering, APEIE 2012.—Novosibirsk:IEEE, 2012.—№1.—P.143–147.

6. *Беспалов Н.Н.* Аппаратно-программный комплекс для испытания и диагностики силовых полупроводниковых приборов / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов // Труды VIII международной (XIX всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах. – Саранск: изд-во Мордов. ун-та, 2014. — Т.1. — С. 362–364.

7. *Беспалов Н.Н.* Методика подбора силовых полупроводниковых приборов для групповых последовательных цепей устройств силовой электроники / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов, А. В. Капитонова // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. — Вып. № 1. — С. 65–68.

05.05.04

Д.М. Бородин, В.В. Конев

Тюменский государственный нефтегазовый университет, институт транспорта, кафедра транспортных и технологических систем, Тюмень, konev@tsogu.ru, mitronhi@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРОГРЕВОМ

В статье представлен анализ систем тепловой подготовки гидропривода землеройных машин на основе которого разрабатывается способ локального прогрева гидродвигателя. Исследуется конструкция гидроцилиндра с локальным прогревом. Модернизация землеройных машин позволяет повысить ее эффективность за счет снижения времени тепловой подготовки и увеличения производительности.

Ключевые слова: *гидропривод, локальный прогрев, землеройная машина, тепловая подготовка.*

Анализ предшествующих исследований показывает, что практически все землеройные машины (ЗМ) от 20 до 40 минут работают при низкой температуре (-25 ÷ -40 ^{0}C), имея температуру рабочей жидкости ниже -25 ^{0}C (т.е. в зоне возможной кавитации рабочей жидкости при начале работы гидронасоса) [1, 2]. Поэтому возникают в гидроприводе ЗМ повышенное количество отказов в зимний период времени. При этом до 3 часов с начала работы ЗМ гидропривод имеет температуру рабочей жидкости до +15 ÷ +20 ^{0}C, т.е. ниже оптимальной (+30 ÷ +50 ^{0}C). Таким образом, значительную часть времени гидропривод ЗМ работает на холодной, вязкой жидкости, с пониженной фильтрацией, повышенным сопротивлением и износами.

При вязкости масла (рабочей жидкости) более 1000 сСт, необходим подогрев рабочей жидкости в гидросистеме. Основными способами являются [2, 3, 4]:

- подогрев рабочей жидкости в баке гидросистемы, путем дросселирования;
- подогрев рабочей жидкости в гидросистеме теплоносителем от системы охлаждения двигателя ЗМ;
- подогрев рабочей жидкости специальными подогревателями (электрическими, тепловыми трубами и др.);
- -подогрев рабочей жидкости выхлопными газами от двигателя ЗМ.

Использование подогрева дросселированием рабочей жидкости требует больших затрат времени, а учитывая, что рабочая жидкость в период начала прогрева имеет высокую вязкость давление в гидросистеме ЗМ уже имея высокое значение становится еще выше.

Подогрев рабочей жидкости горячей водой от системы охлаждения двигателя экскаватора связан со значительными изменениями в конструкции системы охлаждения. Кроме того, использование охлаждающей жидкости для подогрева рабочей жидкости гидропривода влечет за собой увеличения времени разогрева самого двигателя.

Использование специальных подогревателей для разогрева рабочей жидкости предусматривает привлечения дополнительных источников энергии, снижая, тем самым, коэффициент полезного действия всего агрегата.

Подогрев рабочей жидкости выхлопными газами, отводимыми от двигателя внутреннего сгорания имеет ряд преимуществ: используется энергия, выбрасываемая в атмосферу с выхлопными газами; использование выхлопных газов упрощает конструкцию системы, т.к. газы выбрасываются в атмосферу, соответственно не требуется изготовления замкнутой системы; позволяет повысить КПД землеройной машины.

В соответствие с изложенным следует, что прогрев гидробака выхлопными газами ДВС является эффективным методом по сравнению с другими способами прогрева. При этом рассмотренные способы прогревают только гидробак, и в начале работы ЗМ гидродвигатели остаются не прогретыми, поэтому имеют высокие износы.

В технической документации [5] и в рекомендациях производители техники указывают на необходимость прогрева гидропривода машин, но этих данных недостаточно, т.к. они являются общими и предлагают прогрев гидропривода перед началом его работы под небольшой нагрузкой. Кроме того, анализ качества рабочей жидкости показывает, что практически не соблюдаются правила и сроки замены рабочей жидкости, степень ее загрязнения очень высока.

Ранее предлагались различные системы локального прогрева гидроцилиндра [3, 4]. При прогреве электрокабелем необходим мощный источник электроэнергии. В условиях автономного функционирования ЗМ это затруднительно.

Также рассматривается прогрев путем совмещения штоковой и бесштоковой полости:

- проходным каналом в поршне со встроенным клапаном. Основной недостаток конструкции — это сложность изготовления и низкая работоспособность при больших давлениях в гидросистеме;

- посредством дополнительного обводного трубопровода, установленного с диаметрально противоположной стороны патрубков подачи и отвода жидкости в гидроцилиндр. Данная конструкция имеет недостаток – это создание дополнительных отверстий в гидроцилиндре.

С целью устранения указанных недостатков предложена конструкция в которой корпус гидроцилиндра 1 (рис. 1) содержит подводы 6 с разделительной перегородкой 7, позволяющие при подаче прогретой рабочей жидкости через патрубок 8 совместить штоковую 2 и бесштоковую 3 полости гидроцилиндра через обводной трубопровод 9 не перемещая поршень 4 и шток 5 гидроцилиндра. Обводной трубопровод содержит клапан 10 для совмещения полостей гидроцилиндра при прогреве и отключения при работе гидроцилиндра.

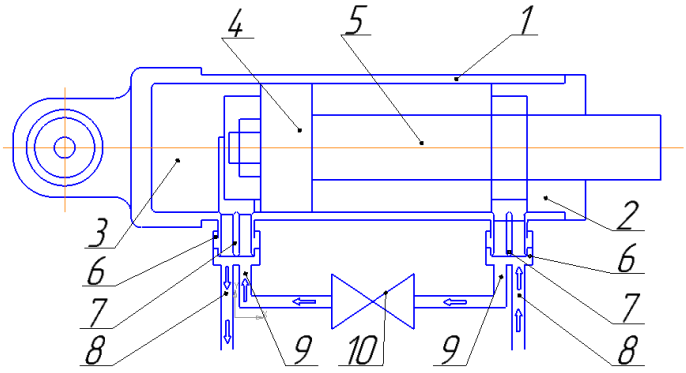


Рис. 1- Конструкция гидроцилиндра с обводом

После завершения цикла разогрева гидропривода клапан 10 закрывается, тем самым, прекращая движение рабочей жидкости по обводному трубопроводу 9.

На эффективность прогрева гидроцилиндра будут влиять факторы: масса гидроцилиндра; температура окружающего воздуха; температура рабочей жидкости, прогреваемой гидроцилиндр; расход рабочей жидкости.

С целью проверки работы гидроцилиндра была разработана в программе «SolidWorks» виртуальная модель (рис. 2). График изменения температуры в гидробаке и гидроцилиндре представлен на рис. 3.

При использовании локального прогрева гидроцилиндров землеройной машины нужно изменять режимы прогрева. Так, при предпусковом прогреве только одного гидроцилиндра возможен «срыв» поршня и, следовательно, не обеспечение его неподвижности, а значит повышенный износ. Поэтому, необходимо прогревать одновременно несколько гидроцилиндров (гидродвигателей), тем самым разделив поток жидкости на несколько потребителей. При этом падения температуры в гидробаке (рис. 3) будет еще больше.

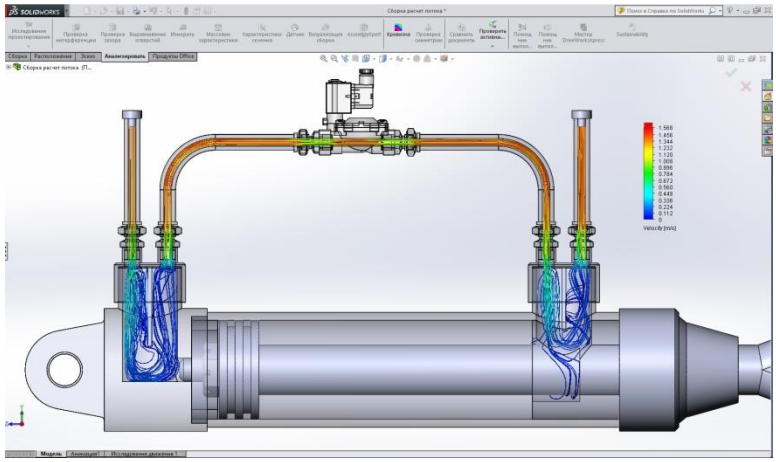


Рис. 2- Виртуальная модель гидроцилиндра с обводом

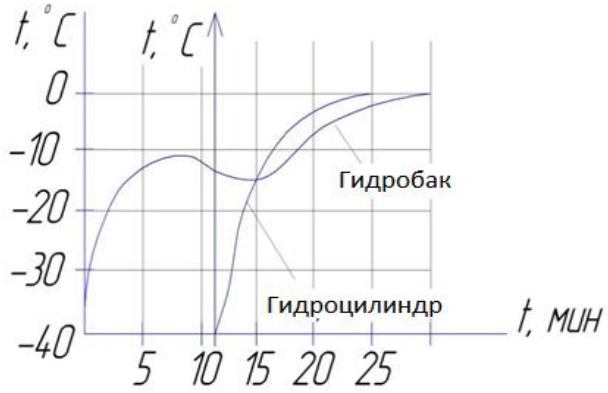


Рис. 3- График изменения температуры в гидробаке и гидроцилиндре

Для обеспечения работы системы прогрева гидропривода с минимальными затратами энергии и времени необходимо автоматическое регулирование этим процессом.

Список литературы

1. *Клиндух Н.Ю.* Совершенствование систем гидропривода строительных кранов для эксплуатации при низких температурах: диссертация ... кандидата технических наук: 05.05.04.- Клиндух, 2007.- 130 с.

2. *Чмиль В.П., Чмиль Ю.В.* Патент № 2432434 РФ МПК E02F9/22 Устройство предпускового подогрева гидравлического привода машины и способ его очистки от твердых продуктов неполного сгорания топлива, Патентообладатель ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», заявл. 28.10.2009.

3. *Мерданов Ш.М. и др.* Исследование и разработка системы тепловой подготовки гидропривода строительно-дорожных машин //Строительные и дорожные машины, 2013, № 1. с. 27-29.

4. *Sh. Merdanov, V. Konev, S. Sozonov, E. Polovnikov* Experimental research planning heat training hydraulic motors: SCIENTIFIC ENQUIRY IN THE CONTEMPORARY, WORLD: THEORETICAL BASICS AND INNOVATIVE APPROACH, Vol. 5. - Technical Sciences. Research articles, B&M Publishing (San Francisco, California, USA) 2014. – p.113-117.

5. Свод правил по проектированию и строительству СП 12-104-2002 — «Механизация строительства. Эксплуатация строительных машин в зимний период» (одобрен постановлением Госстроя РФ от 27 февраля 2003 г. №25).

05.22.10

Е.Ф. Бояркина, В.Г. Логачев

Тюменский государственный нефтегазовый университет,
кафедра сервиса автомобилей и технологических машин, Тюмень, satm@mail.ru

ФАКТОР «МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ОБЩЕСТВА» ПРИ ИЗУЧЕНИИ УРОВНЯ АВТОМОБИЛИЗАЦИИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

Рассматривается понятие термина «модель поведения общества». Приводятся примеры влияния этого фактора на уровень автомобилизации населения в разных странах. Раскрывается механизм формирования модели поведения общества.

Ключевые слова: *уровень автомобилизации, модель поведения общества*.

Проведенные ранее исследования показывают, что сложно выделить один (и даже два) фактора, влияние которых на количество легковых автомобилей на улично-дорожной сети (УДС) города будет объективным и существенным, поэтому для установления закономерностей формирования количества (парка) легковых автомобилей на УДС города в зависимости от влияющих факторов необходимо использовать системный подход [1, 2].

При этом следует учитывать, что хотя отдельный автомобиль является технической системой [3], при этом совокупность (парк) легковых автомобилей в городе на его УДС – не есть техническая система, состоящая из отдельных технических систем; также как любая система больше, чем сумма всех ее элементов, то и парк ЛА в городе, как система, приобретает новые свойства социально-экономического характера.

Количество легковых автомобилей, зарегистрированных в городе, представляет собой пересечение возможного количества ЛА и количества ЛА, в котором есть потребность. При этом можно выделить три варианта соотношения потребности в автомобилях и возможности их иметь (рис. 1): когда потребность много больше возможности, много меньше возможности или равна ей.

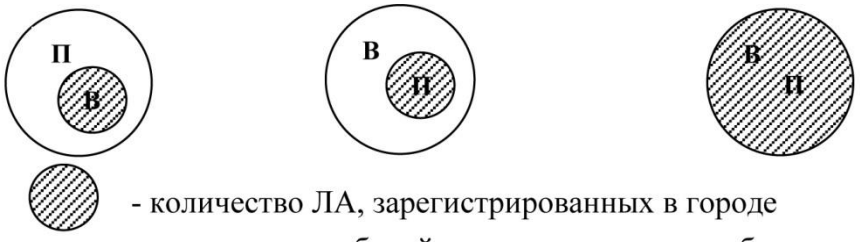


Рис. 1. - Соотношение потребности в легковых автомобилях и возможности их иметь

Количество легковых автомобилей, в которых есть потребность, складывается из потребности в легковых автомобилях для граждан, организаций и органов власти.

Объем потребности в ЛА для граждан зависит, главным образом, от количества домохозяйств (семей) в городе и удельного количества ЛА на одно домохозяйство (семью). Количество домохозяйств определяется исходя из численности населения города и среднего размера семьи. Количество автомобилей на домохозяйство зависит от степени необходимости в автомобиле и модели поведения общества. Степень необходимости в автомобиле определяется возможностью пользоваться общественным городским пассажирским транспортом и характером расселения населения.

«Движущей силой» системы являются не автомобили, а их владельцы – фактические и потенциальные, поэтому в системе нельзя не учитывать такие факторы, как менталитет населения страны, политический и экономический строй, традиции в семьях и обществе, отношение общества к владельцам автомобилям, к автомобилю, к его использованию для

различных целей. Поэтому в системе появляется фактор, который можно назвать моделью поведения общества (МПО).

Модель поведения общества – это, своего рода, философия, образ мысли, жизни общества. Если говорить о возможной классификации, типизации МПО, то в данной работе она не рассматривается. Стоит только обозначить, что можно говорить о МПО России 70-80-х гг. и 2000-х гг., МПО современной Швеции, МПО стран Западной Европы, МПО Гонконга и Сингапура.

Например, в Швеции общественное мнение на стороне любителей общественного транспорта и велосипедов. Жители Нью-Йорка в большинстве своем живут в пригородах, оставляют автомобили на парковках на въезде в город и дальше передвигаются на метро. [4] В Лондоне сделан платный въезд в центр города [5, 6], в Гонконге и Сингапуре введён высокий транспортный налог и действует плата за использование индивидуальных автомобилей в центре города в часы пик (плата не взимается с автомобилей наполнением не менее четырех) [7], в Японии введен транспортный налог в зависимости от размера автомобиля [8], в Афинах - очередность эксплуатации автомобиля по дням недели согласно четным/нечетным номерным знакам [9]. Для сравнения, предложение Минтранса РФ по поводу платного въезда в город вызвало огромное недовольство и протесты Общества защиты прав автолюбителей [10]. При этом не следует предполагать, что МПО напрямую зависит от страны или времени, просто государства мира проходят одни и те же или свои особенные МПО в разное время.

Одна модель поведения общества может распространяться не на всю страну, варьироваться о города к городу, при этом, в определенной степени, на МПО влияет размер города.

Модель поведения общества раскрывается через анализ состава семьи, прагматичный подход (целесообразность владения автомобилем) и эмоциональный подход к автомобилю. Состав семьи определяется возрастным составом членов семьи и количеством членов семьи определенной категории – студентов и работающих.

В рамках анализа целесообразности владения автомобилем рассматривается соотношение затрат на пользование личным автомобилем (покупка, страхование, техническое обслуживание, хранение, парковка, ГСМ [11], транспортный налог) и общественным транспортом, что имеет значение для людей с доходом на семью ниже определенного уровня.

Эмоциональный подход к автомобилю раскрывается через анализ срока фактического пользования автомобилем одного человека, количество автомобилей на одного человека в семье и характер общественного мнения о владельце автомобиля (например, считается ли человек, имеющий автомобиль, успешным и популярным или, наоборот, неэффективно использующим общие ресурсы (время, природу) и наносящим вред окружающей среде).

Модель поведения общества также раскрывается через традиционный срок владения автомобилем одним человеком и сложившийся в обществе характер распоряжения денежными средствами – накопление или потребление.

Модель поведения общества влияет на количество автомобилей, имеющихся в продаже, определяя возможность или невозможность приобретения автомобилей иностранного производства, а также регулируя количество продающихся транспортных средств, бывших в употреблении (через традиционный для данного общества срок фактического владения автомобилем одним человеком). Традиционный срок использования автомобиля зависит от максимально возможного срока эксплуатации одним владельцем и необходимого владельцу срока эксплуатации автомобиля. Максимально возможный срок эксплуатации определяется маркой автомобиля (причем, средняя по городу марка автомобиля является следствием модели поведения общества), а также качеством технического обслуживания автомобиля.

Необходимый срок эксплуатации автомобиля определяется уровнем дохода семьи и моделью поведения общества, проявляющейся через отношение общества к пользованию автомобилем и отношение владельца к автомобилю, оба этих фактора проявляются через

срок фактического владения автомобилем одного владельца. Кроме того, отношение владельца к автомобилю определяется характером эксплуатации автомобиля, «стандартный» ли это способ использования автомобиля (поездки на работу, с работы, за покупками, за город в выходные), «рабочий» (использование в качестве служебного автомобиля), «выходной» (использование преимущественно в выходные дни, в рабочие дни – поездки на общественном транспорте) или «летне-загородный» (использование только для поездок за город в летний период).

Возможное количество легковых автомобилей, которые могут купить жители города определяется стоимостью «автомобильного продукта», уровнем благосостояния населения и моделью поведения общества.

Список литературы

1. *Захаров Н.С.* Программа «REGRESS». Руководство пользователя [Текст] / Н.С. Захаров. – Тюмень: ТюмГНГУ, 1999. – 52 с.
2. *Захаров Н.С.* Использование ТР-распределения при моделировании процессов изменения качества автомобилей [Текст] / Н.С. Захаров // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1999. – № 3. – С. 105-111.
3. *Захаро, Н.С.* Структура системы при моделировании расхода запасных частей для транспортно-технологических машин в нефтегазодобыче [Текст] / Н.С. Захаров, О.А. Новоселов, Р.А. Зиганшин, А.Н. Макарова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 193-195.
4. *Мчедлишвили К.А.* Новые критерии оценки автомобилизации [Текст] // Вестник транспорта. – 2006. - № 1. – С. 41 – 42.
5. Платный въезд в Лондон себя оправдал [Электронный ресурс] // Эхо планеты. – 2003. - http://www.travel.ru/news/2003/05/05/22751.html
6. Лондон признал неэффективность платного въезда в центр города, о котором раздумывает Москва [Электронный ресурс] // Агентство экономической информации Прайм-Тасс. – 2008. - http://www.prime-tass. ru/ news/show.asp?id=2709&ct=articles
7. Welfare effects of congestion pricing in Singapore [Text] / Wilson Paul W // Transportation. – 1988. - № 3. – P. 191 – 210.
8. Enlargement of light oars under way [Text] // Technocrat. - 1975. - №4. –60 P.
9. *Морозов А*. Пробки: взгляд со стороны [Электронный ресурс] // За рулем. - 2006. - № 7.– http://www.zr.ru/articles/48434/
10. *Моржаретто И.* Москва как она есть [Электронный ресурс] // За рулем. - 2005.- № 7. – http://www.zr.ru/articles/44132
11. *Шакиров И.Ф., Захаров Н.С.* Математические модели закономерностей влияния факторов на расход топлива специальных автомобилей аэропортов [Текст] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 368-370.

05.22.07

А.П. Буйносов д.т.н., Д.С. Денисов

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, byinosov@mail.ru, ds.denisov7@yandex.ru.

БЛОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРАЦИИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье приведены результаты создания блока для экспериментальных исследований вибрации узлов моторного вагона электропоезда в эксплуатации.

Ключевые слова: *электропоезд, узел, эксплуатация, блок, исследование, разработка, предварительный анализ.*

Решение задачи повышения надежности транспортных систем, в частности, железнодорожного транспорта, в настоящее время все чаще ассоциируется с проведением периодического или непрерывного диагностирования технического состояния наиболее важных, с точки зрения связи надежности и безопасности, узлов электропоезда. Понятие непрерывное диагностирование получило название – мониторинг технического состояния [1, 2].

Реализация мониторинга технического состояния электропоезда на практике далеко не тривиальная задача, но требующая обязательного решения. Так, например, для достижения динамической ошибки пропуска опасного состояния оборудования на уровне 1 % требуется осуществлять диагностирование с интервалом не более двух часов, тогда как для ответственного оборудования электропоезда допустимый уровень ошибки составляет 0,1 %, что требует постановки диагноза с интервалом 8–11 минут.

Наибольшие трудности при организации мониторинга состояния электропоезда представляет автоматическое достоверное распознавание в реальном времени неисправного состояния узла на фоне сильных помех, непрерывно сопровождающих в процессе эксплуатации подвижного состава. Наличие таких факторов как, переменные скоростные и нагрузочные режимы, периодические стыки и случайные неровности пути стали основанием для формирования мнения о том, что обеспечение объективной виброакустической диагностики технического состояния роторного механического оборудования электропоезда в процессе эксплуатации сложно достижимо, а подчас невозможно [3].

Таким образом, требуется установление возможности технической реализации достоверной оценки технического состояния узлов роторных агрегатов механической части электропоезда в процессе эксплуатации при приемлемой стоимости диагностирования [4]. Для достижения указанной цели требуется разработать программу экспериментальных исследований виброакустических процессов, а также создать экспериментальный блок для проведения измерений сигналов.

Одним из важнейших элементов программы экспериментальных исследований виброакустических процессов является получение сигналов вибрации с узлов электропоезда в процессе эксплуатации с высокими точностными характеристиками, позволяющими охватить широкий спектр частот и амплитуд сигналов, порождаемых элементами узлов и агрегатов, и их взаимодействием с железнодорожным полотном.

Для этого был разработан экспериментальный измерительный блок, отвечающий следующим, в целом весьма противоречивым, требованиям: надежность работы блока при перепадах температуры, повышенной вибрации, неустойчивости питающего напряжения; устойчивость первичных преобразователей (датчиков вибрации), устанавливаемых непосредственно на исследуемые узлы, к высоким динамическим нагрузкам, превышающим 100g; высокие метрологические характеристики; минимальное вмешательство в конструкцию электропоезда; автономная запись сигналов с первичных преобразователей, а также частоты вращения и параметров режима ведения электропоезда [5].

В основу блока был заложен уникальный измерительный модуль 3541, разработанный и серийно выпускаемый НПЦ «Динамика». Данный модуль предназначен для измерения и аналого-цифровой обработки сигналов, в том числе виброакустических и акустоэмиссионных сигналов, передачи цифровых данных в систему сбора данных по интерфейсу Ethernet. Модуль имеет восемь каналов аналого-цифрового преобразования с результирующей разрядностью 16 бит и полосой пропускания до 900 кГц.

Создание подобного класса устройств стало возможным в сравнительно недавнее время, после появления новейших коммерчески доступных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) без встроенных процессорных ядер и трансиверов. Использование таких ПЛИС наложило некоторые ограничения, связанные с необходимостью выделения большого объема логических ячеек на реализацию интерфейсов связи с управляющими устройствами и интерфейсов подключения внешней памяти.

Однако, как известно, творческая инженерная мысль не стоит на месте и наиболее перспективным направлением в разработке высоко-эффективных измерительных устройств стало совместное применение ПЛИС и сигнальных процессоров, например 16-разрядного Blackfin, являющегося результатом совместных усилий фирм Analog Devices и Intel по разработке новой архитектуры Micro Signal Architecture ADI. Особенностью данной архитектуры является сочетание в одном микропроцессоре возможностей цифровой обработки сигналов и RISC подобного (не полного) набора команд.

Распределение функций между ПЛИС (FPGA) и сигнальным процессором (Blackfin) (рис. 1) позволило создать многоканальные высокопроизводительные измерительные устройства, в которых на ПЛИС возлагаются функции управления аналого-цифровыми преобразователями (ADC) и предварительной обработки получаемых данных – цифровая фильтрация, выделение вибрационных или акустических импульсов и расчет их параметров, организация потока данных для приема по каналу DMA (прямого доступа к памяти) и прочее. На долю процессора возложена реализация функций связи с управляющими устройствами по интерфейсу Ethernet, поддержка Web-интерфейса, хранение полученных от ПЛИС данных во внешней памяти, окончательная обработка полученных данных.

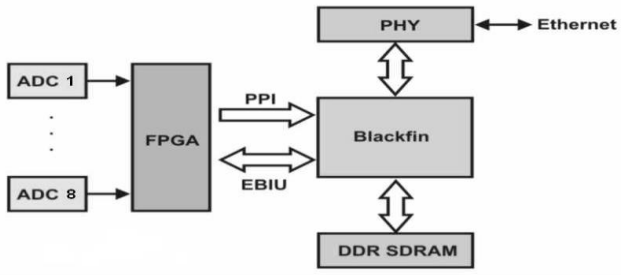


Рис. 1. Упрощенная структурная схема измерительного блока на базе ПЛИС и микропроцессора Blackfin:
ADC1–ADC8 – аналого-цифровые преобразователи;
FPGA – программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС);
DDR SDRAM – память хранения временной реализации сигналов;
PHY – физический уровень интерфейса Ethernet;
PPI – параллельный интерфейс;
EBIU – интерфейс внешней шины.

Отличительной особенностью разработанного, в соответствии с вышеописанной архитектурой, измерительного модуля 3541, внешний вид которого приведен на рис. 2, является возможность непрерывной равномерной (без пропусков данных) регистрации сигналов.

Примененные в модуле 24-разрядные аналого-цифровые преобразователи производства Analog Devices позволяют получать временную реализацию с разрешением в 16 «чистых» разрядов частотой дискретизации до 2 МГц.

Рис. 2. Измерительный модуль 3541

Для осуществления записи сигналов вибрации с узлов электропоезда в процессе движения был проведен монтаж экспериментального блока на моторном вагоне (рис. 3).

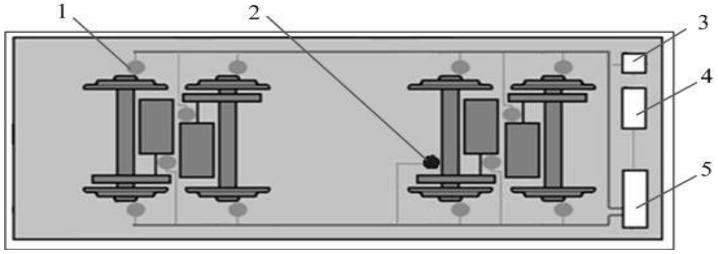


Рис. 3. Схема размещения блока на моторном вагоне электропоезда:
1 – датчик вибрации; 2 – датчик частоты вращения; 3 – устройство
определения режимов введения поезда; 4 – ПЭВМ; 5 – измерительный модуль 3541

При размещении на моторном вагоне измерительный модуль 3541 (5) проводным каналом связи Ethernet подключают к малогабаритному персональному компьютеру промышленного исполнения (ПЭВМ) (4). Для измерения вибрации в качестве датчиков вибрации в установке использованы пьезоэлектрические виброакселерометры (1), имеющие высокую резонансную частоту, и устанавливаемые на буксовые узлы колесных пар [5] и подшипниковые щиты тяговых электродвигателей. Для измерения частоты вращения колесных пар использованы вихретоковые датчики (2), работающие с магнитными метками, закрепленными на оси колесной пары. Определение режимов ведения поезда осуществляется путем измерения напряжения на проводах цепей управления с помощью соответствующего блока (3), что обеспечило в процессе анализа сигналов возможность определения режимов ведения электропоезда в каждый момент времени.

С помощью смонтированного экспериментального блока уже более 3-х месяцев эксплуатации периодически в автоматическом режиме проводится запись сигналов вибрации со всех узлов. Эксперимент проводится на нескольких электропоездах серии ЭТ2Т и ЭД4, эксплуатируемых на разных участках Свердловской железной дороги и приписанных к мотор-вагонному депо Нижний Тагил.

В настоящее время в результате сбора экспериментального материала на основе анализа получаемых данных было выявлено несколько узлов, имеющих существенно большие уровни вибрации. Эти узлы были приняты за условно неисправные.

Список литературы

1. *Буйносов А.П., Тихонов В.А.* Разработка автоматизированного рабочего места мониторинга параметров колесных пар локомотивов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. № 1. С. 43-46.

2. *Костюков В.Н., Сизов С.В., Аристов В.П.* Непрерывный мониторинг состояния моторвагонного подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2008. № 6. С. 41-42.

3. *Буйносов А.П., Наговицын В.С.* Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326-329.

4. *Буйносов А.П., Денисов Д.С.* Разработка диагностического комплекса при техническом обслуживании электровозов на ПТОЛ // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 79-81.

5. *Буйносов А.П., Денисов Д.С.* О разработке прибора неразрушающего метода контроля бандажей колесных пар локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 4. С. 69-72.

05.22.07

А.П. Буйносов д.т.н., А.В. Панфилов

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС),
кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, byinosov@mail.ru, usurt_alex@mail.ru.

ВЫБОР ПРОФИЛЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6

В статье приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных исследований определения наиболее эффективного профиля поверхности катания бандажей исходя из критерия максимального ресурса до смены колесных пар электровозов 2ЭС6.

Ключевые слова: *электровоз, 2ЭС6, колесная пара, бандаж, профиль, износ, контролируемые параметры, ресурс, сравнение, результаты*.

Ресурс колесных пар определяется периодичностью технического обслуживания ТО-4, на котором производится обточка бандажей с целью восстановления профиля поверхности катания, и ремонтов ТР-3, на которых производится замена полностью изношенных бандажей. Срок службы при прочих равных условиях во многом зависит от профиля поверхности катания [1, 2].

В последние годы на магистральном железнодорожном транспорте уменьшилось количество обточек бандажей колесных пар электровозов по предельному износу гребней. Однако проблема повышенного износа колесных пар остается актуальной, поскольку параметрические отказы бандажей в настоящее время составляют еще значительную часть от общего числа отказов деталей и узлов электровозов [3]. Поэтому выбор наиболее эффективного профиля исходя из критерия максимального использования ресурса бандажей очень важен и требует повышенного внимания [4, 5].

Из анализа причин выхода из строя бандажей колесных пар электровозов, приписанных к эксплуатационному локомотивному депо Свердловск Свердловской дирекции тяги (рис. 1) видно, что основными из них являются: износ гребня (56 %), прокат (39 %), разность диаметров (0,3 %), ползуны (2,4 %), прочие (2,3 %).

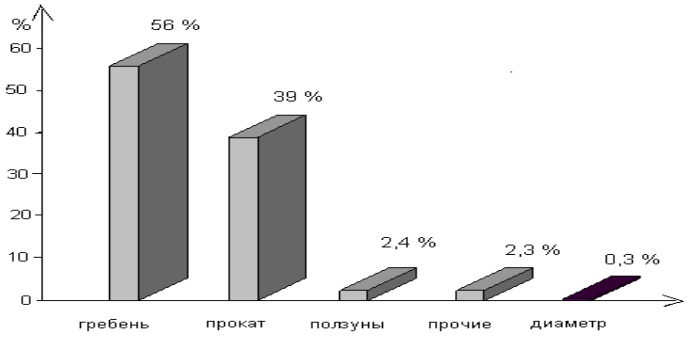


Рис. 1. Причины выхода из строя бандажей колесных пар электровозов

С октября 2013 г. по май 2015 г. в сервисном локомотивном депо Свердловск – структурном подразделении «СТМ-Сервис» проводились исследования причин изнашивания бандажей колесных пар электровозов серии 2ЭС6 обточенных по профилю «Л» (ГОСТ 11018–2011, черт. 5) и ДМетИ типа «ЛР». Исследования проводились на основании анализа статистических данных полученных при замере толщины гребней и бандажей колесных пар при заходе электровоза 2ЭС6 на технические обслуживания в объеме ТО-2 и ТО-4, текущие ремонты ТР-1 и ТР-2. Анализировались следующие данные: значение межремонтных пробегов электровозов 2ЭС6; износ гребней колесных пар; нарастание величины проката бандажей колесных пар.

В сервисном локомотивном депо Свердловск данные по износу гребней и бандажей колесных пар электровозов серии 2ЭС6 были собраны для электровозов, эксплуатирующихся с применением бандажей с профилем «Л» после установки новой колесной пары, а за тем обточенных по профилю ДМетИ типа «ЛР». Для каждой группы электровозов была произведена разбивка интервалов в зависимости от величины пробега (от

0 до 20, от 20 до 40 и т. д. тыс. км). Для каждого колеса электровоза, в зависимости от величины пробега между обточками, в зависимости от типа профиля, была сделана выборка износа гребней бандажей колесных пар электровозов и величина проката бандажа. Величина износа и проката гребня была внесена в соответствующей данному пробегу интервал. Среднему пробегу в каждом рассмотренном интервале значений износа гребней бандажей соответствовала сумма пробегов колесных пар поделенных на количество колесных пар в данном интервале.

Как известно, выборки контролируемых параметров узлов механической части локомотивов, к которым относятся и бандажи колесных пар, подверженных износу, с высокой точностью описываются нормальным законом распределения [3, 6]. В этом случае плотность распределения записывается в виде:

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-M_y)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (1)$$

где M_y – математическое ожидание контролируемого параметра; σ_y – среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра; y – текущее значение контролируемого параметра.

В настоящее время для оценки ресурса бандажей колесных пар используется модель, основанная на линейной зависимости изменения значений числовых характеристик контролируемых параметров от пробега [3]:

$$y(L) = A + B \cdot L, \quad (2)$$

где A и B – коэффициенты, определяемые по методу наименьших квадратов.

При этом линейная функция составляется отдельно для зависимостей математического ожидания и среднеквадратического отклонения от пробега, полученных при аппроксимации эмпирических зависимостей $M_y^*(L)$ и $\sigma_y^*(L)$, соответственно.

Использование линейной аппроксимации основывался на предположении, что период приработки поверхности бандажа к поверхности рельса составляет относительно малую часть эксплуатационного цикла. С учетом приведенного выше материала, это позволяет рассматривать процесс изнашивания бандажей колесных пар по линейной зависимости от пробега, определяющую только период нормальной эксплуатации.

Результаты расчета коэффициентов уравнений линейных регрессий износа гребня и нарастания проката бандажей колесных пар электровозов 2ЭС6 от пробега по существующей методике [1] приведены в таблице.

Таблица. Коэффициенты уравнений регрессии износа гребней бандажей электровозов серии 2ЭС6 в сервисном локомотивном депо Свердловск по профилям ГОСТ 11018-2011, черт. 5 и ДМетИ, типа «ЛР»

Зависимость	Объем выборки, N	Коэффициенты уравнений регрессии		Коэффициент корреляции, R_{yl}	90%-ный ресурс, тыс.км.
		A, мм	B, мм/10^4 км		
Профиль ГОСТ 11018-2011, черт. 5, износ гребней					
$M_y(L)$	814	0,034	0,590	0,899	84,73
$\sigma_y(L)$		0,015	0,288	0,885	
Профиль ГОСТ 11018-2011, черт. 5, нарастание проката					
$M_y(L)$	814	0,022	0,059	0,988	281,40
$\sigma_y(L)$		0,013	0,149	0,954	
Профиль ДМетИ типа «ЛР», износ гребней					
$M_y(L)$	656	0,034	0,188	0,986	159,69
$\sigma_y(L)$		0,031	0,165	0,884	
Профиль ДМетИ типа «ЛР», нарастание проката					
$M_y(L)$	656	0,024	0,096	0,992	112,31
$\sigma_y(L)$		0,007	0,276	0,827	

На рис. 2 приведена зависимость износа гребня от пробега.

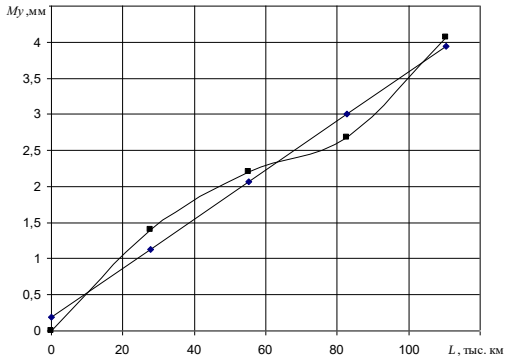


Рис. 2. Зависимость среднего значения износа гребней колесных пар электровозов 2ЭС6 от пробега, обточенных по профилю ГОСТ 11018-2011

Проведенный, методами теории статистических гипотез, сравнительный анализ изнашивания бандажей колесных пар, имеющих различный профиль поверхности катания (ГОСТ 11018-2011, черт. 5 и ДМетИ типа «ЛР»), по критерию реализации максимального ресурса до обточки бандажей, позволил выбрать наилучший профиль для каждых конкретных условий эксплуатации электровозов серии 2ЭС6. Сравнительный анализ двух профилей позволил сделать вывод о том, что при обточке бандажей колесных пар по профилю ГОСТ 11018–2011, черт. 5. 90%-ный ресурс до обточки по минимальной толщине гребня составляет 84,73 тыс. км (по прокату 90%-ный ресурс составляет 281,4 тыс. км). В данном случае лимитирует износ гребня. Из этого следует что, при восстановлении конфигурации поверхности профиля катания процесс обточки сводится в основном к восстановлению толщины гребня, а это, несомненно, ведет к большому технологическому износу.

При обточке бандажей колесных пар по профилю катания ДМетИ (типа ЛР) 90%-ный ресурс до обточки по минимальной толщине гребня составляет 159,69 тыс. км (по прокату 90%-ный ресурс составляет 112,31 тыс. км). В этом случае лимитирует износ бандажей по кругу катания колесных пар локомотивов серии 2ЭС6.

Таким образом переход на обточку колесных пар имеющих конфигурацию профиля катания ДМетИ типа «ЛР» позволит увеличить ресурс бандажа колесной пары до обточки почти в два раза (с 84,73 до 159,69 тыс. км), при этом лимитирует предельная величина проката.

На основании полученных данных при анализе, а так же согласно математическим расчетам, был сделан вывод о том, что в сервисном локомотивном депо Свердловск – структурное подразделения «СТМ-Сервис» для колесных пар электровозов серии 2ЭС6 наилучший профиль поверхности катания является ДМетИ типа «ЛР».

Список литературы

1. *Буйносов А.П.* Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2009. 224 с.
2. *Буйносов А.П., Денисов Д.С.* Сравнительный анализ износа бандажей колесных пар электровозов 2ЭС10 и ВЛ11 // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 1. С. 47-49.
3. *Буйносов А.П., Умылин И.В.* Оптимизация процесса обточки бандажей колесных пар локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 3. С. 101-104.
4. *Калмыков А.А., Наговицын В.С.* и др. Бесконтактное измерение бандажей // Железнодорожный транспорт. 1995. № 11. С. 34-36.
5. *Соколов М.М., Варава В.И.* Измерение и контроль при ремонте и эксплуатации вагонов. М.: Транспорт, 1991. 154 с.
6. *Горский А.В., Наговицын В.С.* и др. Экономичная обточка бандажей // Локомотив. 1992. № 4. С. 26-27.

05.22.07

А.П. Буйносов д.т.н., И.О. Шепелева

Уральский государственный университет путей сообщения, кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, byinosov@mail.ru, shepeleva-ira_91@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ БАНДАЖЕЙ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ

В статье приведены результаты моделирования упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов с использованием импульсного или быстродвижущегося теплового источника.

Ключевые слова: *электровоз, колесная пара, бандаж, упрочнение, нагрев, тепло, моделирование, результаты.*

В настоящее время широкое распространение получили технологии поверхностного упрочнения сталей мощными концентрированными источниками энергии, такими как лазерный луч, плазменная дуга. Для предотвращения оплавления поверхности и увеличения обрабатываемой площади применяют сканирование источника тепла. Плазменная дуга с поперечными электромагнитными колебаниями широко используется для упрочнения различных деталей из углеродистых сталей, в том числе для упрочнения гребней бандажей колесных пар электровозов. В [1] опубликована статья авторов, в которой приведена модель упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов. Указано, что упрочнение сталей при термообработки с использованием равномерно распределенных источников нагрева определяется, в основном, двумя параметрами: максимальной температурой T_m и временем нагрева t_0 поверхности, которые в процессе термообработки должны строго контролироваться [1].

Безразмерный параметр глубины упрочнения Z может быть ограничен значением 0,4. Результаты компьютерных расчетов по уравнениям (4) и (10) [1] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Z	τ_m	θ_m
0	0	1
0,05	0,0006857	0,914149
0,10	0,0035267	0,834054
0,20	0,0199325	0,691799
0,30	0,0588132	0,573651
0,40	0,1313577	0,478503

На рис. 1 приведена зависимость $\tau_m(Z)$, а на рис. 2 – $\theta_m(Z)$. Для точек в табл. 1 эти зависимости аппроксимируются выражениями $\tau_m = 1{,}235 \cdot Z^{2{,}522}$ и $\theta_m = 1 - 1{,}2089 \cdot Z^{0{,}8729}$, соответственно.

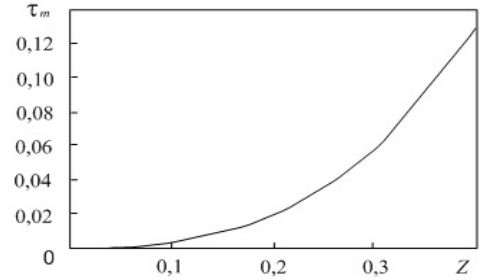


Рис. 1. Зависимость относительного времени τ_m достижения максимальной температуры от относительной глубины Z

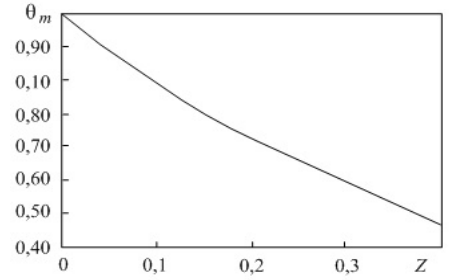


Рис. 2. Зависимость относительной максимальной температуры θ_m от относительной глубины Z

В работах [2, 3] для стали 45 и для стали бандажей колесных пар ограничивали глубину упрочнения изотермой 850 °С (температура аустенизации), однако в [4] в результате экспериментальных исследований процесса плазменного упрочнения было показано, что для среднеуглеродистых сталей эта температура должна быть не ниже 950 °С. В этом случае при $T_0 = 0$ $\theta_a = \theta_m = 950/T_m$. Результаты вычислений времени τ_m достижения максимальной глубины нагрева Z_m для $T_0 = 950$ °С и температур нагрева поверхности T_m =1000–1500 °С приведены в табл. 2.

Таблица 2

T_m, °С	$\theta_m = 950/T_m$	τ_m	Z_m
1000	0,950000	0,00019995	0,0287207
1100	0,863636	0,00213545	0,0810998
1200	0,791666	0,00645315	0,1280839
1300	0,730769	0,01329445	0,1708493
1400	0,678571	0,02271107	0,2102661
1500	0,633330	0,03473166	0,2469703
1600	0,593750	0,49409390	0,2814682

На рис. 3 представлена зависимость $\tau_m(T_m)$, а на рис. 4 – $Z_m(T_m)$. Как видно из табл. 2 и рис. 4, уменьшение температуры нагрева поверхности с 1500 до 1000 °С приводит к резкому снижению глубины прогрева в 10 раз, поэтому поддержание заданной температуры поверхности является важнейшим фактором качественного упрочнения [5].

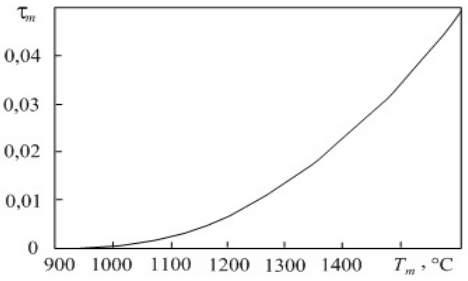


Рис. 3. Зависимость относительного времени τ_m от максимальной температуры нагрева поверхности T_m

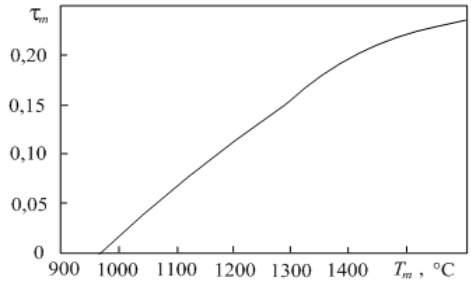


Рис. 4. Зависимость относительной глубины упрочненного слоя Z_m от максимальной температуры нагрева поверхности T_m

По данным табл. 1 и 2 методом регрессионного анализа получено приближенное уравнение для расчета глубины упрочнения

$$Z_m = 0{,}7838 \cdot (1-\theta)^{1{,}1485} \qquad (1)$$

при использовании которого ошибка в наиболее распространенном диапазоне глубин Z = 0,1–0,3 не превышает 0,003.

После соответствующих преобразований получаем уравнение для расчета глубины упрочнения:

$$z = Z \cdot \sqrt{4at_0} = Z \cdot \sqrt{\frac{4ad}{V}}, \qquad (2)$$

где $Z_m = 0{,}7838 \cdot (1-\theta)^{1{,}1485}$, $\theta = (T_a - T_0)/(T_m - T_0)$, $T_m - T_0 = \dfrac{2\eta UI}{c\gamma b \cdot \sqrt{\pi adV}}$.

Входящие в уравнения постоянные коэффициенты $c\gamma$, ad для повышения точности расчетов целесообразно вычислить, используя экспериментальные данные по глубине упрочнения z и максимальной температуре нагрева поверхности T_m:

$$c\gamma = \frac{4\eta UI}{\sqrt{\pi} \cdot bV \cdot (T_m - T_0) \cdot (z/Z)}, \qquad ad = \frac{V}{4} \cdot (z/Z^2). \qquad (3)$$

В работе [6] при анализе процессов упрочнения бандажной стали марки 2 рассматривается время охлаждения $t_{8/5}$ в интервале температур 800–500 °С, а также средняя скорость

охлаждения в интервале температур 600–500 °С. Выражения для расчета времени $t_{8/5}$ и скорости W_{550} при средней температуре 550 °С можно получить из следующих соображений.

Для поверхности $\theta = \sqrt{\tau+1} - \sqrt{\tau}, \quad \tau = \frac{1}{4}\cdot\left(\frac{1}{\theta} - \theta\right)$ безразмерная скорость охлаждения W составляет

$$W = \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{\tau+1}} - \frac{1}{\sqrt{\tau}}\right), \tag{4}$$

а истинная скорость охлаждения

$$w = \frac{dT}{dt} = \frac{(T_m - T_0)}{t_0}\cdot\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{(T_m - T_0)}{t_0}\cdot W. \tag{5}$$

Тогда $t_{8/5} = t_0\cdot\tau_{8/5}$,

$$\tau_{8/5} = \frac{1}{4}\cdot\left[\left(\frac{1}{\theta_{500}} - \theta_{500}\right)^2 - \left(\frac{1}{\theta_{800}} - \theta_{800}\right)^2\right], \qquad \theta_{500} = \frac{500 - T_0}{T_m - T_0}, \tag{6}$$

$$w_{550} = \frac{T_m - T_0}{t_0}\cdot W_{550}, \qquad W_{550} = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{1}{\sqrt{\tau_{550}}} - \frac{1}{\sqrt{\tau_{550}+1}}\right). \tag{7}$$

(знак скорости изменен на положительный). Относительное время охлаждения на глубине определяется выражением $\tau_{8/5} = \tau_{500} - \tau_{800}$, а относительные времена τ_{500}, τ_{550} и τ_{800} рассчитываются по уравнению (6). Относительная скорость охлаждения на глубине равна

$$W_{550} = \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{4}\cdot\int_0^1 \frac{\left[2Z^2 - (\tau_{550}+\tau')\right]d\tau'}{\sqrt{(\tau_{550}+\tau')^5}}\cdot e^{-\frac{Z^2}{\tau_{550}+\tau'}}. \tag{8}$$

Результаты расчетов относительных величин времени $\tau_{8/5}$ и скорости W_{550} в зависимости от максимальной температуры нагрева поверхности T_m при T_a = 950 °С и T_0 = 0 °С представлены в табл. 3 и на рис. 5 и 6. Как видно, при любых температурах нагрева поверхность и подповерхностные слои бандажа охлаждаются одинаково и, следовательно, для определения условий упрочнения всего слоя достаточно рассчитать соответствующие условия для поверхности.

Таблица 3

T, °С	τ_{500}	τ_{550}	τ_{800}	в глубине		на поверхности	
				$\tau_{8/5}$	W_{550}	$\tau_{8/5}$	W_{550}
1000	0,5608	0,4004	0,049	0,5118	0,3663	0,5119	0,3663
1100	0,7484	0,5492	0,0913	0,6571	0,2666	0,6568	0,2667
1200	0,9502	0,7093	0,1389	0,8113	0,2014	0,8098	0,2015
1300	1,1675	0,8817	0,1918	0,9757	0,1563	0,9722	0,1565
1400	1,4013	1,0672	0,2500	1,5371	0,1240	1,1446	0,1242
1500	1,6521	1,2665	0,3138	1,3383	0,1001	1,3278	0,1004
1600	1,9205	1,4799	0,3834	1,5371	0,0821	1,5219	0,0824

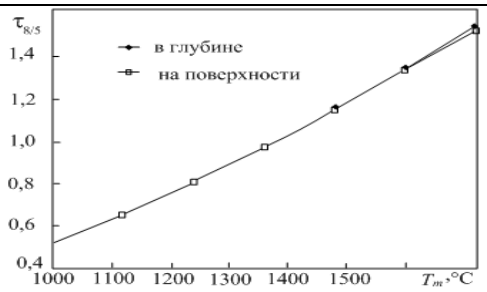


Рис. 5. Зависимость относительного времени охлаждения $\tau_{8/5}$ в интервале температур 800–500 °С от максимальной температуры нагрева поверхности T_m

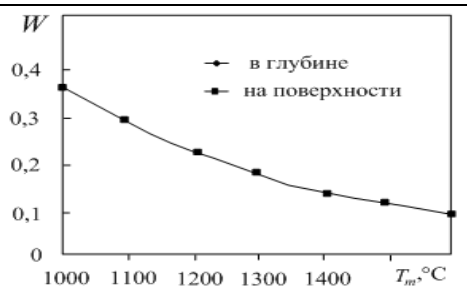


Рис. 6. Зависимость относительной скорости охлаждения W при температуре 550 °С от максимальной температуры нагрева поверхности T_m

Таким образом, для увеличения глубины упрочнения необходимо повышать температуру нагрева поверхности бандажа до значений, близких к температуре плавления, а также увеличивать время нагрева поверхности, что может быть достигнуто использованием источников тепла большого диаметра или применением не только поперечных, но и продольных колебаний источника.

Список литературы

1. *Буйносов А.П., Шепелева И.О.* Моделирование упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 2. С. 86-89.
2. *Коротков В.А., Трошин О.В., Бердников А.А.* Плазменная закалка сканируемой дугой без оплавления поверхности // Физика и химия обработки материалов. 1995. № 2. С. 101-106.
3. *Буйносов А.П., Шепелева И.О*. Сравнение результатов полученных на модели теплового процесса упрочнения стали бандажей колесных пар электровозов с экспериментами // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 91-93.
4. *Домбровский Ю.М.* Кинетика нагрева стали сканируемой воздушно-плазменной дугой // Сварочное производство. 1998. № 11. С. 15-18.
5. *Буйносов А.П., Шепелева И.О.* Увеличение ресурса колесных пар электровозов за счет плазменного упрочнения гребней бандажей // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 6. С. 182-185.
6. *Шоршоров М.Х., Барашков А.С.* К оценке эффективного радиуса подвижного нормально-кругового источника на поверхности плоского слоя по ширине зоны проплавления // Сварочное производство. 1990. № 2. С. 40-42.

05.07.05

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, liliya85@gmail.com, modorsky@pstu.ru, president@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КОЛЕБАНИЯ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА В СИСТЕМЕ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ»

В работе представлены результаты численного моделирования влияния кинематических параметров на колебания лопаток модельного компрессора ГПА в динамической системе «газ-конструкция». Рассмотрен случай консольного закрепления лопаток. При различных скоростях потока, а также при различных углах сдвига фаз между колебаниями лопаток исследуются газодинамические силы, действующие на конструкцию. Показано, что сдвиг фаз между изменением соответствующих газодинамических сил, действующих на лопатки и колебаниями лопаток может не соответствовать сдвигам фаз между колебаниями лопаток.

Ключевые слова: *численное моделирование, лопатки осевого компрессора, фазовый сдвиг, компрессор ГПА, ANSYSCFX.*

Чтобы выявить опасные режимы, типа «флаттер», при которых конструкция может выйти из строя необходимо проведение натурных экспериментов, что связано со значительными финансовыми затратами. При нынешнем развитии вычислительных технологий, с использованием суперкомпьютерных мощностей, можно осуществить численные расчеты, частично заместив натурные эксперименты. При условии необходимой верификации численных расчетов, с их помощью можно в короткие сроки с приемлемыми затратами выявить режимы типа «флаттер». В данной работе рассмотрено влияние вибраций на газодинамику, а также влияние газодинамики на конструкцию в рамках решения однонаправленной динамической связанной задачи FSI.

Для численного моделирования быстропротекающих газодинамических процессов использовался программный комплекс ANSYS CFX. Вычислительные эксперименты проводились на кластере Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ).

Сформулирована следующая физическая постановка задачи:

- процессы рассматриваются трехмерными динамическими; в качестве рабочего тела выбран воздух, который рассматривается как сжимаемый; расчетная схема включает в себя два подвижных тела, которые имитируют две соседние лопатки компрессора; подвижные тела имеют консольное закрепление; к лопаткам прикладывается вибрационная нагрузка, изменяющаяся по гармоническому закону. Принимается, что лопатки могут совершать независимые колебания одинаковой частоты, но отличающиеся по фазе. При этом на лопатках фиксируется распределение газодинамических сил. Предполагается, что если равнодействующая газодинамических сил синфазна возмущающей вибрационной составляющей, то колебания могут усиливаться. Если эти колебания происходят со сдвигом фаз, то в зависимости от его величины возможно как усиление, так и ослабление колебаний. Работа компрессора заменяется моделированием потока, набегающего со скоростью, соответствующей тангенциальной скорости при вращении с ω=3000, 6000 и 9000 об/мин. Сдвиг фаз между колебаниями соседних лопаток в расчетах принимался равным следующим фиксированным значениям: 0, $\pi/4$, $\pi/2$, $3\pi/4$, π . Расчетная схема показана на рисунке 1.

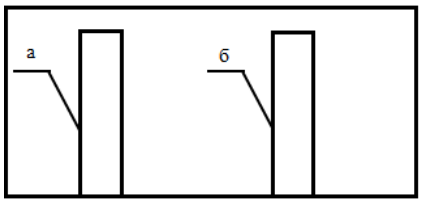


Рис. 1- Расчетная схема расположения лопаток:
а – левая лопатка; б – правая лопатка

Математическая модель включает в себя следующие соотношения:

−закон сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0, \tag{1}$$

−закон сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \nabla\left(\left(\mu + \mu_t\right)\left(\nabla \vec{V} + \left(\nabla \vec{V}\right)^T\right)\right), \tag{2}$$

−закон сохранения энергии

$$\frac{\partial\left(\rho H\right)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\nabla H\right), \tag{3}$$

где t - время; ρ - плотность; V - скорость; P – давление; μ - динамическая вязкость; μ_t - турбулентная динамическая вязкость; H - энтальпия; c_p - теплоемкость; λ - коэффициент теплопроводности; Pr_t - турбулентное число Прандтля.

Используется известная $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Вводятся следующие соотношения:

$$\frac{\partial\left(\rho k\right)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} k) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + \mu_t G - \rho\varepsilon, \tag{4}$$

$$\frac{\partial\left(\rho \varepsilon\right)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

где $G = D_{ij}\frac{\partial V_i}{\partial x_i}$, $D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3}\left(\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\rho k}{\mu_t}\right)\delta_{ij}$, $S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$, σ_k =1, σ_ε =1,3, C_1 =1,44, C_2 =1,92, f_1 =1, k - турбулентная энергия, ε - скорость диссипации турбулентной энергии, G - определяет скорость генерации турбулентной энергии, S_{ij} - удвоенный тензор скоростей деформации.

Уравнение турбулентной вязкости вычисляется по формуле Колмогорова-Прандтля:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \tag{5}$$

где C_μ =0,09 – константа.

−уравнение состояния

$$P = \rho RT, \tag{6}$$

где R - газовая постоянная.

Математическая модель замыкается начальными и граничными условиями. Начальные значения температуры и давления следующие: $T_{нач}$ = 20˚C, $P_{нач}$=0.1МПа, $V_{потока}$={3000, 6000, 9000} об/мин.

Получены следующие результаты: в таблице 1 в колонке 1 представлены сдвиги фаз колебаний соседних лопаток (заданы) и газодинамических сил (получены расчетным путем, колонка 2), а также сдвиги между колебаниями лопатки и газодинамической силы, действующей на нее, для каждой лопатки (колонка 3 – левая лопатка, по рис.1, колонка 4 – правая лопатка, по рис.1) Расчеты показали, что при заданной фазе колебаний лопаток $\varphi_к$ равной 0˚, газодинамические силы на лопатках работают синфазно ($\varphi_{газ}$= 0˚). При заданной фазе колебаний лопаток $\varphi_к$ равной 180˚, газодинамические силы на лопатках работают в противофазе ($\varphi_{газ}$=180˚), что одинаково для всех трех скоростей потока. При заданных фазах 45˚, 90˚ и 135˚, мы наблюдаем различные фазы между лопатками $\varphi_к$ и газодинамическими силами, действующим на них $\varphi_{газ}$, при различных скоростях потока.

Таблица 1- Сдвиги фаз колебаний в конструкции и в газе.

Конструкция	Газодинамика	Газодинамика-конструкция	
		Сдвиг фаз колебаний между лопаткой и действующей на нее газодинамической силой	
$\varphi_к$ *Сдвиг фаз колебаний соседних лопаток*	$\varphi_{газ}$ *Сдвиг фаз колебаний газодинамических сил, действующих на соседние лопатки*	$\varphi_{лев}$ *Левая лопатка*	$\varphi_{прав}$ *Правая лопатка*
1	2	3	4
$V_{потока}$=3000 об/мин			
0	0	0	0
$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$
$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$
π	π	π	π
$V_{потока}$=6000 об/мин			
0	0	0	0
$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$
$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$	$\pi/2$
$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	$3\pi/4$
π	π	π	π
$V_{потока}$=9000 об/мин			
0	0	0	0
$\pi/4$	0	0	$-\pi/4$
$\pi/2$	π	0	$-\pi/2$
$3\pi/4$	$\pi/2$	$\pi/2$	$3\pi/4$
π	π	π	π

Выводы:

1. Наиболее опасные режимы соответствуют значениям $\varphi_К$ = 0, а безопасные $\varphi_К = \pi$.

2. Выявлено, что при варьировании в рассмотренном диапазоне значений, скоростью потока при $\varphi_К = \pi$ существенного влияния на сдвиг фаз $\varphi_{лев}$ и $\varphi_{прав}$ нет.

3. При $\varphi_к = 3\pi/4$ возможно усиление вибраций на одной из каждой пары лопаток в широком диапазоне скоростей.

4. При $\varphi_к = \pi/4; \pi/2$ возможно как усиление ($V_{потока}$=3000, 9000 об/мин), так и ослабление ($V_{потока}$=6000 об/мин) колебаний [1–7].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877)

Список литературы

1. *Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский,* Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора. Научно-технический вестник Поволжья. №5 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – 392 с. (264-268стр.) ISSN 2079-5920.

2. *Бутымова Л.Н.* Исследование колебательных процессов на резонансных режимах в модельной установке / Бутымова Л.Н., Модорский В.Я. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. –№6 – С. 193-196

3. *Бутымова Л.Н.* Исследование колебательных процессов на резонансных режимах в модельной установке / Бутымова Л.Н., Модорский В.Я., Ю.В. Соколкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. –№6 – С. 197-200

4. *Бутымова Л.Н.* Исследование газодинамического потока и конструкции в модельной экспериментальной установке /Бутымова Л.Н., Модорский В.Я. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2014. Т. 3, № 2. С. 92-100.

5. *Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.* Газоупругие процессы в энергетических установках. – М. Наука, 2007 – 176 с.

6. *Mekhonoshina EV, Modorskiy VYa*. On a phase-shift of waves at the medium interface 2015; 39(3): 385-91.

7. *Мехоношина, Е.В*. О сдвиге фаз волн на границе двух сред / Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С, 385-391.

05.07.05

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, liliya85@gmail.com, modorsky@pstu.ru, president@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА НА СИСТЕМУ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ»

В работе представлены результаты численного моделирования влияния колебаний лопаток модельного компрессора ГПА на систему «газ-конструкция». Показано, что сдвиг фаз в колебаниях соседних лопаток не всегда соответствует сдвигу фаз газодинамических сил, действующих на лопатки. Сделан вывод о необходимости исследования факторов, влияющих на сдвиг фаз колебаний в газе относительно колебаний конструкции для гашения вибраций. На модельной задаче обнаружено, что несинхронное колебание лопаток может приводить к гашению или ослаблению колебаний.

Ключевые слова: *численное моделирование, лопатки осевого компрессора, фазовый сдвиг, компрессор ГПА, ANSYS CFX.*

Как известно, борьба с вибрациями в компрессоре идет по пути совершенствования технологических параметров и балансировочных мероприятий. Вместе с тем, недостаточно изучено влияние газодинамических параметров на конструкцию и их зависимость от вибраций. Это требует решения связанных динамических задач газоупругости. В данной работе рассмотрено влияние вибраций на газодинамику и возможное влияние газодинамики на конструкцию в рамках решения однонаправленной динамической связанной задачи FSI, что можно рассматривать как первый этап решения более общей двунаправленной задачи.

Для численного моделирования быстропротекающих газодинамических процессов использовался программный комплекс ANSYS CFX, при проведении вычислительных экспериментов использовался кластер Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), имеющий следующие технические характеристики:

88 вычислительных узлов; 128 четырехядерных процессоров «Barcelona-3» (всего 512 ядер); 48 восьмиядерных процессоров «IntelXeon E5-2680» (всего 384 ядра); пиковая производительность 20 Тфлопс; производительность в тестовом пакете Linpack 78%; объем системы хранения информации 12 ТБ; объем оперативной памяти 128 Гбайт/узел; операционная система Windows HPC Server 2008; 13-е место в рейтинге ТОП-50 в СНГ (по состоянию на 01.09.2008г.).

Сформулирована следующая физическая постановка задачи:

- процессы рассматриваются трехмерными динамическими; в качестве рабочего тела выбран воздух, который рассматривается как сжимаемый; расчетная схема включает в себя два подвижных тела, которые имитируют рабочие поверхности двух соседних лопаток компрессора; для простоты принимается, что элементы поверхности лопаток движутся параллельно; к лопаткам прикладывается вибрационная нагрузка, изменяющаяся по гармоническому закону. Принимается, что лопатки могут совершать независимые колебания одинаковой частоты, но отличающиеся по фазе. При этом на лопатках фиксируется распределение газодинамических сил. Предполагается, что если равнодействующая газодинамических сил синфазна возмущающей вибрационной составляющей, то колебания могут усиливаться. Если эти колебания происходят со сдвигом фаз, то возможно как усиление, так и ослабление колебаний в зависимости от величины сдвига фаз.

Математическая модель включает в себя следующие соотношения:

−закон сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0, \qquad (1)$$

−закон сохранения импульса

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla P + \nabla\left(\left(\mu + \mu_t\right)\left(\nabla \vec{V} + \left(\nabla \vec{V}\right)^T\right)\right), \quad (2)$$

−закон сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} H) = \frac{\partial P}{\partial t} + \nabla\left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{\mathrm{Pr}_t}\right)\nabla H\right), \quad (3)$$

где t - время; ρ - плотность; V - скорость; P – давление; μ - динамическая вязкость; μ_t - турбулентная динамическая вязкость; H - энтальпия; c_p - теплоемкость; λ - коэффициент теплопроводности; Pr_t - турбулентное число Прандтля.

Используется известная $k-\varepsilon$ модель турбулентности. Вводятся следующие соотношения:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} k) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\nabla k\right) + \mu_t G - \rho\varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V} \varepsilon) = \nabla\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k}\mu_t G - C_2 f_1 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

где $G = D_{ij}\frac{\partial V_i}{\partial x_i}$, $D_{ij} = S_{ij} - \frac{2}{3}\left(\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\rho k}{\mu_t}\right)\delta_{ij}$, $S_{ij} = \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}$, σ_k =1, σ_ε =1,3,

C_1 =1,44, C_2 =1,92, f_1 =1, k - турбулентная энергия, ε - скорость диссипации турбулентной энергии, G - определяет скорость генерации турбулентной энергии, S_{ij} - удвоенный тензор скоростей деформации.

Уравнение турбулентной вязкости вычисляется по формуле Колмогорова-Прандтля:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где C_μ =0,09 – константа.

−уравнение состояния

$$P = \rho RT, \quad (6)$$

где R - универсальная газовая постоянная.

Математическая модель замыкается начальными и граничными условиями. Начальные значения температуры и давления следующие: $T_{нач}$ = 20˚С, $P_{нач}$=0.1МПа.

Получены следующие результаты, в таблице 1 представлены сдвиги фаз колебаний в конструкции (заданы) и в газе (получены расчетным путем). Можно сказать, что при заданной фазе колебаний лопаток равной 0˚, газодинамические силы на лопатках работают синфазно. При заданных фазах 45˚ и 180˚, мы также наблюдаем фазу 180˚ между газодинамическими силами на лопатках. При заданных фазах 90˚ и 135˚ газодинамические силы на лопатках сдвинуты на 90˚.

Таблица 1- Сдвиги фаз колебаний в конструкции и в газе.

	Конструкция. Сдвиг фаз колебаний лопаток	Газодинамика. Сдвиг фаз колебаний газодинамических сил, действующих на лопатки	Соответствие рисунку
Фаза	0˚	0˚	1а
	45˚	180˚	1б
	90˚	90˚	1в
	135˚	90˚	1г
	180˚	180˚	1д

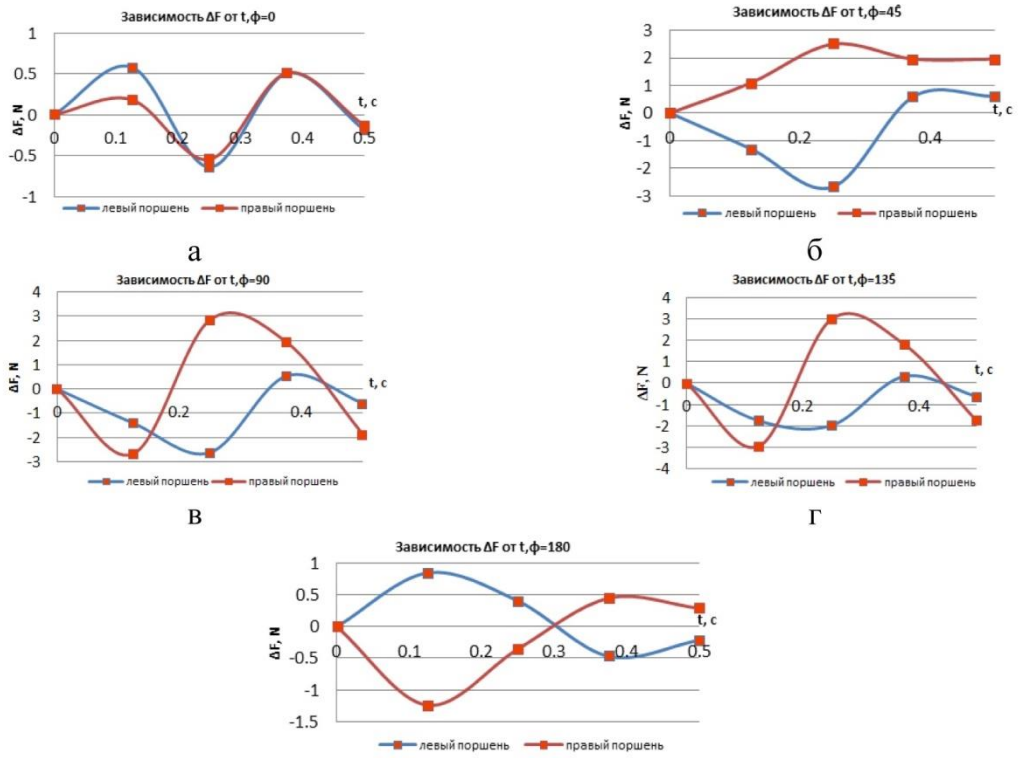


Рис. 1– Зависимость газодинамических сил от времени при следующих значениях сдвига фаз колебаний соседних лопаток: а – φ=0˚; б – φ=45˚; в – φ=90˚; г – φ=135˚; д – φ=180˚

Выводы:

1. Сдвиг фаз в колебаниях соседних лопаток не всегда соответствует сдвигу фаз газодинамических сил, действующих на лопатки.

2. Необходимо исследовать факторы, влияющие на сдвиг фаз колебаний в газе относительно колебаний конструкции для гашения вибраций.

3. Несинхронное колебание лопаток может приводить к гашению или ослаблению колебаний. Можно предположить, что это объясняет факт гашения колебаний при нечетном числе лопаток [1–7].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Список литературы

1. *Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский,* Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора. Научно-технический вестник Поволжья. №5 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – 392 с. (264-268стр.)ISSN 2079-5920.

2. *Бутымова Л.Н.* Исследование колебательных процессов на резонансных режимах в модельной установке / Бутымова Л.Н., Модорский В.Я. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. –№6 – С. 193-196

3. *Бутымова Л.Н.* Исследование колебательных процессов на резонансных режимах в модельной установке / Бутымова Л.Н., Модорский В.Я., Ю.В. Соколкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. –№6 – С. 197-200

4. *Бутымова Л.Н.* Исследование газодинамического потока и конструкции в модельной экспериментальной установке / Бутымова Л.Н., Модорский В.Я. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика». 2014. Т. 3, № 2. С. 92-100.

5. *Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.* Газоупругие процессы в энергетических установках. – М. Наука, 2007 – 176 с.

6. *Mekhonoshina EV, Modorskiy VYa*. On a phase-shift of waves at the medium interface 2015; 39(3): 385-91.

7. *Мехоношина, Е.В*. О сдвиге фаз волн на границе двух сред / Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С, 385-391.

05.13.01

В.В. Бухтояров[1], А.К. Данилов[2], Н.В. Иванов[3], В.С. Тынченко[4]

[1]Сибирский федеральный университет, кафедра Технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, Красноярск, vladber@list.ru
[2]Сибирский федеральный университет, кафедра Технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, Красноярск, danilov_ak@mail.ru
[3]Сибирский федеральный университет, Институт нефти и газа, Красноярск, nikita-krsk@mail.ru
[4]Сибирский федеральный университет, кафедра Технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, Красноярск, vadimond@mail.ru

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье представлены результаты разработки и исследования подхода к решению задач моделирования, в основе которого лежит пример алгоритмического комплекса для ЭВМ и проводится анализ системы мониторинга (контроль, оценка, прогнозирование), базирующаяся на применении методов системного анализа для принятия управленческих решений в условиях большого количества информации.

Приведены результаты численных исследований эффективности предлагаемой системы диагностики на наборе тщательно сгенерированных данных.

Ключевые слова: *моделирование, прогнозирование, диагностирование, искусственные нейронные сети, надежность.*

Введение

Нефтеперекачивающие станции состоят из большого количества оборудования, которое в свою очередь требует постоянного контроля и обслуживания. Отсутствие непрерывного контроля за столь большим количеством оборудования, ведет к увеличению частоты аварийных ситуаций и значительному снижению срока службы нефтеперекачивающего оборудования [1-2].

Предлагаемый подход

В рамках проводимых исследований предлагается для повышения надежности нефтеперекачивающего оборудования разработать систему диагностики и апробировать ее на примере подпорных насосов. В состав которой входит формирование базы данных; обновление и обработка базы данных; расчет и анализ показателей надежности; прогнозирование показателей надежности; принятие решений по повышению надежности объекта.

Дадим краткую характеристику каждому этапу системы диагностики.

Формирование базы данных (ФБД). Формируется база данных о фактических и нормативных параметрах, характеристиках и показателях надежности объекта от начала эксплуатации до настоящего момента. Для наиболее корректного их прогнозирования, производится паспортизация. База данных обновляется в режиме реального времени дважды: до и по результатам анализа и прогнозирования.

Обработка базы данных (ОБД). По результатам обработки у каждого объекта на различных иерархических уровнях создается комплекс показателей надежности, характеризующих способность объекта сохранять эксплуатационные параметры в заданных пределах.

Расчет и анализ показателей надежности. На данном этапе производится расчет единичных и комплексных показателей надежности оборудования. Так как измеряемые показатели имеют свой вес и силу, был применен метод экспертной оценки. Поэтому каждый показатель, как единичный, так и комплексный имеет свой весовой коэффициент. Далее производится анализ по интегральному показателю $N_{\text{сист}}$ путем сравнения с нормативными и

критическими значениями. Целью анализа является выявление «слабого звена» и принятие решения о необходимости технического вмешательства.

Прогнозирование показателей надежности. Для прогнозирования рассматриваемого показателя надежности был использован метод на прогнозирования на основе искусственных нейронных сетей. По результатам прогнозирования предполагается определять моменты времени, когда значения показателей надежности достигнут критических, и потребуется техническое вмешательство.

Принятие решений по повышению надежности объекта. В соответствии с полученными значениями корректируется продолжительность междиагностического и межремонтного периодов. Принятие решений может производиться экспертами или электронной экспертной системой [3].

Можно отметить, что особенностью разработанного алгоритма системы мониторинга непрерывного сканирования показателей надежности является возможность реализации расчетных многофакторных моделей в режиме реального времени. Безусловно, такая система, сориентированная на оптимизацию технологических процессов эксплуатации производства, может быть реализована только с применением теории математического программирования.

Далее приводятся условия и результаты вычислительных экспериментов рассматриваемого подхода.

Апробация методики комплексной оценки показателей надежности

Методика комплексной оценки апробирована при оценке надежности на анализах расчета показателей надежности нефтеперекачивающего оборудования, а именно на примере показателей работы подпорных насосов [4].

Анализ технологических параметров проводился в соответствии с рассматриваемым алгоритмическим комплексом и методикой оценки. На основании анализа технологической схемы объекта, была построена индивидуальная схема расчета показателей надежности подпорной насосной станции.

Расчетные зависимости реализованы с применением программ Mathcad, Microsoft Excel и Statistica. Результаты проведенного по разработанной схеме анализа надежности оформлялись в виде таблиц и графических зависимостей. При апробации модели и алгоритма была обработана выборка, содержащая по 60 данных к каждому фиксируемому параметру. В связи с отсутствием данных с производства, выборка была построена по нормальному закону распределения и максимально приближена к реальным показателям оборудования.

Графическая иллюстрация полученных по результатам вычислений в программе Excel и Mathcad приведена на рисунке 1.

Проанализировав данный график и сравнив его с критическими параметрами подпорного насоса, можно сделать вывод: при $N \in [0; 0{,}8)$ – работа нормальная; при $N \in [0{,}8; 0{,}9)$ – предаварийная ситуация; при $N \in [0{,}9; 1]$ – аварийная ситуация (требуется капитальный ремонт);

Предаварийные и аварийные ситуации, возникающие при эксплуатации нефтеперекачивающего оборудования, происходят по различным факторам. Это систематические факторы, происходят циклически, возникающие при обычном усталостном износе оборудования, а так же при резком выходе из строя некоторых узлов оборудования. Из графика на рисунке 2 видно, что в течение 60 дней подпорная насосная работала в нормальном режиме до 52-го дня, далее возникает предаварийная и аварийная ситуация.

Разработанная система позволяет не только контролировать работу подпорной насосной станции, но и прогнозировать показатели нефтеперекачивающего оборудования, во избежание предаварийных и аварийных ситуаций.

Рисунок 1 – Прогноз показателя надежности подпорной насосной станции

Прогнозирование производилось при помощи программного обеспечения «STATSOFT Statistica», следующим образом, на основании предыдущих 50 дней был произведен прогноз на 10 отсчетов (дней) вперед. Сравнение реальных данных с полученными в результате расчетов показателями показало, что ошибка прогноза составила 7,86%.

Выводы

1. Для анализа и управления надежностью системы сформирована структура, которая в режиме реального времени позволяет: производить оценку показателей надежности каждого элемента системы на любом уровне определить наиболее уязвимые элементы;
2. Созданная модель была апробирована на примере диагностики подпорных насосов, была проведена комплексная оценка на различных уровнях и узлах подпорных насосов.
3. На основании комплексной оценки показателей надежности подпорных насосов, было произведено прогнозирование итоговых показателей насосной станции с ошибкой прогнозирования менее 8%, что благоприятно повлияет на эксплуатацию нефтеперекачивающего оборудования.

Список литературы

1. *Коршак, А.А.* Диагностика объектов нефтеперекачивающей станции: Учебное пособие / А.А. Коршак, Л.Р. Байкалова. – Уфа.: ООО «ДизайнПолиграфСервис», 2008. – 176 с.
2. *Земенков, Ю.Д., Кутузова, Т.Т.* Прогнозирование опасностей на нефтепроводных системах // Известия вузов. – 1997. – №6 – 133 с.
3. *Земенков, Ю.Д., Архипова, В.П., Забазнов, А.И.* Прогнозирование мест повышенной опасности на продуктопроводах // Проблемы освоения нефтегазовых ресурсов Западной Сибири: Межвуз. сб.научн.тр. – Тюмень: ТюмИИ, 1990. – 146-150 с.
4. *Земенкова, М.Ю.* Системный мониторинг показателей надежности объектов трубопроводного транспорта: дис. …канд.техн.наук: 05.13.01/ Земенкова Мария Юрьевна. – Тюмень,2007. – 167 с.

05.13.15

Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин д.т.н

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»,
факультет автоматики и вычислительной техники, кафедра электронных вычислительных машин, Киров, vodimitriy@rambler.ru

ГИБРИДНАЯ ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ

Предлагается структура гибридной системы логического вывода с определением фактов. Оценивается эффективность программной реализации гибридной системы логического вывода.

Ключевые слова: *система логического вывода, дедуктивный логический вывод, процедура деления дизъюнктов, определение фактов.*

Качество работы системы логического вывода оценивается критериями эффективности, к которым относятся [1]: понятность, удобство интерфейсов, качество предлагаемых решений, производительность, время отклика и т. д. На практике перечисленные критерии могут оказаться взаимоисключающими. Например, повышение производительности в вычислительных системах, содержащих только одно вычислительное устройство со скалярной архитектурой (определим их, как гомогенные), всегда сопровождается увеличением нагрузки на центральный процессор (ЦП), что снижает удобство работы пользователя и ограничивает ресурсы операционной системы. Поэтому возникает задача разработки систем логического вывода (СЛВ), позволяющих повышать производительность, за счёт использования графического процессора (ГП), а, следовательно, снижать негативное влияние критериев эффективности друг на друга.

В работе предлагается структура гибридной (содержащей центральный и графический процессоры) СЛВ, позволяющей повысить производительность логического вывода, за счёт более эффективного использования вычислительных ресурсов.

Структура системы логического вывода. Обобщенная структура СЛВ приведена на рисунке 1.

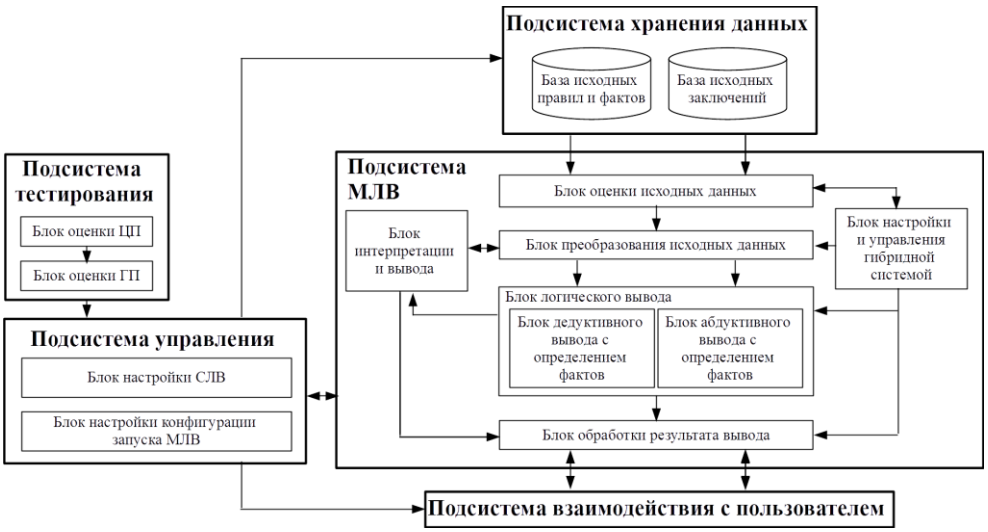


Рис. 1– Структура системы логического вывода

Система логического вывода включает пять подсистем:

- подсистема тестирования гибридной вычислительной системы;
- подсистема управления СЛВ;
- подсистема хранения данных;
- подсистема машины логического вывода (МЛВ);
- подсистема взаимодействия с пользователем.

Подсистема тестирования гибридной вычислительной системы (ВС) состоит из блоков тестирования ЦП и ГП. Основная функция данной системы - это определение оценки производительности ВС. Полученная оценка передается в подсистему управления СЛВ для установки параметров запуска подсистемы МЛВ.

Подсистема управления СЛВ настраивает и контролирует работу остальных подсистем. Состоит из блока настройки СЛВ и блока конфигурации запуска подсистемы МЛВ. Получая информацию о производительности и оптимальной потоковой конфигурации из подсистемы тестирования, а также о размерности исходной базы знаний из подсистемы МЛВ, выбирает эффективный вариант распределения вычислительной нагрузки, при выполнении дедуктивного метода логического вывода с определением фактов.

Подсистема МЛВ реализует выполнение методов логического вывода с определением фактов. Данные методы основаны на процедуре деления дизъюнктов с определением фактов. Кроме того, в абдуктивном методе логического вывода используется процедура деления дизъюнктов без определения фактов, позволяя использовать традиционные абдуктивный и дедуктивный методы вывода.

Подсистема хранения данных включает базу исходных правил (фактов) и базу заключений. Подсистема управления СЛВ передаёт в данную подсистему пути к исходным данным, а также основные ограничения на загружаемые данные.

Подсистема взаимодействия с пользователем выводит данные о ходе логического вывода, а также его результаты. В случае выполнения абдуктивного логического вывода с определением фактов через данную подсистему происходит запрос множества возможных фактов для модификации дополнительных посылок.

Режим дедуктивного вывода с определением фактов. В данном режиме в качестве входных и выходных данных используются правила, преобразованные к дизъюнкциям из литералов. Если в базе знаний нет фактов, то СЛВ сообщает об этом внешней программе и предлагает использовать обычный метод дедуктивного вывода, для повышения эффективности вычислительного процесса. Иначе выполняется метод параллельного дедуктивного вывода с поиском фактов, и внешней программе или пользователю выводится признак окончания метода (успех/неудача) и множество фактов, которые привели к успешному решению всей задачи или завершению отдельных процедур [2].

Режим абдуктивного вывода с определением фактов. В данном режиме в качестве входных и выходных данных используются правила, преобразованные к дизъюнкциям из литералов. Если в базе знаний нет фактов, то СЛВ сообщает об этом внешней программе и предлагает использовать обычный метод абдуктивного вывода, для повышения эффективности вычислительного процесса. Иначе выполняется метод абдуктивного вывода с поиском фактов. Внешней программе или пользователю выводится признак окончания метода (успех/неудача), множество реальных фактов, дополнительных фактов и дополнительных посылок. В случае работы с экспертом, СЛВ запрашивает ввод номеров возможных фактов, которые должны быть добавлены в базу знаний. После выбора эксперта (пользователя), СЛВ автоматически выполняет модификацию дополнительных посылок, и выдает их как новое множество дополнительных дизъюнктов [3].

Оценка эффективности системы логического вывода поиска фактов.

Для оценки эффективности вывода была разработана модульная структура и выполнена программная реализация гибридной СЛВ. Система реализована на языке С с расширениями OpenMP и CUDA. Часть процедур написаны на языке MASM. Низкоуровневая оптимизация на уровне одного ядра центрального процессора (ЦП) за счёт использования векторных команд SSE 4.2, позволила увеличить скорость обработки литералов в 10 раз, при обработке упакованных данных от 16 символов, по сравнению со скалярными встроенными процедурами работы со строками среды Visual Studio 2010 [4]. Использование расширений языка С CUDA позволило перенести часть нагрузки с ЦП на графический процессор (ГП): при увеличении объёма обрабатываемых данных до 1280 МБ, производительность выросла на 28%, при этом нагрузка на ЦП была снижена в пять раз.

Выполнено сравнение производительности разработанной гибридной системы логического вывода с гомогенной [5]. В результате при увеличении объёма базы знаний до 12 МБ время преобразование посылок в гибридной системе в пять раз меньше (18 секунд, против 91).

Пример работы. На рисунке 2 показан результат работы параллельного дедуктивного вывода с определением фактов. Процедуры ввода выполняются параллельно, поэтому вывод остатков происходит не по порядку, а по мере вычисления, но результат и индексная функция показывают корректность промежуточных данных и решения всей задачи в целом.

Рис. 2 – Результат параллельного дедуктивного вывода с определением фактов

Вывод. Разработана структурная схема гибридной СЛВ с определением фактов для задач, представленных формулами исчисления высказываний. Особенностью данной СЛВ является наличие подсистемы тестирования, которая позволяет оценить статические и динамические параметры ВС. Полученные в ходе тестирования оценки, используются для выбора оптимальной конфигурации запуска МЛВ. Также в систему введены блоки дедуктивного и абдуктивного вывода с определением фактов (подсистема логического вывода), позволяющие использовать гибридные процедуры и функции для повышения эффективности решения задач методами логического вывода, основанными на процедуре деления дизъюнктов.

Программная реализация гибридной СЛВ, в отличие от гомогенной, показала возможность повышения производительности логического вывода, с одновременным снижением нагрузки на ЦП.

Список литературы

1. *Гаврилова, Т.А.* Базы знаний интеллектуальных систем [Текст] / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.

2. *Вожегов Д.В., Страбыкин Д.А*. Метод параллельного дедуктивного логического вывода с определением фактов. Научно-технический вестник Поволжья. №1 2011г. – Казань : Научно-технический вестник Поволжья, 2011. – С. 97-99.

3. *Вожегов Д.В., Страбыкин Д.А.* Метод параллельного абдуктивного логического вывода с определением фактов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 141–154.

4. *Вожегов Д.В.* Ускорение алгоритма поиска фактов и правил в базе знаний с использованием современных аппаратно-программных средств [Электронный ресурс] / Д. В. Вожегов, / Всероссийская ежегодная научно-практическая конференция «Общество, наука, инновации» (НПК-20I5), ФАВТ: 15-26 апр. 2015 г. : сб. материалов / Вят. гос. уи-т ; отв. ред. С. Г. Литвинец. — Киров, 2015. — 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

5. *Томчук М.Н.* Программа логического вывода с модификацией заключений в исчислении высказываний [Текст] / М.Н. Томчук // Всероссийская научно-техническая конференция «Наука – производство – технологии – экология» : Сборник материалов: В 5 т. – Киров : Изд-во ВятГУ, 2004. – Том 2 – ФАВТ, ФПМТ. – С. 16–19.

05.17.07

Р.О. Волошин, Ю.П. Ясьян

Кубанский государственный технологический университет, институт нефти, газа и энергетики, кафедра технологии нефти и газа, Краснодар**,** r.voloshin@bk.ru

ВЛИЯНИЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИСАДКИ ЦДП НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Представлена существующая потребность рынка дизельных топлив России в присадках. Перечислены преимущества использования жирных кислот таловых масел (ЖКТМ) в качестве противоизносных присадок. Представлены результаты воздействия ЖКТМ на противоизносные свойства дизельных топлив. Проведены исследования по способности полифункциональной присадки ЦДП уменьшать диаметр пятна износа и снижать коэффициент трения.

Ключевые слова: *дизельное топливо, жирные кислоты таловых масел, противоизносные свойства, диаметр пятна износа, коэффициент трения.*

Рост численности транспортных средств и увеличение объемов вредных выбросов в атмосферу привлекает внимание общества к проблеме защиты окружающей среды и необходимости снижения влияния автотранспорта на уровень ее загрязнения. Современные нормативные акты к качеству дизельных топлив (ДТ) содержат не только технические, но и новые экологические требования, при соблюдении которых значительно снижается дымность отработанных газов и уменьшаются объемы выбросов вредных веществ. Однако при получении экологичных топлив класса 4 и 5 практически полностью удаляются серосодержащие соединения, что приводит к критическому ухудшению смазывающей способности ДТ и быстрому износу элементов топливной системы. Одним из способов решения данной проблемы является использование специальных противоизносных присадок [1,2]

Существуюшая потребность в противоизносных присадках на на настоящее время составляет 13 тыс. тонн в год. При этом лишь 2 тыс. тонн присадок выпускаются отечественным производителем на основе отечественного сырья: присадка Байкат ОАО «АЗКиОС» и Комплексал Эко-Д ОАО «НЗМП». Остальные 85% закрываются импортными поставками присадок или их компонентов. Не лучше ситуация обстоит и с другими видами присадок к ДТ: депрессорно-диспергирующими (100% импорт) и цетаноповышающими (65 % импорт) [3,4,5]. Для решения проблемы развития производства отечественных присадок нами были проведены исследования по созданию новой полифункциональной присадки ЦДП на основе российского сырья. Разработанная присадка ЦДП оказывает комплексное воздействие на низкотемпературные, противозносные свойства ДТ, их седиментационную устойчивость и воспламеняемость.

В данной статье подробно рассмотрено влияние композиций присадки ЦДП на улучшение противоизносных свойств ДТ. В качестве активного действующего компонента, улучшающего противоизносные свойства ДТ, были выбраны жирные кислоты таловых масел по следующим причинам: высокая эффективность, низкая цена, доступная сырьевая база – до 50 тыс. тонн в год (являются побочным продуктом целлюлозно-бумажного производства и вырабатываются в ОАО «Сегежский целлюлозо-бумажный комбинат», ООО «Сиблес»). При проведении исследования были созданы композиции ЦДП с различными пропорциями действующих компонентов: дитретбутилпероксида (ДТБП), низкомолекулярного полимера этилена с пропиленом (ПЭП), алкиламина итаконовой кислоты (АИК) и жирных кислот таловых масел (ЖКТМ), преставленные в таблице 1.

Таблица 1 - Состав присадки ЦДП

№ композиции	Содержание компонента, %			
	ДТБП	ПЭП	АИК	ЖКТМ
ЦДП №1	60	19,25	19,25	1,5
ЦДП №2	65	16	16	3
ЦДП №3	40	27,5	27,5	5

Исследования проведены на двух образцах дизельного топлива (ОДТ).

Таблица 2 - Характеристики ОДТ

Наименование показателя	ОДТ №1	ОДТ №2
Плотность при 15 °С, кг/куб.м	841	835
Содержание серы, мг/кг	0,001	0,188
Скорректированный диаметр пятна износа, мкм.	604	409

Результаты экспериментов по влиянию ЖКТМ и различных композиций ЦДП приведены в таблице 3

Таблица 3 - Влияние ЖКТМ и ЦДП на противоизносные свойства ДТ

Наименование композиции присадки	Концентрация присадки	Диаметр пятна износа образца топлива, мкм	
		ОДТ №1	ОДТ №2
	0	604	409
ЖКТМ	0,005	511	370
	0,010	466	341
ЦДП-1	0,1	515	374
	0,2	474	355
	0,3	442	-
ЦДП-2	0,05	471	355
	0,1	430	324
	0,2	384	-
ЦДП-3	0,05	452	334
	0,1	408	301
	0,15	375	-

Наблюдается нелинейная зависимость в части улучшения смазывающих свойств: максимальный эффект достигается при введении 0,005% ЖКТМ в ОДТ№1. Уменьшение диаметра пятна износа выявлено при дальнейшем увеличении концентрации ЖКТМ, но в меньшей степени. ЖКТМ оказывают положительное воздействие и на ОДТ№2 изначально обладающем хорошими смазывающими свойствами, что подтверждает возможность их использования в различных топливах. С учетом комплексного воздействия композиций полифункциональной присадки ЦДП на противоизносные свойства, низкотемпературные характеристики а также воспламеняемость и седиментационную устойчивость в качестве оптимальной и наиболее сбалансированной была выбрана присадка ЦДП №2, в рекомендуемой концентрации до 0,2%. С учетом того, что концентрация ЖКТМ в ЦДП №2 составляет 3%, можно рассчитать эффективность чистого ЖКТМ в композиции. Согласно расчету исходная эффективность ЖКТМ в ЦДП№2 достигается при значениях меньших в 3-6 раз, чем при использовании чистых ЖКТМ. Таким образом, выявлен синергетический эффект воздействия на воздействие ЖКТМ в данной композиции. Вероятнее всего, это связано с межмолекулярным взаимодействие противоизносных присадок с цетаноповышающим компонентом – алкилпероксидом ДТБП. В отличие от классических цетаноповышающих компонентов на основе алкилнитратов, активно сорбирующихся на трущихся поверхностях и вытесняющих противоизносные присадки ввиду многократно большей концентрации, алкилпероксиды равномерно распределяются по всему объему ДТ и не ухудшают действие иных присадок. Положительное влияние ДТБП на ЖКТМ столь

высоко, что увеличивает итоговую эффективность смазывающих свойств присадки даже не смотря на присутствие в ней ухудшающего смазывающие свойства депрессорного компонента.

Эффективность смазывающего действия присадки ЦДП-2 также была оценена по стандарту американского нефтяного института (API) на машине трения NL Baroid Mud и EP/Lubricity Tester (США) путем определения коэффициента трения (Ктр) «металл-металл» в среде углеводородов при различных удельных усилиях прижатия металлической призмы к вращающемуся валу, в том числе стандартном давлении равном 1,03 МПа (150 фунт-сила-дюйм) и частоте вращения вала 60 мин$^{-1}$.

В таблице 4 приведены результаты изменения коэффициента трения от максимальной нагрузки прижатия по ОДТ №2 в зависимости от концентрации присадки ЦДП-2.

Таблица 4 - Влияние присадки ЦДП 2 на коэффициент трения.

Концентрация ЦДП-2, % / Рм, МПа	Коэффициент трения, единиц					
	0	0,025	0,05	0,1	0,2	0,3
0,17	0,20	0,17	0,14	0,10	0,08	0,08
0,52	0,25	0,22	0,17	0,14	0,12	0,12
1,03	**0,31**	**0,27**	**0,24**	**0,20**	**0,18**	**0,18**
1,55	0,36	0,31	0,30	0,26	0,24	0,23
2,59	>0,50	0,48	0,45	0,41	0,40	0,37

В результате экспериментов установлено значительное снижение коэффициента трения в присутствии присадки ЦДП. Так, без присадки Ктр равен 0,31, при концентрации 0,05% снижается до 0,24, а при 0,2% равен 0,18. Причем наиболее эффективное уменьшение Ктр наблюдается до концентрации ЦДП-2 0,05%. Дальнейшее увеличение ее дозировки до 0,2% уменьшает Ктр уже в меньшей степени, а последующее увеличение до 0,3% уже практически не оказывает влияния на раннее достигнутый положительный эффект.

На основании вышесказанного, считаем, что использование присадки ЦДП оправдано в производстве товарных дизельных топлив. Также стоит обратить внимание на выявленный синергизм между цетаноповышающими алкилпероксидами и ЖКТМ, позволяющий снизить концентрации противоизносных присадок и соответственно уменьшить себестоимость товарного дизельного топлива.

Список литературы

1. *Капустин В.М.* Нефтяные и альтернативные топлива с присадками и добавками. – М.: КолосС. 2008. – 232 с.

2. *Данилов А.М.* Применение присадок в топливах. - СПб.: Химиздат, 2010. - 356 с.

3. Стенограмма международного форума «Будущее рынка топливных присадок// ИнфоТЭК. – 2015. - №7. - С. 3-24.

4. Стенограмма международного форума «Будущее рынка топливных присадок// ИнфоТЭК. – 2015. - №8. - С. 3-27.

5. *Полетаева О.Ю.* Противоизносные присадки к топливу// Нефтепереработка и нефтехимия. – 2014. - №5. - С. 33-36.

05.12.04

В.В. Воронин, В.И. Марчук, Н.В. Гапон, Р.А. Сизякин, Д.В. Фоломкин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет», voronin_sl@mail.ru

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ СЦЕНАМИ

В статье описан новый подход для удаления выделенных динамических объектов в видеосигналах, при условии, что объекты перекрывают часть сцены на статичном фоне. Предлагаемый подход позволяет удалять объекты или восстанавливать отсутствующие или испорченные области, используя пространственную и временную информацию соседних кадров. Показана эффективность нового подхода на нескольких примерах в сравнении с известными методами восстановления видеопоследовательностей.

Ключевые слова: *реконструкция, видеопоследовательность, синтез текстуры, AR-модель.*

Видео реконструкция относится к области компьютерного зрения, целью которой является удаление объектов или восстановление отсутствующих или испорченных областей. В видеопоследовательностях встречаются статические изображения, например логотипы каналов, субтитры, дата и время, которые мешают просмотру, закрывая часть изображения от зрителя. Кроме этого, мешающим фактором являются искаженные блоки при работе видеокодека, появление которых объясняется ненадежностью среды передачи данных от кодера к декодеру.

Первые методы реконструкции динамических изображений были основаны на методах, разработанных для восстановления статических изображений [1]. Данные методы не позволяют сохранить временную непрерывность, что ограничивает его применение. Кроме того, подобные методы обычно приводят к размытию границ на изображении.

Задача реконструкции видеопоследовательности может оказаться сложной в силу следующих причин [1]:

а) нестационарный фон: подвижными могут быть не только объекты переднего плана, но так же и элементы заднего плана. Простейшим примером является движение деревьев на ветру на заднем плане сцены;

б) медленное движение объектов переднего плана. Если объект переднего плана движется медленно или неподвижен, он не может быть отличен от фона;

в) непостоянство условий освещения. Освещение сцены часто меняется в зависимости от времени суток и погоды;

г) движение объектов сцены не может быть предсказано заранее. Кроме того, положение камеры относительно сцены может меняться от кадра к кадру;

Таким образом, при разработке конкретного подхода к восстановлению видеопоследовательностей необходимо сделать ряд предположений:

а) на каждом кадре может быть выделен подвижный передний план и неподвижный фон;

б) возможно движение камеры, но только параллельно плоскости сенсора;

в) движущиеся объекты не меняются в размере;

г) вся видеопоследовательность доступна во время обработки.

Эти предположения являются в некотором смысле общими для многих работ посвященных данной теме и представляются достаточно обоснованными.

Целью данной работы является уменьшение погрешности восстановления видеопоследовательностей с динамическими сценами.

В работе [2] Patwardhan и др. предложили метод реконструкции видеопоследовательности на стационарном фоне при линейном перемещении объектов. Предлагается модификация

данного метода с целью обобщения на случай нестационарной камеры и перекрытия объектов друг другом.

Предлагаемые метод включает в себя предварительную обработку и два последующих этапа анализа (рис. 1). Метод итеративно выполняет следующие операции: находит кадр; обновляет модель сцены; обновляет позиции движущихся объектов; заменяет части кадра, занимаемой объектами, отмеченные для удаления с использованием модели фона.

На этапе предварительной обработки осуществляется сегментация каждого кадра на передний (объекты) и задний план (фон). Сегментация используется для построения мозаичного изображения, которое позволяет сократить время при поиске похожих блоков [3]. Объекты переднего плана восстанавливаются с помощью анализа «карты» смещения объекта, на которой формируются шаблоны для копирования недостающих фрагментов. При этом используется такой же подход, как и методе, основанном на поиске похожих блоков [3]. Перекрытые движущиеся объекты переднего плана восстанавливаются двухэтапным процессом, используя сохраненные шаблоны объекта.

Для восстановления фоновой составляющей предлагается использовать раздельное восстановление текстуры и структуры. С этой целью каждый кадр сегментируется на основе геометрической модели активного контура, с помощью решения задачи минимизации функционала энергии:

$$E^{CV}(c_1, c_2, C) = \mu \cdot Length(C) + \lambda_1 \cdot \int_{inside(C)} |u_0(x,y) - c_1|^2 \, dxdy + \lambda_2 \cdot \int_{outside(C)} |u_0(x,y) - c_2|^2 \, dxdy \ ,$$

где μ, λ_1 и λ_2 являются положительными константами, как правило, фиксированные $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$, c_1 и c_2 - средние значения интенсивности u_0 внутри C и за ее пределами C, соответственно.

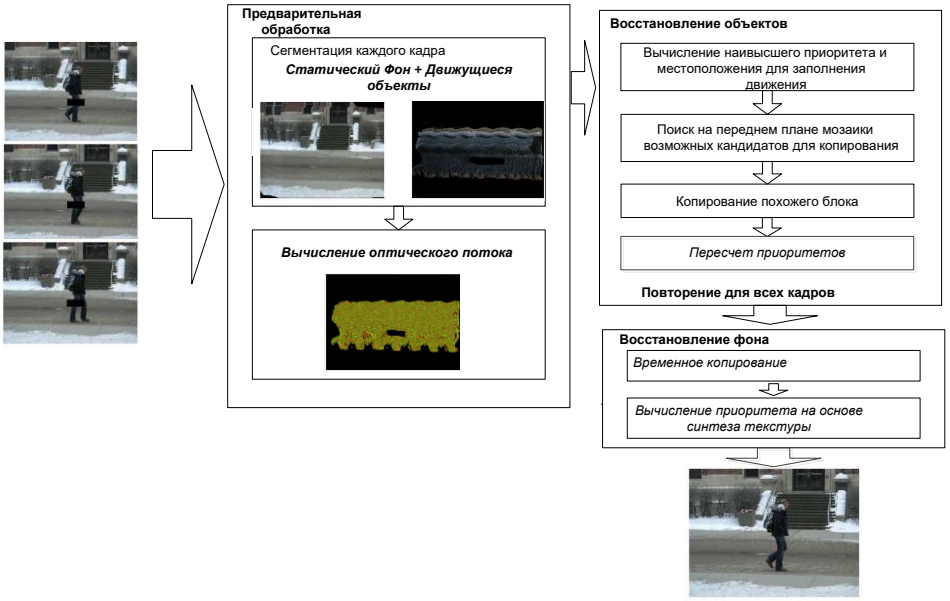
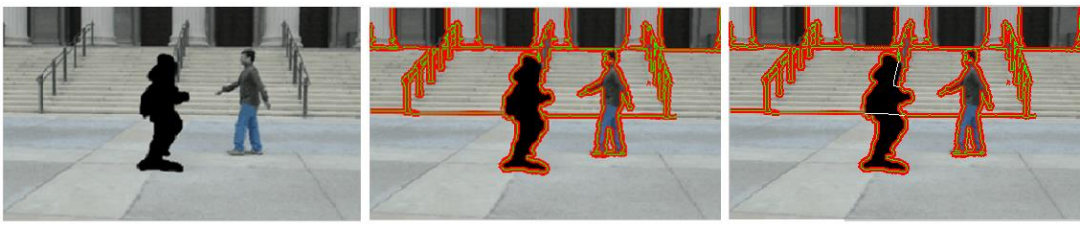


Рис. 1 - Структурная схема метода пространственно-временной реконструкции динамических изображений

На рисунке 2 представлен пример сегментации изображений на основе модели активных контуров.



а) б) в)

Рис. 2 - Сегментация тестовых кадров

Далее повторяются все этапы, как и в случае реконструкции изображений, предложенным методом пространственной реконструкции изображений на основе геометрической модели с контурным и текстурным анализом [4]. Поиск блоков при восстановлении текстуры объекта или фона имеет значительную вычислительную сложность при восстановлении больших участков. В некоторых случаях изображение не имеет достаточного количества блоков для копирования, потому что размер блоков большой или маска находится на особом месте, на изображении, где не могут быть найдены подобные блоки. Проблема выбора подобных блоков, используя только часть блоков, общая для всех *Exemplar-based inpainting* методов [3]. Предлагается решать эту задачу с помощью АР модели прогнозирования потерянных пикселей в блоке [4].

После восстановления по отдельности переднего и заднего плана результирующая видеопоследовательность получается путем совмещения оценок.

Эффективность предлагаемого метода показана на тестовых кадрах видеопоследовательности с потерянными пикселями (рис. 3, a - изображение с отсутствующими пикселями, b – восстановление фона с помощью метода Patwardhan, c – восстановление фона предложенным методом, d – восстановление переднего плана с помощью метода Patwardhan, e - восстановление переднего плана предложенным методом).

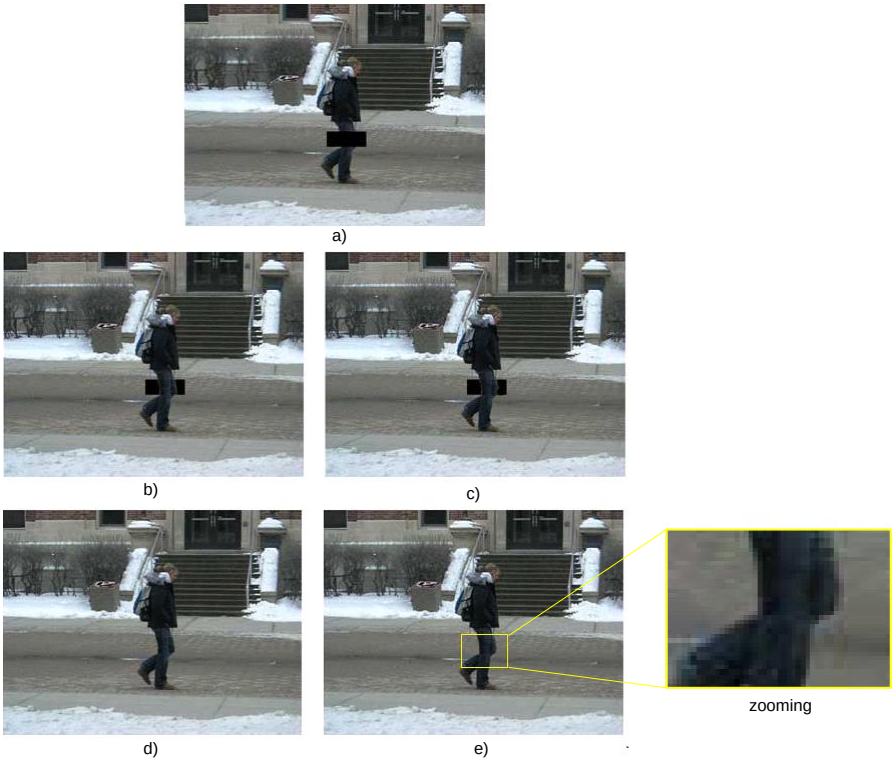


Рис. 3 - Примеры восстановления изображений

Результаты показывают, что предлагаемый метод позволяет правильно восстанавливать структуру и текстуру сцены. Стоит отметить, что метод не смазывает объекты при реконструкции больших участков отсутствующих пикселей.

В заключении можно сделать следующие выводы.

В работе представлен метод пространственно-временной реконструкции динамических изображений на основе текстурно-геометрической модели изображений, который заключается в поиске похожих областей на кадрах видеопоследовательности. В предлагаемом подходе на этапе предварительной обработки используется вычисление оптического потока и низкоуровневых признаков для каждого кадра видеоряда.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №15-37-21124\15.

Список литературы

1. *Bertalmio M., Bertozzi A., Sapiro G.* Navier-Stokes, fluid dynamics, and image and video inpainting// Hawaii: Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 213-226, 2001.

2. *Patwardhan K.A., Sapiro G., and Bertalmio M.* Video inpainting of occluding and occluded objects// *in Proc. IEEE Int. Conf. Image Process*., vol. 2, pp. 69–72, 2005.

3. *Criminisi A., Perez P., Toyama K.* Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting// *IEEE Trans. Image Process,* vol. 13(9), pp. 28-34, 2004.

4. *Voronin V.V., Marchuk V.I., Gapon N.V., Zhuravlev A.V., Maslennikov S., Stradanchenko S.* Inpainting for videos with dynamic objects using texture and structure reconstruction// Proc. SPIE 9497, Mobile Multimedia/Image Processing, Security, and Applications, 94970Y, 2015.

05.07.05

Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
d.gaynutdinova@mail.ru, modorsky@pstu.ru, cluster@pstu.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ – КОНСТРУКЦИЯ» НА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ[1]

Для исследования кавитационных эффектов при вибрации конструкции создана модельная установка для анализа и обработки параметров быстропротекающих процессов в динамической системе «жидкость – газ – конструкция». Приводится описание основных узлов установки. Проводится методика работы на модельной установке.

Ключевые слова: *модельная установка, экспериментальная установка, гидроупругость, взаимодействие в динамической системе «жидкость – газ – конструкция».*

Введение

Участившиеся отказы элементов гидроавтоматики указывают на наличие непрогнозируемых процессов в гидросистемах. Например, обнаружено падение напора на второй ступени многоступенчатых центробежных насосов. С одной стороны, причиной может выступать кавитация, но, с другой стороны, в рамках классических взглядов на возникновение кавитации это явление на второй ступени необъяснимо, так как на входе давление составляет десятки атмосфер. Авторами статьи теоретически обнаружено [1-5], что кавитация может возникать при повышенных давлениях вследствие возникающих вибраций. Действительно, из-за конечности скорости распространения возмущений в жидкости при вибрациях стенки рабочее тело может «не успеть» заполнить быстро изменяющийся объем в конструкции и в области стенки могут возникнуть условия для возникновения кавитации и срыва напора.

Для экспериментальной верификации численных расчетов [1-5] и исследования гидроупругих процессов создана экспериментальная установка «Гидроупругость».

Описание модельной экспериментальной установки «Гидроупругость»

В рамках выполнения Гранта РФФИ № 14-07-96003-р_урал_а создана уникальная экспериментальная установка "Гидроупругость" для исследования взаимовлияния жидкости, газа и конструкции, позволяющая исследовать быстропротекающие процессы гидрогазоупругости и формировать поток данных по гидрогазодинамическим параметрам (3 гидрофона) и по параметрам вибраций (3 датчика виброускорений). Модельная экспериментальная установка включает модельную камеру и измерительно – задающий вычислительный комплекс (ИЗВК) (рис. 1.). Модельная камера представляет собой трубу с фланцами и фитингами (1) для установки гидрофонов (2). На фланцы могут устанавливаться дополнительные секции и дополнительные элементы для подстройки собственных частот колебаний конструкции. В камеру заливается рабочее тело – жидкость. ИЗВК состоит из:

- 3 датчиков давления (гидрофонов) (2);
- 3 датчиков виброускорений PCB 352C03 (3);
- модуля согласования сигналов (4);
- шасси National Instruments (NI) PXI 1050, с установленным 8-ми канальным модулем NI PXI 4472B измерения динамических сигналов (5) и программным обеспечением LabVIEW.11;
- устройства усиления и модуляции входного сигнала (6);
- узла нагружения (пьезокерамический излучатель) (7).

[1] *Исследования проводятся при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Грант РФФИ № 14-07-96003-р_урал_а.*

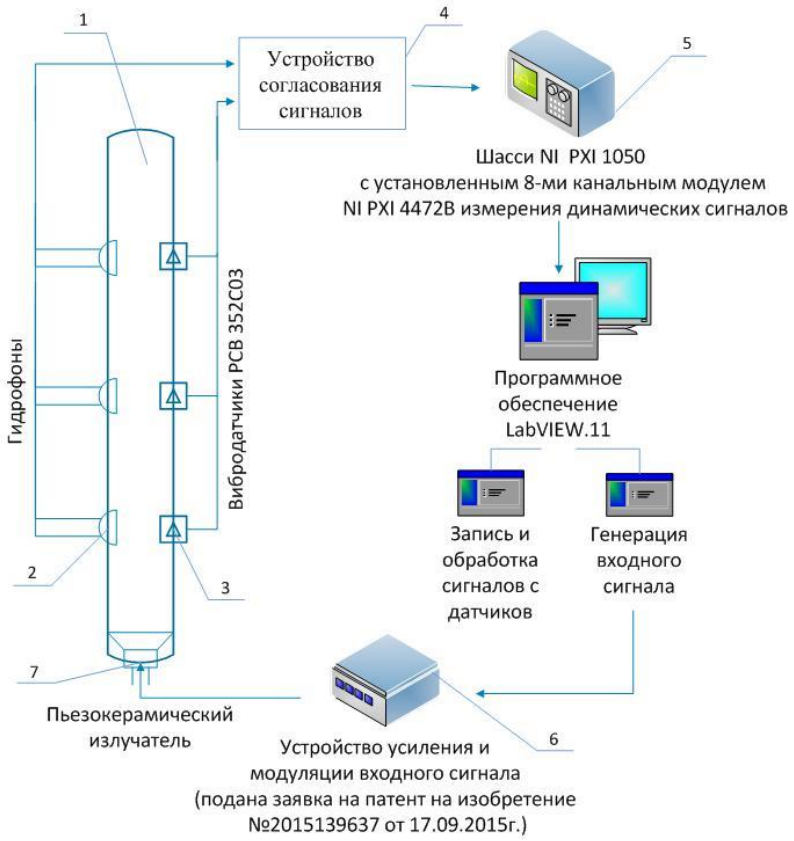


Рис. 1 – Схема модельной экспериментальной установки

Методика работы на модельной экспериментальной установке

Для возбуждения колебаний в установке используется пьезокерамический излучатель (7), на который подаются управляющие воздействия, формирующиеся в программном комплексе LabVIEW.11. Амплитуда и частота этих сигналов может зависеть от результатов спектрального анализа выходного сигнала с гидрофонов (2) и вибродатчиков (3).

До начала физического эксперимента в рабочую камеру заливается дистиллированная вода или другое рабочее тело. Исследования проводятся в соответствии с планом физических экспериментов. В National Instruments (NI) формируется входной сигнал для узла нагружения. Задаются амплитуда и частота сигналов. Далее этот сигнал поступает на устройство усиления и модуляции (6) и затем на пьезокерамический излучатель, установленный в нижней части рабочей камеры. На способ возбуждения колебаний подана заявка на патент изобретение №2015139637 от 17.09.2015г.

Сигналы от датчиков поступают на шасси NI PXI 1050, с установленным 8-ми канальным модулем NI PXI 4472B (5), где происходит измерение динамических сигналов с гидрофонов и вибродатчиков, которые далее подаются на виртуальный прибор, созданный на базе программного комплекса LabVIEW.11. Здесь происходит запись и обработка сигналов с датчиков.

Для исследования влияния геометрических параметров конструкции на гидроупругие процессы необходимо использовать сменные рабочие камеры или дополнительные секции. Для исследования влияния массовых характеристик конструкции на вибрационные и кавитационные процессы необходимо использовать дополнительные грузы, закрепляемые например, на верхнем фланце рабочей камеры. Для исследования влияния собственных частот столба жидкости необходимо использовать дополнительные секции или сменные рабочие камеры. Для изучения влияния характеристик рабочего тела на вибрационные и кавитационные характеристики процесса необходимо после соответствующей очистки заполнять рабочую камеру жидкостями с различными характеристиками. Для исследования влияния давления необходимо подключить к рабочей камере ресивер и контролировать его заполнение по манометру.

Калибровка гидрофонов

С помощью акустического калибратора Sv30A проведены калибровочные испытания гидрофонов. Данная модель калибратора применяется для точной калибровки микрофонов, шумомеров и другой звукоизмерительной аппаратуры. Результаты калибровки на воздухе позволяют установить коэффициенты согласования в различных интервалах рабочих частот. Далее проводится пересчет результатов калибровки на воздухе на гидродинамический процесс, следуя идеям, изложенным в [6]. На рисунке 2 показаны характерные графики сигналов с гидрофонов при калибровке.

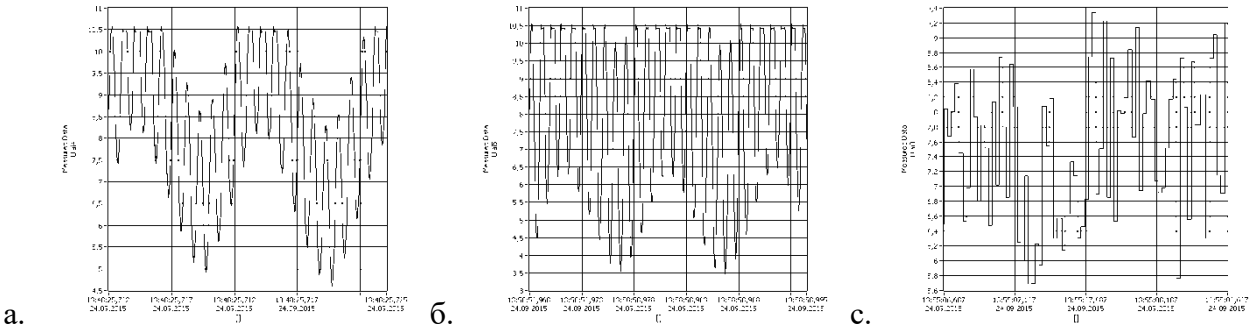


Рис. 2 – Графики изменения сигналов гидрофонов при калибровке
а. – нижний гидрофон; б. – средний гидрофон; с. – верхний гидрофон

Выводы

Для исследования кавитационных эффектов при вибрации конструкции создана модельная установка для анализа и обработки параметров быстропротекающих процессов в динамической системе «жидкость – газ – конструкция». Приводится описание основных узлов установки. Описана методика работы на модельной установке и порядок калибровки измерительных сигналов.

Список литературы

1. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе Пермского национального исследовательского политехнического университета: моногр. / под ред. В.Я. Модорского. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. -314с.

2. *А.В. Козлова, В.Я. Модорский*. Численное моделирование кавитационных эффектов в замкнутой трубе с подвижной стенкой. Научно-технический вестник Поволжья. №2 2013г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – с. 132-135.

3. *Д.Ф. Гайнутдинова, А.В. Козлова, В.Я. Модорский, Е.В. Мехоношина*. Численное моделирование кавитационных эффектов при действии вибрации. Научно-технический вестник Поволжья. №6 2013г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – с. 219-223.

4. *Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский, А.В. Козлова, Д.Ф. Гайнутдинова,* Исследование влияния вибраций и давления на возникновение кавитации. Научно-технический вестник Поволжья. №6 2013г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2013. – с. 364-368.

5. *Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, Г.Ф. Масич*, Проектирование технологической платформы для экспериментальных и вычислительных исследований быстропротекающих процессов гидроупругости. Научно-технический вестник Поволжья. №5 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – с. 155-158.

6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. Глав. ред. И.П. Голямина. – М.: «Советская энциклопедия», 1979. – 400 с., илл.

05.07.05

Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
d.gaynutdinova@mail.ru, modorsky@pstu.ru, cluster@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО ТЕЛА И СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Численным методом решена модельная задача о движении поршня в замкнутой трубе, заполненной водой. Использованы математическая модель, алгоритм и метод, апробированные ранее для газодинамических расчетов. Проведен сравнительный анализ численного и аналитического решений. Показана принципиальная возможность использования предложенного подхода к решению задач по исследованию динамических процессов в системе «газ – жидкость – подвижное деформируемое тело» и «газ – жидкость – деформируемая конструкция».

Ключевые слова: *волновые процессы, колебания, взаимодействие в динамической системе «жидкость-подвижная стенка».*

Введение

С точки зрения классических представлений, изучение газов с числом Кнудсена Кн > 1 осуществляется в рамках кинетической теории, а с Кн < 0,1 – методами механики сплошных сред. При этом не делается различий в моделях для газа и жидкости. Отмечается, что жидкость, в отличие от газа несжимаема, является более вязкой, имеет большую плотность. Газ, в свою очередь, рассматривается как сжимаемая жидкость. [1]. Вместе с тем, на практике методы гидравлики отличаются от методов газодинамики и оперируют, в силу различий, связанных, в частности, со сжимаемостью, различными уравнениями.

Вместе с тем, при исследовании динамических процессов жидкость в целом ряде задач нельзя рассматривать как несжимаемую. Так например, при анализе вибрационных процессов важно корректно отслеживать распространение волн в жидкости, которое происходит не мгновенно (в случае несжимаемости), а постепенно (для сжимаемых сред).

В этом случае традиционные математические инструменты гидравлики не подходят и необходимо использовать модели сжимаемых сред и системы дифференциальных уравнений в частных производных.

Решение модельной задачи и анализ результатов

В данной работе, в рамках традиционного для газовой динамики метода «крупных частиц» [2,3] решена модельная задача “о движении поршня в трубе”, заполненной жидкостью. В качестве исходных данных полагалось, что $\rho_ж$= 1000 кг/м^3 - плотность жидкости; Рвн = 450*10^6 Па - внутреннее давление жидкости. Показатель адиабаты k для жидкости, подбирался из условия, что а=1500м/с, $a^2 = k\frac{P}{\rho}$, $k = \frac{\rho a^2}{P}$, тогда k=5. Вместе с тем L=0.5 м – длина трубы; V = 10 м/с – скорость движения поршня (подвижного тела) в трубе.

Для решения использовался алгоритм, изложенный в [4]. Применение данного алгоритма к решению гидродинамической задачи является новым и позволяет с единых методологических позиций изучить и раскрыть физическую сущность возникновения и протекания аномальных непрогнозируемых опасных процессов и явлений при нелинейном взаимодействии в динамической системе «жидкость – подвижное тело». В перспективе этот подход можно обобщить на изучение процессов в динамической системе «газ – жидкость – деформируемая конструкция» [5,6].

Расчетная схема представлена на рис.1.

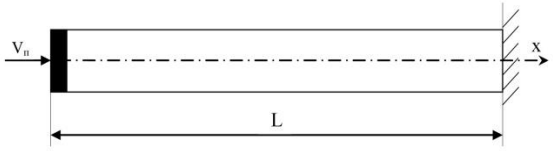


Рис. 1 – Расчетная схема

Как известно [1], в момент начала движения впереди поршня со скоростью N_1 по покоящейся среде будет перемещаться волна сжатия. Дойдя до стенки, прямая волна отразится от нее и отраженная волна будет распространяться со скоростью N_3 в направлении, обратном направлению движущейся жидкости (рис.2.) [1].

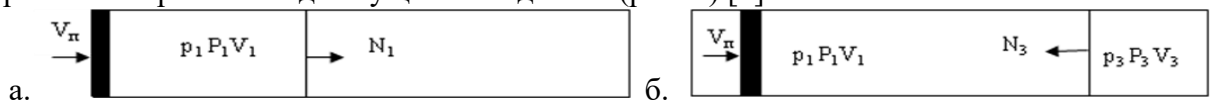


Рис. 2 – Падающая (а.) и отраженная (б.) волны

Результаты решения модельной задачи для падающей волны представлены на рис.3. Из рисунка видно, что фронт падающей волны пробежал половину длины трубы. За фронтом волны наблюдаются колебания, вызванные численными эффектами.

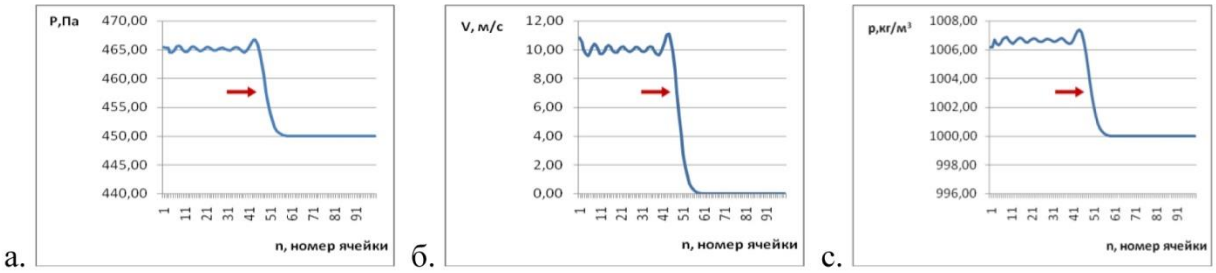


Рис. 3 – Изменение гидродинамических параметров по длине трубы, при $t=0.16*10^{-3}$ с
а. – давления б. – скорости с. – плотности

В дальнейшем, после отражения, эти эффекты исчезают. Результаты решения модельной задачи для отраженной волны представлены на рис.4.

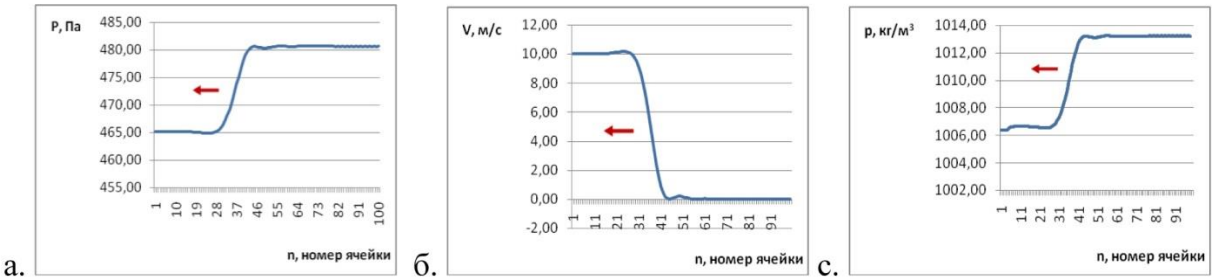


Рис. 4 – Изменение гидродинамических параметров по длине трубы, при $t=0.57*10^{-3}$ с
а. – давления б. – скорости с. – плотности

Для верификации полученного численного решения проведены аналитические расчеты для данной модельной задачи, с использованием известных аналитических зависимостей [1].

Параметры для падающей волны (1-5):

$$P_1 = P_0 + \rho_0 N_1 V_n; \quad (1)$$

$$\rho_1 = \rho_0 N_1 / (N_1 - V_n); \quad (2)$$

$$N_1 = (k+1)V_n / 4 + \sqrt{((k+1)V_n / 4) + a_0^2}; a_0 = \sqrt{k \frac{P_0}{\rho_0}} \quad (3)$$

$$X_1 = N_1 * t_{пад}; \quad (4)$$

$$V_1 = V_n; \quad (5)$$

Параметры для отраженной волны (6-10):

$$P_3 = P_1 + \rho_1 (V_n + N_3) V_n; \quad (6)$$

$$\rho_3 = \rho_1 / \left[1 - \frac{P_1 - P_0}{P_3 - P_1} * \frac{1 - P_0 / P_1}{\left(\frac{k+1}{2} * \frac{P_0}{P_1} + \frac{k-1}{2} \right)} \right]; \quad (7)$$

$$N_3 = -V_n + \frac{k+1}{4}V_n + \sqrt{a_1^2 + (\frac{k+1}{4}V_n)^2}; a_1 = \sqrt{k\frac{P_1}{\rho_1}}; \quad (8)$$

$$X_3 = N_3 * t_{отр}; \quad (9)$$

$$V_3 = 0; \quad (10)$$

В таблице 1 приведены результаты сравнения численного и аналитического решений по следующим параметрам P_1, p_1 – давление и плотность падающей волны, соответственно; X_1 – смещение фронта падающей ударной волны от начального положения; N_1 – скорость фронта падающей волны; P_3, p_3 – давление и плотность отраженной волны, соответственно; X_3 – смещение фронта отраженной ударной волны от начального положения; N_3 – скорость фронта отраженной волны.

Таблица 1 – Сравнение численного и аналитического решений

Контролируемые параметры	Результаты численного решения (осред.)	Результаты аналитического решения	Относительная погрешность, %
P_1 ,*Па*	$465*10^6$	$465*10^6$	*0*
p_1 ,*кг/м*^{3}	*1006,6*	*1006,6*	*0*
X_1 ,*м*	*0,24*	*0,24*	*0*
N_1 ,*м/с*	*1515*	*1515*	*0*
P_3 ,*Па*	$480,6*10^6$	$480,6*10^6$	*0*
p_3 ,*кг/м*^{3}	*1013,3*	*1013,3*	*0*
X_3 ,*м*	*0,36*	*0,36*	*0*
N_3 ,*м/с*	*1525*	*1525*	*0*

Сравнительный анализ численного и аналитического решений показал, что результаты решений совпадают с высокой точностью. Наблюдается некоторое “размазывание” фронта ударной волны, связанное с наличием схемной вязкости.

Выводы

Решена модельная задача динамической гидроупругости в одномерной постановке. Проведены аналитический расчет тестовой задачи и сравнительный анализ с численным решением. Показано их совпадение с высокой точностью. Показана принципиальная возможность использования предложенного подхода к решению задач по исследованию динамических процессов в системе «газ – жидкость – подвижное деформируемое тело» и «газ – жидкость – деформируемая конструкция».

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Список литературы

1. *Гинзбург И.П.* Аэрогазодинамика. – М.: Высшая школа, 1966.– 404 с.
2. *Давыдов Ю.М.* Численное исследование актуальных проблем машиностроения и механики сплошных и сыпучих сред методом крупных частиц / Давыдов Ю.М., Акжолов М.Ж., Модорский В.Я. [и др.]; под ред. Ю.М. Давыдова. Т.1 – Т.5. – М.: НАПН,1995. – 1658с.
3. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. — 392 с.
4. *Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.* Газоупругие процессы в энергетических установках. – М.: Наука, 2007.– 176 с.
5. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе Пермского национального исследовательского политехнического университета: моногр. / под ред. В.Я. Модорского. - Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. -314с.
6. *Гайнутдинова Д.Ф., Модорский В.Я., Козлова А.В.* Вычислительное моделирование области возникновения кавитации при вибрациях. Научно-технический вестник Поволжья. №6 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – с. 127-129.

05.02.10

Ф.М. Гайсин, Р.Т. Насибуллин, А.Ш. Садриев, Р.Ш. Садриев, Л.Р. Саримов

Набережночелнинский институт КФУ, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Набережные Челны, srsh@list.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ

Статья посвящена решению проблемы сварки металлов, имеющих на поверхности тугоплавкие окисные пленки с помощью применения особенностей высокочастотного разряда в технологических циклах сварки металлов. Были проведены исследования высокочастотного разряда обратной полярности, горящий между соплом плазменной горелки и изделием, возбуждаемый и стабилизируемый с помощью факела плазмы, в ходе экспериментов были получены сваренные образцы из цветных металлов и алюминия.

Ключевые слова: *высокочастотный разряд, дуга обратной полярности, плазма.*

Широкое применение плазмы электрической в различных областях жизнедеятельности человека требует подробного изучения физических процессов и явлений, позволяющих создавать новые технологии и совершенствовать уже существующие. На сегодняшний день опубликовано обширное количество работ, посвященных изучению отдельных физических явлений в электрической дуге, но в то же время авторы этих работ не уделяют должного внимания взаимодействию этих явлений между собой, для получения адекватного описания параметров плазмы электродугового разряда. К процессам, подлежащим изучению, можно отнести приэлектродные явления, явления тепло- и массопереноса в столбе электрической дуги, рассмотрение влияния отклонений от термодинамического равновесия на параметры плазмы электрической дуги, процессы теплообмена между электрической дугой и электродами, процессы теплопереноса в электродах с учетом воздействия с плазмой электрической дуги. Изучение этих процессов, и установление связи между ними, с помощью наиболее общих параметров, позволит получить внешние характеристики дуги, что может существенно облегчить рассмотрение газоразрядной плазмы не только как физического явления, но и как инструмента электротехнологии в направлении упрочнения сварного шва. К параметрам, характеризующим электрическую дугу как физический объект можно отнести температуру плазмы разряда, скорость плазмы, давление внутри разряда, распределение плотности тока в электрической дуге. К параметрам, характеризующим электрическую дугу как инструмент электротехнологии относятся: вольт-амперная характеристика дуги, тепловой поток в анод, составляющие энергетических потерь в дуге, полезные для оценки эффективности использования дуги. Для получения определения этих параметров потребовалось создать плазменную установку для сварки металлов и сплавов и исследовать ее характеристики.

Принцип действия установки заключается в преобразовании электрической энергии питающей сети в высокочастотные импульсы разрядного тока заданной формы, амплитуды, полярности и частоты, возбуждающие между электродами аналитического промежутка низкотемпературную плазму рисунок 1.

Поджиг основного разряда в аналитическом промежутке осуществляется принудительно высоковольтной высокочастотной искрой малой энергии, генерируемой схемой поджига. Устройство электронного управления в заданной фазе переменного напряжения формирует импульсы поджига для возбуждения в аналитическом промежутке дуги переменного тока. Сдвинутое по фазе устройством фазосмещения переменное напряжение подается на компаратор нулевого уровня, с выхода которого импульсы подаются на схему задержки импульсов управления, далее на схему пересчета, задающую частоту следования импульсов поджига.

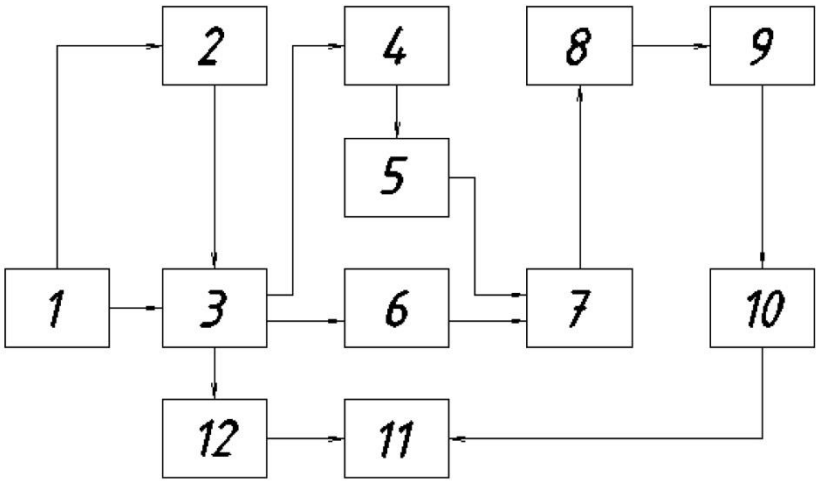


Рис. 1. Блок схема плазматрона: 1 − схема управления пуском; 2 − блок выпрямителей; 3 − разрядный контур; 4 − устройство фазосмещения; 5 − компаратор нулевого уровня; 6 − компаратор уровня напряжения; 7 − схема задержки импульсов управления; 8 − схема пересчета; 9 − формирователь импульсов запуска генератора поджига; 10 − генератор поджига, 11 − резак плазменный, 12 − датчик тока (амперметр).

Поджиг дуги постоянного тока осуществляется по фазовому управлению, причем при загорании дуги генератор поджига можно выключить, но в данном методе высокочастотная дуга переменного или пульсирующего тока остается.

В разработанном способе сварки дуга обратной полярности используется только в один полупериод для разрушения (очистки) окисных пленок на кромках свариваемых деталей. Плавление металла осуществляется в другой полупериод высококонцентрированным источником тепла – дугой прямой полярности, горящей между электродом плазматрона и изделием. При этом получается узкий шов с малой зоной термического влияния.

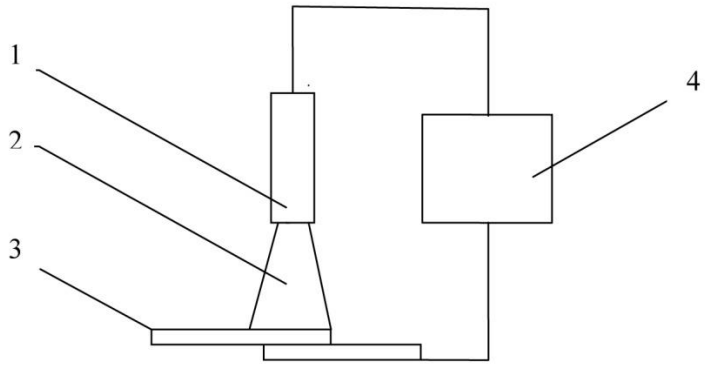


Рис. 2. Схема принципа плазменной сварки на переменном токе:
1 – электрод; 2 – плазменная дуга; 3 – свариваемое изделие; 4 – источник питания.

Сущность способа иллюстрируется схемой, изображенной на рисунке 2. Между электродами плазматрона в потоке плазмообразующего газа непрерывно горит дежурная дуга, создающая в промежутке электрод – изделие факел плазмы. При подаче на анод положительного относительно изделия полупериода напряжения между электродом и изделием формируется дуга обратной полярности с нестационарным катодным пятном. В течение этого полупериода происходит разрушение окисной пленки на кромках свариваемого изделия. Величина тока обратной полярности выбирается только из соображений качественной очистки и поэтому мала. Затем на медный электрод поступает отрицательный относительно изделия полупериод напряжения. При этом формируется плазменная дуга с большой плотностью энергии, достаточной для плавления, и, таким образом, осуществляется сварка металлов, имеющих на поверхности тугоплавкие окисные пленки.

В созданном способе плазменной сварки на высокочастотном переменном или пульсирующем токе на электроды попеременно подаются полупериоды напряжения синусоидальной формы высокой частоты. Как следует из описанного способа сварки, через изделие проходит асимметричный переменный ток, а по медному электроду – только ток прямой полярности. Поэтому оплавления электрода, как при аргонодуговой сварке на переменном токе, не происходит. Это обеспечивает высокую пространственную устойчивость и стабильность горения дуги даже при небольших токах.

Следует отметить, что нестационарное катодное пятно в процессе своего блуждания не только очищает открытые поверхности изделия, но и проникает в зазор между свариваемыми кромками, обеспечивая получение высококачественного сварного соединения без окисных включений. Это свойство пятна проникать в щели, трещины, поры, раковины и т. п. было использовано нами при разработке способа заварки дефектов в различных металлах, в том числе и алюминии. Сущность этого способа заключается в следующем. В начале процесса дефектный участок изделия (в том числе внутренние полости дефектов) очищается от окисной пленки и других загрязнений дугой обратной полярности, горящей между электродом и изделием. Ток дуги мал, и заплавления дефектов не происходит. По окончании очистки наступает вторая стадия процесса – заплавление дефекта по способу сварки на переменном токе.

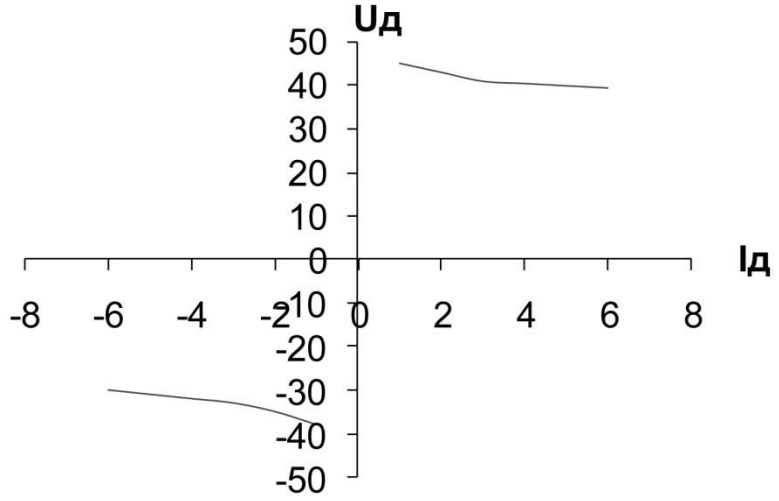


Рис. 3. Динамическая вольт-амперная характеристика дуги

Стабильность процесса горения дуги прямой и обратной полярности на переменном токе иллюстрируется динамической вольт-амперной характеристикой рисунок 3. По оси абсцисс записывается ток дуги, по оси ординат – падение напряжения. В обоих случаях как при $\frac{dI_Д}{dt} > 0$, так и при $\frac{dI_Д}{dt} < 0$ характеристика $U_Д = f(I_Д)$ для дуги прямой полярности падающая $\left(\frac{dU_Д}{dI_Д} < 0\right)$. Характеристика подобна статическим вольт-амперным характеристикам плазменной дуги на постоянном токе.

Как показала практика, разработанный способ плазменной сварки металлов, с помощью применения особенностей высокочастотного разряда в технологических циклах сварки, является устойчивым процессом, упрочняющим сварной шов даже на малых токах, и позволяет осуществлять качественную сварку алюминия и его сплавов малых и весьма малых толщин.

05.09.01

И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов, М.А. Бобров

Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва,
факультет электронной техники, кафедра электроники и наноэлектроники,
Саранск, alalpopov91@mail.ru

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

В статье даётся краткая характеристика синхронных двигателей, рассматриваются принципы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Приводятся структурные схемы систем векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с определением положения ротора.

Ключевые слова: *синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, ток, магнитный поток.*

На сегодняшний день существует два типа трехфазных синхронных двигателей. В одном типе используются обмотки ротора для возбуждения постоянным током, а в другом – только постоянные магниты. Использование магнитов обеспечивает эффективное использование пространства в зазоре между статором и ротором, поэтому потери в меди ротора можно не учитывать. Для управления вращающимся магнитным полем, необходимо контролировать токи статора.

Угол между магнитным полем ротора и статора необходимо контролировать, чтобы достичь максимального крутящего момента и высокой эффективности электромеханического преобразования. Угол между полем ротора и статора должен быть равен 90º, чтобы получить наивысшую величину крутящего момента. Эта синхронизация требует определения положения ротора для того, чтобы правильно управлять полем статора [1].

По закону электромагнитной индукции, крутящий момент, создаваемый в синхронной машине равен векторному произведению двух существующих магнитных полей:

$$T_{em} = \vec{B}_{st} + \vec{B}_{rt} \quad (1)$$

Это выражение показывает, что крутящий момент максимальный, если магнитные поля статора и ротора ортогональны. Тем не менее, особенностью векторного управления является определение положения ротора. Это может быть достигнуто с помощью датчика положения.

Управление заключается в контроле токов статора, представленных в виде векторов. Этот контроль основан на преобразовании трехфазной системы координат тока и скорости, не зависящей от времени, в зависимую двухфазную систему координат (d и q) инвариантной временной системы. Значение крутящего момента соответствует d-координате, а значение потока q-координате.

Поддерживая амплитуду потока ротора (ψ_R) при фиксированном значении, мы имеем линейную зависимость между крутящим моментом и значением тока (i_{Sq}). Затем мы можем контролировать крутящий момент, контролируя вектор тока статора.

Трехфазные напряжения, токи и потоки синхронных двигателей могут быть проанализированы с точки зрения сложных пространственных векторов. Что касается потоков, пространственный вектор может быть определен следующим образом. Если предположить, что i_A, i_B, i_C являются мгновенными значениями токов в фазах статора, то комплексный ток статора определяется по формуле [2]:

$$i_s = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c \quad (2)$$

где $\alpha = e^{j\frac{2}{3}\pi}$е и $\alpha^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi}$, представляют пространственные операторы.

Для управления скоростью синхронной машины необходимо осуществлять контроль токов в статоре и определять угол положения ротора (Θ). На рисунке 1 представлена структурная схема системы векторного управления синхронной машиной без датчика положения ротора.

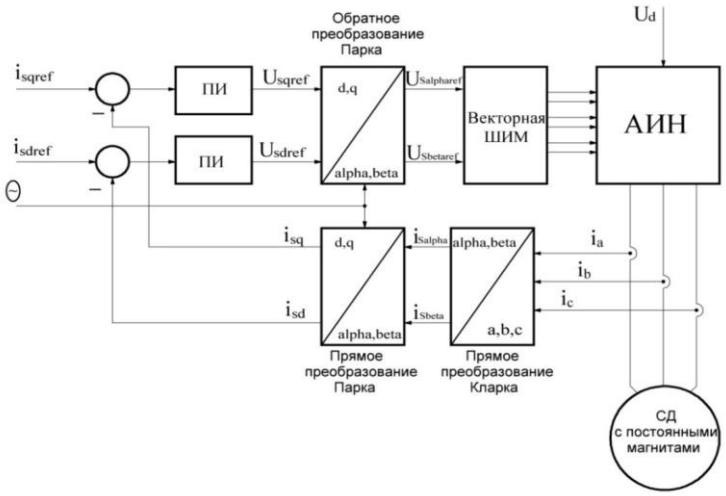


Рис. 1 – Структурная схема системы векторного управления скоростью синхронной машины без датчика положения ротора

Трёхфазные токи двигателя измеряются и подаются на блок прямого преобразования Кларка. Выходы этого блока образуют проекции тока $i_{s\alpha}$ и $i_{s\beta}$. Эти две составляющие тока подаются на входы блока прямого преобразования Парка, который преобразует ток во вращающуюся систему координат d, q. Значения i_{sd} и i_{sq} будут отличаться от заданных значений i_{sdref} (значение потока) и i_{sqref} (значение момента). Эта структура управления имеет ряд преимуществ: она может быть использована для управления синхронным двигателем с не зависимым возбуждением или синхронной машиной с постоянными магнитами путем простой замены значения опорного магнитного потока на положение ротора в пространстве. Следовательно, при управлении синхронной машиной с постоянными магнитами, i_{sdref} должен быть установлен в нуль. Значение i_{sqref} может быть использовано как вход регулятора скорости, когда мы задаём значение скорости в векторной системе управления. Выходы U_{sdref} и U_{sqref} используются для обратного преобразования Парка. Сигналы $U_{s\alpha ref}$ и $U_{s\beta ref}$ являются проекциями, которые соответствуют вектору напряжения статора (в стационарной системе отсчета).

Если есть неточность в определении потока ротора, и он не совпадает с осью i_{sd} и i_{sq}, то значения потока, крутящего момента и составляющих тока статора будут определены неверно. На рисунке 2 представлена диаграмма указывающая на правильное положение потока ротора, ток статора и напряжения статора в пространстве векторов, которые вращаются с осями d и q на синхронной скорости.

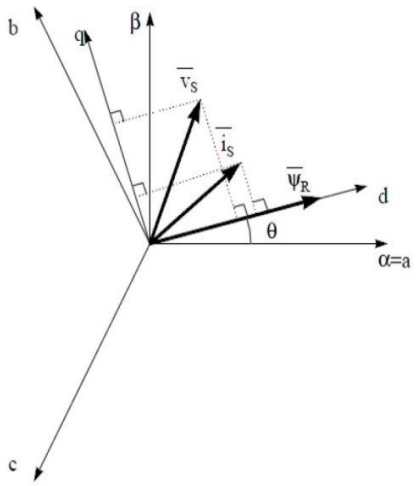


Рис. 2 – Векторная диаграмма положения потока ротора, тока статора и напряжения статора

Как правило, для построения систем векторного управления электроприводом переменного тока на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами применяют датчики положения ротора. В таких системах присутствуют регулятор скорости,

вырабатывающий из сигнала ошибки по скорости сигнал задания момента и блок вычисления скорости ротора, который вычисляет скорость по приращению угла. Структурная схема системы векторного управления с датчиком положения ротора, предлагаемая для привода, показана на рисунке 3.

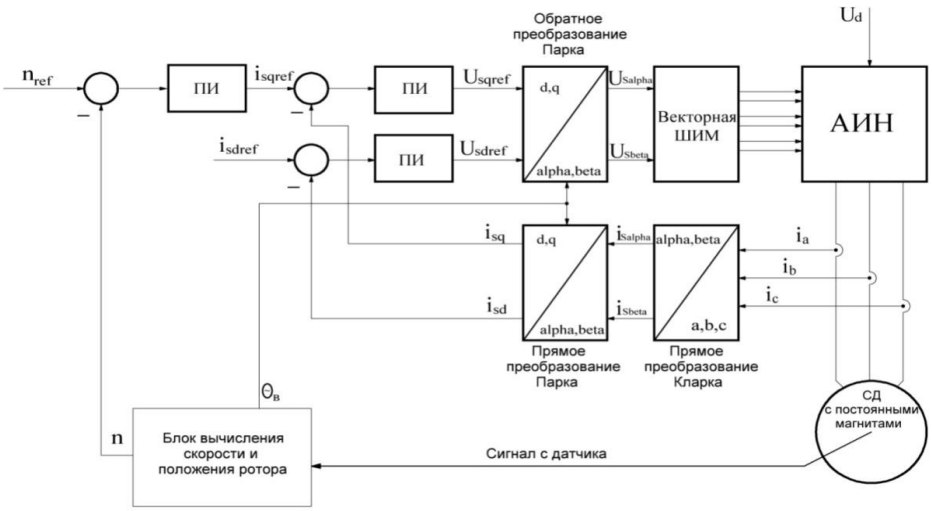


Рис. 3 – Структурная схема системы векторного управления электроприводом на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами

Для создания вращающегося магнитного поля, необходимы три независимых источника переменного напряжения, сдвинутых друг относительно друга на 120º [3].

Для расчёта фазных напряжений на нагрузке (U_{an}, U_{bn}, U_{cn}) из напряжений источника вычисляем:

$$U_{oa} = U\sqrt{2}\cos(\omega_e t), \quad (3)$$

$$U_{ob} = U\sqrt{2}\,cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}), \quad (4)$$

$$U_{oc} = U\sqrt{2}\,cos(\omega_e t) - \frac{4\pi}{3}. \quad (5)$$

Это приводит к следующим уравнениям:

$$U_{on} = U_{oa} + ZI_1, \quad (6)$$

$$U_{on} = U_{ob} + ZI_2, \quad (7)$$

$$U_{on} = U_{oc} + ZI_3. \quad (8)$$

Тогда:

$$3U_{on} = U_{oa} + U_{ob} + U_{oc} + Z(I_1 + I_2 + I_3) \quad (9)$$

Где:

$$(I_1 + I_2 + I_3) = 0 \quad (10)$$

Теперь выразим напряжение фазы А, оно может быть рассчитано:

$$U_{an} = U_{on} - U_{oa} = \frac{1}{3}(U_{oa} + U_{ob} + U_{oc}) - U_{oa} = -\frac{2}{3}U_{oa} + \frac{1}{3}U_{ob} + \frac{1}{3}U_{oc} \quad (11)$$

Такой же расчет производится для всех трех фаз.

Для создания вращающегося магнитного поля необходимо создать синусоидальный ток в обмотках синхронной машины. Так как преобразователь частоты выполнен по трёхфазной мостовой схеме, то форма напряжения и тока будут не синусоидальной. Вследствие чего приходится формировать псевдо синусоидальную форму тока за счёт введения модуляции рабочего цикла силовых ключей [4].

Следует учесть, что в трёхфазном мостовом инверторе напряжения возможны только восемь комбинаций переключений. Принимаем во внимание, что напряжения между виртуальной средней точкой (или нейтралью) выпрямленного напряжения и одной из фаз можно найти из уравнений:

$$U_{an} = \frac{1}{3}(2U_{ao} + U_{bo} + U_{co}), \quad (12)$$

$$U_{bn} = \frac{1}{3}(2U_{bo} + U_{ao} + U_{co}), \quad (13)$$

$$U_{cn} = \frac{1}{3}(2U_{co} + U_{ao} + U_{bo}). \quad (14)$$

Так можно выразить напряжение между каждой фазой и нейтралью, для каждой комбинации переключения силовых транзисторов [5].

В среде PSIM была разработана модель электропривода на базе синхронного двигателя с системой векторного управления. На рисунке 4 представлены результаты моделирования векторного управления синхронной машиной с постоянными магнитами с измененяемым моментом на валу (диаграмма сверху на рисунке 4), разгон машины и статорный ток (диаграмма снизу на рисунке 4). Исходя из результатов моделирования, можно сделать выводы:

- при реализации векторной системы управления синхронной машиной с определением положения ротора появляется возможность значительно снизить ток машины при минимальной скорости и существенном моменте на валу;
- появляется возможность уменьшить время переходного процесса тока статора и уменьшить тепловые потери, возникающие в силовых ключах преобразователя и машине при пуске;
- повысить энергетические характеристики привода в целом.

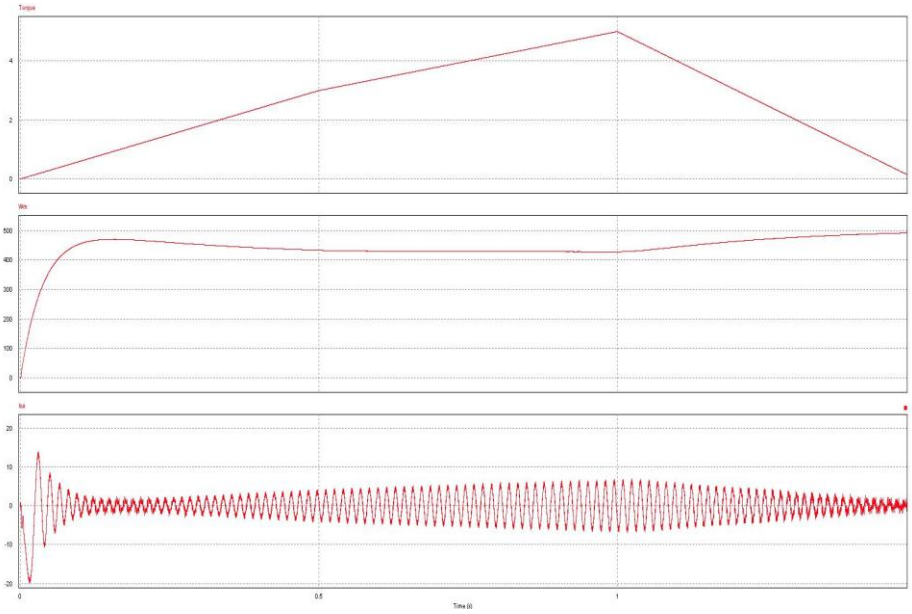


Рис. 4 – Результаты моделирования

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №15-19-20057).

Список литературы

1. *Гуляев И.В.* Работа асинхронизированного вентильного двигателя с потреблением чисто активной мощности со стороны якоря/ Тутаев Г.М., Юшков И.С., Волков А.В.// Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭП-2014. 2014. С. 241-244.

2. *Гуляев И.В.* Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – №1. – С. 70-73.

3. *Зиновьев Г.С.* Силовая электроника : учебное пособие для бакалавров / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2015. – 667 с.

4. *Тутаев Г.М.* Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления / Г.М. Тутаев // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 48-51.

5. *Тутаев Г.М.* Исследование энергетических характеристик асинхронизированного вентильного двигателя на статической модели / Г. М. Тутаев, И.В. Гуляев, И.В. Маняев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – №4. – С. 2-7.

05.13.11

Т.А. Деменкова, М.С. Побережный

Московский государственный университет информационных технологий радиотехники и электроники (МИРЭА),
Центр проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем
Москва, demenkova@mirea.ru, maximus4600@gmail.com

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе представлены результаты исследований в области аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки информации на примере синтеза радиолокационных изображений с учетом миграции дальности, описывается решение на языке описания аппаратуры VHDL. Работа выполнена в Центре проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем МИРЭА в рамках научно-исследовательского проекта №35.

Ключевые слова: *синтез радиолокационного изображения, языки описания аппаратуры, программируемые логические интегральные схемы.*

В настоящее время актуальной является задача обработки изображений для различных отраслей промышленности. В работе представлены методика и рекомендации по аппаратной реализации алгоритмов обработки изображений для задач радиолокации. Основная цель данной работы состояла в получении программного кода, который можно легко интегрировать в существующие программируемые логические интегральные схемы и который реализовывал бы один из существующих алгоритмов обработки изображений.

Успешное решение ряда важных задач радиолокации, в том числе обзор земной поверхности, обнаружение малоразмерных объектов, получение детализированных изображений местности, оперативное картографирование больших участков местности, особенно в труднодоступных районах земли, зависит от наличия достоверной информации, получаемой в результате обзора земной поверхности с помощью различных технических средств, установленных на летательных аппаратах [1]. Среди таких средств особое место занимают радиолокационные станции (РЛС) землеобзора вследствие ряда присущих им принципиальных преимуществ. Наибольшее практическое применение в настоящее время находят РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА).

Принцип действия основан на использовании перемещения бортовой антенны РЛС для последовательного формирования антенной решетки больших размеров на траектории полета. Бортовая антенна, как правило, при этом имеет небольшие размеры и достаточно широкую диаграмму направленности. В каждой точке траектории полета носителя РСА формирует вполне определенную амплитудную и фазовую информацию о просматриваемых участках местности и объектов на ней, соответствующую мгновенным значениям их текущих координат. Обычно эта информация выделяется из совокупности принимаемых импульсных радиосигналов с помощью специальных фазовых детекторов, а затем фиксируется в устройстве памяти.

В данной работе рассмотрен алгоритм синтеза радиолокатора с синтезом апертуры в маршрутном режиме с учетом миграции дальности. Данный алгоритм дает возможность получения близкого к метровому разрешение по азимуту.

На первом этапе алгоритма выполняется преобразование ортогональных координат в полярные с помощью модуля CORDIC, при этом создаются элементы, выполняющие преобразование значений ортогональных координат вектора в полярные (VHDL-описание элемента *translate_vector_cordic).* В данном элементе значения исходных координат и результаты преобразования представлены в виде 28-разрядного двоичного кода. В процессе трансляции значений ортогональных координат вектора в полярные используется блок

компенсации масштабирующего коэффициента CORDIC, реализация которого осуществляется на базе ресурсов таблиц преобразования LUT [2].

В сформированном элементе translate_vector_ cordic применяется архитектура последовательного типа, в состав которой дополнительно включены входные и выходные регистры. Использование оптимального варианта конвейерной организации выполнения операций позволяет повысить производительность этого элемента без привлечения дополнительных таблиц преобразования LUT кристалла. В состав интерфейса рассматриваемого элемента входят те же входы и выходы сигналов управления и подтверждения, что и в элементе rotate_vector_cordic. Но при этом сигнал на входе разрешения синхронизации элемента translate_vector_cordic имеет более низкий приоритет, чем сигнал на входе синхронного сброса.

Особенность алгоритма синтеза РЛИ с коррекцией миграции дальности (RMA) состоит в том, что коррекция производится в частотной области после одномерного БПФ по азимуту. Коррекция выполняется путем двумерной фазовой компенсации сигнала после азимутального БПФ для целей, находящихся на средней дальности кадра. Для остальных дальностей коррекция оказывается частичной. Таким образом, следующий шаг это азимутальное БПФ, которое реализуется процедурой FFT в объекте FFTbeh. Данный объект можно вставлять в нужное место разрабатываемого проекта как компонент с целью измерения спектра интересующих сигналов или отображения сигнала из временной области в частотную. Настроечная переменная N задает длину преобразования. При IDCT = 0 выполняется прямое преобразование, а при 1 – обратное. Переменная PT задает масштаб результата.

Следующий шаг – это, так называемое, преобразование Столта, которое одновременно компенсирует криволинейную составляющую миграции дальности путем «скручивания» принятых данных. Операция «скручивания», представляет собой зависимое от азимутальной частоты растягивание масштаба сигнала по дальности. Она реализуется путем одномерного преобразования к новой координате K_Y

$$K_Y = \sqrt{K_R^2 - K_X^2} \quad ,$$

где K_R, K_X – частотные составляющие спектров по дальности и азимуту. Преобразование Столта реализуется с помощью цифровых интерполяционных фильтров. Данное преобразование в упрощённом виде удалось реализовать с помощью библиотек программы MATLAB.

Последняя операция – это двумерное ОБПФ, в результате которого формируется РЛИ. Данная операция реализуется в том же модуле, что и прямое БПФ. Описание всех процедур приводится ниже.

Процедура GATHER_C. В интерфейсе процедуры явно указываются не только тип данных, но и то, что они – сигналы, а также их направление: входные или выходные данные. При вызове процедуры ей не просто передается управление, а ее копия переписывается в модуль, который ее вызывает и там она связывается. Выполнение этой процедуры запускается по фронту синхросигнала CLK в операторе *wait* и останавливается после выполнения ее последнего оператора.

Процедура SCATTER_C. Эта процедура работает так же, как и предыдущая. Но здесь наоборот накопленные в массиве данные последовательно выдаются на ее выход.

FFT. Здесь выполняется известный алгоритм БПФ по основанию 2 с прореживанием по времени с замещением данных [3]. Процедура имеет два участка: первый из них выполняется однократно в начале моделирования, а второй – собственно БПФ - выполняется периодически. При выполнении первого участка формируется таблица вращающих коэффициентов, размер которой равен длине преобразования и которая затем используется алгоритмом БПФ. Второй участок представляет собой бесконечный цикл. Цикл запускается, как только готов массив исходных данных, подготавливаемый процедурой GATHER_C. После запуска данные переписываются из входного массива в рабочий массив.

В процессе работы были использованы программные средства Vivado Design Suite - САПР Xilinx, предназначенные для создания цифровых устройств с применением языков высокого уровня. Также использовался пакет прикладных программ MATLAB для решения задач технических вычислений и одноименный язык программирования, используемый в этом пакете. Реализация была выполнена на языке VHDL в виде четырех отдельных процедур, кроме модуля, отвечающего за преобразование Столта. В дальнейшем планируется перевод данного модуля на язык VHDL с помощью внутренних механизмов MATLAB. Внутри процедуры, отвечающей за интерфейс, есть возможность указать размер массива, что позволяет выполнить сначала стадию с одномерным преобразованием, а после, при соответствующем указании размера массива, произвести компенсацию сигнала.

При выборе устройства для аппаратной реализации в расчет принимались следующие факторы: требование наиболее производительных интегральных схем, которые позволят реализовать полученный алгоритм, а также будут иметь потенциал к дальнейшему развитию и модификации. Поэтому было принято решение остановиться на линейке ПЛИС фирмы Xilinx Virtex-7, к преимуществам которой можно отнести высокую производительность, наличие большого количества интерфейсов, а также ориентирование производителя этой платы на прием и передачу большого числа данных. Таким образом, была выбрана ПЛИС Virtex-7 XC7V2000T, как самая производительная в семействе.

Представленные в работе результаты относятся к целому ряду исследований, выполненных в научном направлении по аппаратной реализации алгоритмов для научно-исследовательской работы №35 в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности за 2015 год. Разработанные методики и рекомендации могут быть полезны разработчикам цифровой аппаратуры при переводе программных алгоритмов в аппаратный вид на основе современной элементной базы.

Список литературы

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. *В.С. Вербы*. – М.: Радиотехника, 2010.

2. *Зотов В.А.* Разработка базовых компонентов цифровых устройств // Компоненты и технологии». 2008, № 3.

3. *Деменкова Т.А., Николаев С.А., Певцов Е.Ф.* Архитектура IP-блоков для вычисления преобразований Фурье. Научно-технический журнал «Электронная техника». Серия 2. Полупроводниковые приборы. Выпуск 3 (324). –М.: ОАО "НПП "Пульсар", 2014. С.42-49.

05.02.03

Т.Н. Иванова д.т.н.,[1] Л.К. Шушкова[1], О.А. Чикишева[2]

[1]Чайковский филиал ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Чайковский,
[2]ФБГОУ ВПО «Удмуртский государственный университет», г. Ижевск, rsg078829@mail.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Осесимметричные детали работают в разнообразных условиях, находятся под высокой температурой и давлении, подвергаются силовым воздействиям, что приводит к возникновению значительных остаточных напряжений (кольцевых и продольных) и деформаций. При неблагоприятном сочетании нагрузок происходят трещины, прогибы, смятия детали. Проведены исследования прочности и устойчивости продольных и поперечных сечений осесимметричной детали. Рекомендованы режимы термообработки стальной осесимметричной детали.

Ключевые слова: *осесимметричные детали, сталь, термообработка, прочность, остаточные напряжения.*

Эффективность работы осесимметричных деталей зависит от характеристик материала и их геометрических особенностей, которые поддерживаются на протяжении всего жизненного цикла. Повреждения осесимметричных деталей могут возникнуть за счет снижения или увеличения несущей способности. А именно, снижение несущей способности происходит из-за наличия дефектов в стенке осесимметричных деталей или старения металла, а увеличение нагрузок проявляется при изменении внутреннего давления, напряжений от перепада температур, статических и динамических нагрузок (рис. 1). Эти факторы формируют в осесимметричных деталях радиальные и продольные напряжения. Поэтому к осесимметричным деталям предъявляются высокие требования по физико-механическим свойствам (временное сопротивление разрыву, предел текучести, ударная вязкость) и геометрическим параметрам поверхности (овальность, кривизна). Всем этим требованиям удовлетворяет материал - сталь [1] .

Рис.1. Износ арматуры уст. АШК 50х14 К1

Технология восстановления (сваркой, наплавкой, точением, шлифованием и т.п.) осесимметричных деталей непрерывно совершенствуется. После восстановления осесимметричных деталей проводят их термообработку для повышения физико-механических свойств и снижения остаточных напряжений. Основные режимы термообработки осесимметричных деталей представлены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы термообработки осесимметричных деталей

Марка стали	Вид термообработки	Температура нагрева, °С	Время выдержки, мин Охлаждение на воздухе
12Х18Н9Т 08Х18Н10Т 12Х18Н10Т	Стабилизирующий отжиг	875±25	120
12Х1МФ	Высокий отпуск	715±15	60 при δ* до 20 мм, 120 при δ = 21÷ 45 мм, 180 при δ ≥ 45
12МХ 15ХМ	Высокий отпуск	680±20	
15Х5М 15Х5МУ 15Х5 15Х5ВФ	Высокий отпуск	600	760±20 δ до 20 мм, 120 δ = 21 ÷ 60 180 δ ≥ 60
10, 20, 25, 10Г2, 17ГС	Высокий отпуск	600±25	60

*δ - толщина стенки

Если после термообработки твердость металла осесимметричной детали превышает допустимую, то производится повторный отпуск.

Осесимметричные детали испытывают от силовых воздействий напряжения: кольцевые σ_k, продольные $\sigma_{пр}$ и радиальные σ_ρ (рис. 2) [1]. Кольцевые напряжения σ_k зависят от внутреннего давления:

$$\sigma_к = \frac{pD_в}{2\delta}, \qquad (1)$$

где p – давление, $D_в$ – внутренний диаметр, δ – толщина стенки осесимметричной детали.

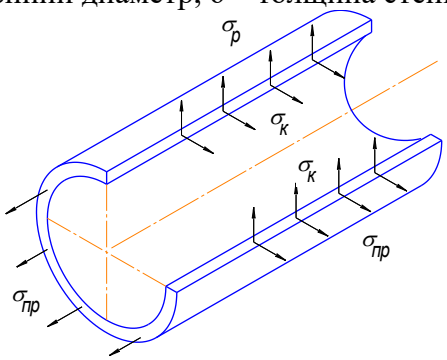


Рис. 2. Схема напряжений в осесимметричных деталях

Продольные напряжения $\sigma_{пр}$ создаются либо под действием внутреннего давления

$$\sigma_{пр} = \mu\sigma_к, \qquad (2)$$

где μ - коэффициент Пуассона,

либо при изменении температуры

$$\sigma_{пр} = -E\alpha\Delta t, \qquad (3)$$

где E – модуль упругости; α – коэффициент линейного расширения; $\Delta t = t_{вн} - t_н$ – температурный перепад; $t_{вн}$ и $t_н$ – температура стенки осесимметричной детали в рассматриваемый момент времени с внутренней и наружной сторон.

при изгибе осесимметричной детали возникают напряжения изгиба

$$\sigma_{пр} = \pm\frac{ED_н}{2\rho}, \qquad (4)$$

где $D_н$ – наружный диаметр осесимметричной детали; ρ – радиус изгиба. Знак плюс относится к растягивающим напряжениям, а знак минус – к сжимающим.

Радиальные напряжения σ_ρ не оказывают значительного влияния на сжатие или изгиб. Поэтому ими можно пренебречь.

Анализ выражений (1 – 4), показывает, что напряжения в осесимметричных деталях зависят от природы материала: модуля упругости и коэффициента линейного расширения и

от температуры. Из-за варьирования температуры в осесимметричных деталях возникают большие сжимающие напряжения, которые изменяют условия деформирования материала и усиливают продольно-поперечные изгибы, что приводит к потере продольной устойчивости и резкому увеличению прогибов и смятия. Так, например, при понижении температуры металла осесимметричной детали на 2^{o}C растягивающие продольные напряжения в металле увеличиваются на 5 МПа.

Продольные усилия влияют на несущую способность осесимметричной детали на всех стадиях разрушения: образования и увеличения трещин, развития пластических деформаций (при вязком разрушении) и распространения трещин (при хрупком разрушении), и увеличивают напряжения изгиба и сжатия.

При предельном состоянии осесимметричных деталей нормальная их эксплуатация невозможна. Однако различают первое, второе и третье предельные состояния. Первое предельное состояние, наиболее опасное, наступает при достижении, когда рассматриваемая деталь теряет несущую способность или способность сопротивляться приложенным к нему усилиям и разрушается. Второе и третье предельные состояния характеризуются чрезмерными, недопустимыми при эксплуатации, соответственно, остаточными деформациями, колебаниями или трещинами. При этом осесимметричная деталь не разрушается, ее прочность и устойчивость сохраняется.

Достижение предела текучести не означает потерю работоспособности. Осесимметричная деталь может эксплуатироваться до тех пор, пока напряжения в ней, не достигнут предела прочности. Из условия прочности можно получить минимальную толщину стенки детали [2]:

$$\delta = npD/\left[2\left(R_1 + np\right)\right], \qquad (5)$$

где n – коэффициент надежности, R_1 - расчетное сопротивление, определяется как $R_1 = \sigma_{пр} m/(k_1 k_H)$, m – коэффициент долговечности детали; k_1 – коэффициент надежности материала; $k_н$ – коэффициент запаса, определяемый из условия работы детали.

При наличии продольных осевых сжимающих напряжений толщину стенки можно определить как:

$$\delta = \frac{0{,}5npD}{\left[\left\{0{,}5\frac{\left|\sigma_{пр}\right|}{R_1}\right\}^2 - \left\{0{,}5\frac{\sigma_{пр}}{R_1}\right\}\right]R_1 + np} \qquad (6)$$

Полученное расчетное значение толщины стенки осесимметричной детали (5, 6) округляется до ближайшего большего значения.

Таким образом, в осесимметричной детали возникают от силовых воздействий напряжения: кольцевые, зависящие от внутреннего давления; продольные, создаваемые либо под действием внутреннего давления либо при изменении температуры. Те и другие вызывают изменение деформаций. При их увеличении происходит потеря прочности или устойчивости осесимметричных деталей. Что бы оценить насколько опасно то или иное напряженное состояние необходимо учитывать условие прочности. Установлено, что при наступлении предельного напряженного состояния осесимметричных деталей необходимо учитывать влияние температуры и масштабного фактора, устанавливающего зависимость величины используемых механических характеристик материала от размеров детали. Расчет осесимметричной детали на прочность произведен по методу предельных состояний и включает определение толщины стенок детали.

Список литературы

1. *Долганов А.М., Жуланов В.А., Иванова Т.Н., Юрков В.Ф.* Теоретическая модель прогнозирования остаточных напряжений при шлифовании. Научно-технический вестник Поволжья. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2012. – вып. № 3 2012. – С. 110 - 113.

2. СНиП 2.04.12-86 Расчет на прочность деталей.

05.22.13

В.А. Кондряков, Аль-Рубой Мудар, Е.А. Рубцов

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, факультет аэропортов и инженерно-технического обеспечения полётов,
кафедра «Радиоэлектронные системы», Санкт-Петербург, rubtsov.spb.guga@rambler.ru

ВАРИАНТ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИСТЕМ VOR/DME В РЕСПУБЛИКЕ ИРАК

Предлагается вариант рационального размещения VOR/DME на территории Республики Ирак для обеспечения требуемой точности и безопасности полетов в случае отказа спутниковых систем навигации. Применяется модифицированный метод определения рационального размещения РТС навигации, который позволяет решить задачу полного перекрытия воздушного пространства Республики Ирак зонами действия и перекрытия воздушных трасс рабочими областями.

Ключевые слова: *оптимизация, VOR, DME, рациональное размещение.*

Республика Ирак имеет хорошее географическое положение: при внедрении спрямленных маршрутов рейсы из городов Европы в крупные хабы Абу-Даби, Дубай и др. будут проходить через воздушное пространство (ВП) страны. Для этого аэронавигационная служба страны должна решить задачу обеспечения требуемого уровня безопасности полетов. Ключевым моментом станет обеспечение требуемой точности самолетовождения, удовлетворяющей принятой в регионе навигационной спецификации. ИКАО рекомендует в качестве основного навигационного средства использовать GPS. Однако, в современной геополитической обстановке вывод определенного региона из зоны действия GPS является реальной опасностью. Это обстоятельство требует построения национальной независимой навигационной системы на базе маяков VOR и DME. В настоящее время в Республике Ирак действует одна система VOR/DME в аэропорту Basrah и маяк DVOR в аэропорту Baghdad [1]. Существующие средства не в состоянии обеспечить требуемую точность и безопасность полетов в отсутствие сигналов GPS. Поэтому, целью данной статьи является определение рационального состава и размещения дополнительных радиотехнических средств (РТС) навигации для обеспечения требуемой точности и безопасности полетов.

Для решения задачи воспользуемся подходом, разработанным в Академии гражданской авиации инициативной группой под руководством Г.А. Крыжановского [2]. Суть его состоит в представлении анализируемой области воздушного пространства в виде набора пронумерованных точек, взятых с определенным шагом. Затем определяются возможные позиции размещения РТС, зоны обзора которых покрывают определенное количество точек (что можно отобразить в виде матрицы). Решается задача методом целочисленного линейного программирования в булевых переменных, позволяющим определить позиции РТС, зоны обзора которых покрывают все точки воздушного пространства при минимальных взаимных перекрытиях [3].

Решение задачи рационального размещения для РТС навигации требует модернизации исходного метода, заключающейся в учете разбиения радионавигационного поля на зону действия и рабочую область, а также неравнозначности анализируемых точек воздушного пространства, путем введения весовых коэффициентов. Зона действия (ЗД) характеризует область, где возможно получение требуемой навигационной информации, а рабочая область (РО) – объем пространства, где обеспечивается требуемая точность и безопасность полетов [4]. Произведем оценку позиций РТС навигации, список которых представлен в таблице 1.

Таблица 1– Позиции РТС навигации

№	Позиция	Координаты	№	Позиция	Координаты
1	Mosul	36.18.12N 43.08.50E	13	Al Kut	32.30.00N 45.50.40E
2	Erbil	36.14.21N 43.57.08E	14	An Nukhyab	32.02.28N 42.15.18E
3	Kirkuk	35.28.17N 44.21.02E	15	An Najaf	31.21.12N 44.05.51E
4	Sulaymaniyah	35.34.03N 45.19.20E	16	Ad Diwaniyah	31.59.03N 44.55.19E
5	Tikrit	34.35.46N 43.40.36E	17	Al Hayy	32.11.02N 46.02.52E
6	Hadithah	34.07.54N 42.22.04E	18	Al Amarah	31.50.00N 47.08.58E
7	Diyala	33.47.08N 45.08.55E	19	As Samawah	31.18.40N 45.17.00E
8	Rutbah	33.02.17N 40.17.06E	20	Nasiriya	31.05.30N 46.15.30E
9	Ar Ramadi	33.26.10N 43.18.12E	21	As Salman	30.30.21N 44.32.19E
10	Al Fallujah	33.20.00N 43.47.58E	22	Basrah	30.31.32N 47.41.12E
11	Baghdad	33.17.31N 44.13.31E	23	Al Bussayyah	30.07.18N 46.07.58E
12	Karbala	32.36.23N 44.00.23E			

Зоны действия будем строить для высоты полета 7000 м: эта высота является нижней границей ВП класса А и верхней границей ВП класса Е, что обеспечит требуемое покрытие для основной массы дальнемагистральных ВС и приемлемое покрытие для региональных ВС [1]. Для обеспечения безопасности полетов, зонами действия должно быть покрыто все воздушное пространство страны. При решении задачи используется матрица, представленная в таблице 2 (назовем ее матрицей Z). Полное покрытие страны зонами действия возможно при различных комбинациях позиций РТС, в качестве примера приведем три варианта:

$Z1 + Z2 + Z8 + Z11 + Z21 + Z22 = 291$ (1)

$Z2 + Z5 + Z8 + Z11 + Z21 + Z22 = 327$ (2)

$Z1 + Z2 + Z8 + Z11 + Z14 + Z20 + Z22 = 364$ (3)

Рациональным является вариант (1), так как он позволяет минимизировать количество РТС и взаимные перекрытия ЗД. Объединенная зона действия выбранных позиций РТС показана на рисунке 1 (выделено желтым цветом).

Системам VOR/DME свойственны погрешности: 1.5° по каналу азимута и 463 м по каналу дальности [5], эти значения использованы для расчета размеров РО. В этом случае радиус РО составит 146 км, и это значение будет использоваться в дальнейших расчетах.

Таблица 2– Матрица покрытия для зон действия РТС навигации

i	VOR/DME																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
48	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●		●									
64			●	●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●						
66			●	●	●		●		●	●	●	●	●		●	●	●	●					
78			●		●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
91					●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		
113						●		●	●	●	●	●		●	●	●			●		●		
129									●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●		●
130										●	●	●	●		●	●	●	●	●	●	●	●	●
148												●	●	●	●	●	●		●	●	●		●
160													●		●	●	●		●	●	●	●	●

Для обеспечения требуемой точности самолетовождения, рабочими областями должны быть перекрыты воздушные трассы, т.е. коридоры шириной ±10 морских миль [4]. Это требует построения матрицы покрытия воздушных трасс РО (матрица R). Вид ее аналогичен матрице Z. При решении, получаем множество вариантов размещения РТС, рациональным будет вариант, обеспечивающий минимальное количество РТС и взаимные перекрытия РО (выделено на рисунке 1 красным).

Разработанный модифицированный подход в решении задачи рационального размещения РТС навигации требует составления двух матриц покрытия: для зон действия (Z) и для рабочих областей (R). Анализ совокупности решений этих матриц дает вариант, который обеспечивает перекрытие страны ЗД, перекрытие воздушных трасс РО при минимальном количестве РТС и взаимных перекрытиях ЗД и РО.

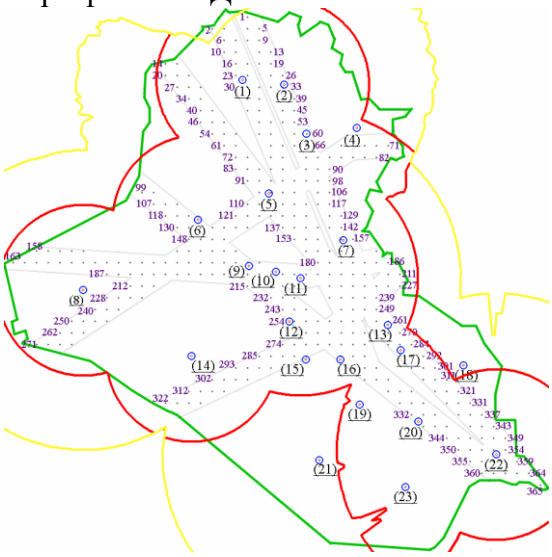


Рис. 1– К задаче перекрытия воздушного пространства страны зонами действия и рабочими областями систем VOR/DME и DME/DME

Расчет матриц покрытия ЗД и РО (матрицы Z и R) для указанных в таблице 1 позиций позволил найти рациональный вариант размещения дополнительных систем VOR/DME в Республике Ирак. Это позиции: №1 – Mosul, №2 – Erbil, №6 – Hadithah, №8 – Rutbah, №14 – An Nukhyab, №15 – An Najaf, №21 – As Salman. Полученные ЗД и РО представлены на рисунке 1, где видно, что поставленная задача полностью решена.

Задачей статьи была разработка варианта рационального состава и размещения систем VOR/DME в Республике Ирак. Для решения задачи использовался модифицированый метод определения рационального размещения РТС навигации, отличающийся от исходного [2] тем, что в нем учитывается разбиение радионавигационного поля на ЗД и РО путем построения двух матриц покрытия Z и R, а также неравнозначность точек воздушного пространства путем введения весовых коэффициентов. Решением задачи стал вариант состава и размещения РТС, при котором обеспечивается покрытие страны ЗД и воздушных трасс РО систем VOR/DME (рисунок 1).

Список литературы

1. Republic of Iraq. Aeronautical information publication (AIP). Edition Seventy-Five. Effective 24 July 2014. – Baghdad, Iraq, 2014. – 414 p.

2. *Дубровский В.И., Крыжановский Г.А., Солодухин, В.А.* Организация радиотехнического обеспечения в системе УВД. – М.: Транспорт, 1985. – 164 с.

3. *Floudas C. A., Pardalos P. M.* Encyclopedia of Optimization. – Springer Science+Buisiness. – 2nd edition, 2009. – 4626 p.

4. *Соболев Е.В.* Организация радиотехнического обеспечения полетов. Часть 1. – СПб: СПбГУ ГА. – Санкт-Петербург, 2007. – 120 с.

5. *Moir I., Seabridge A., Jukes M.* Civil avionics systems. – 2nd edition. – John Wiley & Sons Ltd, 2013. – 612 p.

05.05.04

В.В. Конев, Д.М. Бородин

Тюменский государственный нефтегазовый университет, институт транспорта,
кафедра транспортных и технологических систем,
Тюмень, konev@tsogu.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

В работе представлены результаты исследования процессов изменения теплового состояния строительно-дорожных машин, эксплуатируемых в северных условиях России. Экспериментально исследуется новый подход, заключающийся в сохранении тепла машины, накопленного во время рабочей смены. Это позволяет исключить использование внешних источников энергии для предпусковой тепловой подготовки машины, эксплуатируемой автономно.

Ключевые слова: *тепловая подготовка, гараж, строительно-дорожные машины, хранение, эксплуатация, экспериментальные исследования.*

При проведении работ в зимний период на северных территориях России возникают проблемы с эксплуатацией строительно-дорожных машин (СДМ). Это связано с обеспечением их теплового состояния (ДВС, гидропривод, трансмиссия, кабина машиниста) в условиях автономного функционирования в дали от стационарных баз. Поэтому использование внешних источников энергии, тепла, гаражей ограничено.

В соответствие с этим возникает необходимость исследования и разработки способов и средств для снижения влияния факторов внешней окружающей среды на СДМ.

Одним из решений данной задачи является подход по сохранению тепла машины, накопленного ею в процессе рабочей смены. Это позволяет не использовать дополнительные внешние источники тепла для ее подготовки к работе [1].

Предложена и исследуется конструкция транспортабельного гаража. Ранее предложенные конструкции гаражей для СДМ имеют большую массу и не транспортабельны. В соответствие с этим при разработке учитываются следующие требования к конструкции гаража: простота монтажа и демонтажа, снижение массы конструкции, сохранение теплового состояния машины в течение 8 – 16 часов, транспортабельность, надежность, низкая себестоимость.

С целью проверки теоретических исследований [2] проводятся экспериментальные исследования. Схема экспериментальной установки представлена на рис.

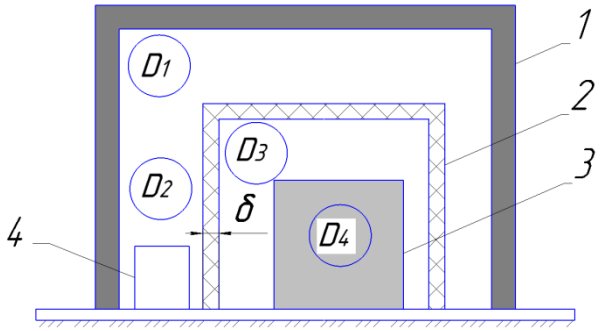


Рис. Схема экспериментальной установки: 1 – холодильная камера;
2 – модель гаража; 3 – модель строительно-дорожной машины;
4 – вентилятор; D1, D3, D4 – датчики температуры;
D2 - датчик измерения скорости движения потока воздуха

В ходе эксперимента исследовались изменение теплового состояния физической модели СДМ в течение времени.

На первом этапе было проведено планирование эксперимента, которое включало составление матрицы плана, подбор и оценка качества измерительного оборудования.

Основными факторами влияния на время охлаждения СДМ являются [2]:

- X_1 - температура окружающего воздуха, $t_{воз}$ (^{0}C);
- X_2 - толщина теплоизоляционного материала, δ (м);
- X_3- скорость ветра, $V_в$ (м/с).

Характеристики факторов представлены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики факторов

Уровни факторов	**Факторы**		
	X_1	**X_2**	**X_3**
Верхний	-10	0,1	18
Нижний	- 40	0,02	0
Средний (базовый)	- 25	0,06	9

Определение уровней варьирования факторов осуществлялось по следующим данным:

- температура воздуха и скорость ветра согласно данных для территорий Тюменской области [3];
- толщина теплоизоляционного материала, исходя из расчетных данных [2].

Общее количество опытов зависит от количества уровней фактора (m) и количества факторов (n). Для полного факторного эксперимента составит $N = m^n$, т.е. для проводимых исследований 27 опытов.

Экспериментальные исследования проводились в холодильной камере (Refrigerant: R134A, EK35BASIC DK 9620). Минимальная температура в камере (-40 ^{0}C), объем камеры 1м^3. Температура окружающего воздух в морозильной камере замерялась жидкостным термометром с предельной шкалой измерения от -50 ^{0} C до +50 ^{0}C, ценой деления 1 ^{0}C и классом точности 1,0. Систематическая погрешность составляла (+50-(-50))×1,0/100 =1 ^{0}C. Температуры физической модели СДМ замерялась мультиметром с термопарой типа «К». систематическая погрешность измерений данного прибора от -40 0^0C до +50 ^{0}C составляет ±1,5 ^{0}C. Проводимая тарировка прибора и контрольные замеры позволила повысить качество измерений с погрешностью ± 1 ^{0}C.

Для замера скорости потока воздуха, создаваемого вентилятором использовался анемометр. Число оборотов которого в данный промежуток времени соответствует определенной средней скорости ветра. При средней скорости ветра за 100 секунд погрешность составляет до 0,1 м/с. Предельная шкала прибора составляет от 0,13 до 80 м/с. Время охлаждения физической модели в холодильной камере замерялось секундомером.

При проведении исследований применялись пассивные эксперименты. Это позволяет исключить возникновение грубых ошибок, а также упростить проведение экспериментальных исследований.

Оценка значений погрешностей (случайных и систематических) показала, что в ходе предварительных измерений систематическая погрешность (приборная) больше случайной. Поэтому число повторений в опыте принято равным 2. С целью снижения значений систематической погрешности (исключения ее накопления в ходе проведения замеров во всех точках плана эксперимента) применялась рандомизация, которая позволяет взаимно уничтожать «+» и «-» погрешностей измерительного прибора. Для этого используются несколько измерительных приборов одного класса точности, причем последовательность их использования осуществляется в случайном порядке.

Предварительно разогретая модель, накрытая теплоизоляционным материалом помещалась в холодильную камеру и засекалось время охлаждения в зависимости от факторов: толщина теплоизоляционного слоя, скорость потока и температура окружающего

воздуха. Время охлаждения измерялось с использованием секундомера. Полученные результаты заносились в таблицу и обрабатывались. Обработка результатов велась в программе «REGRESS». Данная программа позволяет учитывать нелинейность многофакторных зависимостей. Парное взаимодействия влияния факторов на выходной параметр оценивалось коэффициентом парной корреляции.

Для учета нелинейной зависимости параметров при обработке результатов использовано уравнение регрессии в виде полинома второго порядка.

$$f = A_0 + A_1X_1 + A_2X_2 + A_{12}X_1X_2 + A_{11}X_1^2 + A_{22}X_2^2,$$

где: f - функция отклика; A - коэффициент уравнения регрессии; X_i - значение факторов.

По величине значения коэффициента регресси определено, что наибольшее влияние на охлаждение модели оказывают скорость ветра и толщина теплоизоляционного материала.

Алгоритм расчета мобильного гаража будет содержать:

1. Выбор строительно-дорожной машины для которой разрабатывается гараж.
2. Расчет габаритов гаража, исходя из размеров машины.
3. Выбор теплоизоляционного материала, исходя из предполагаемой продолжительности межсменного хранения машины.
4. Расчет на прочность сварных и подвижных соединений с учетом размеров и массы элементов гаража.
5. Расчет на устойчивость с учетом воздействия ветровой нагрузки.
6. Теплотехнические расчеты исходя из параметров машины, теплоизоляции, размеров гаража, продолжительности межсменного хранения машины.
7. Расчет стоимости гаража исходя из затрат на материалы и работы.

Экономический эффект достигается за счет сокращения времени на тепловую подготовку машины и, следовательно, снижения затрат на топливо, а также на внеплановые ремонты.

Список литературы

1. *Конев В.В., Райшев Д.В., Саудаханов Р.И.* Разработка конструкции гаража для строительно-дорожных машин, эксплуатируемых в условиях севера // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6; URL: http://www.science-education.ru/120-16672.

2. *Конев В.В., Закирзаков Г.Г., Райшев Д.В.* Математическое моделирование теплового состояния строительно-дорожных машин // Современные проблемы науки и образования, 2014, № 6; http://www.science-education.ru/120-16957.

3. *Карнаухов Н.Н.* Приспособление строительных машин к условиям Российского Севера и Сибири. - М. : Недра, 1994. - с. 23- 31.

05.23.07

Ю.А. Кузнецова

Поволжский государственный технологический университет,
институт строительства и архитектуры, кафедра строительных конструкций и водоснабжения, Йошкар-Ола, KuznecovaYA@volgatech.net

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ДОННОГО СЛОЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Разрушение донного слоя распределенными нагрузками исследовано на основе энергетической модели устойчивости стержней. По зависимости для изгибающего момента определена энергия изгиба. В результате подстановки параметров слоя донного грунта в выражения энергии изгиба и работы силового воздействия, индуцированного потоком в нижнем бьефе, найдена функция глубин размыва от длины русла. Выведена формула критической скорости размыва.

Ключевые слова: *гидротехническое сооружение, деформация донного слоя, нижний бьеф, энергетическая модель устойчивости, модельная балка, сцепление частиц грунта, глубина размыва.*

Целью работы является определение глубины донного размыва за водосбросным сооружением, возникающего при сопряжении бьефов, на основе энергетического подхода.

Новизной отличается моделирование параметров деформации донного слоя грунта на основе схемы нагружения балки продольными и поперечными внешними силовыми факторами.

Пусть стержень (рис. 1) сжат силой P, меньшей критического значения, что обеспечивает ему устойчивое равновесие [1]. Изгиб стержня произойдет в случае приложения поперечной силы P_1.

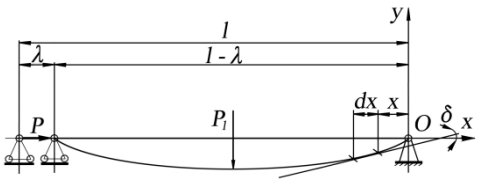


Рис. 1 – Продольное нагружение стержня [1]

Работа, совершаемая при переходе стержня от прямолинейной формы к криволинейной, приводит к росту потенциальной энергии изгиба

$$U_{\text{изг}} = P\lambda + A(P_1),$$

где $A(P_1)$ – работа поперечной силы P_1; λ – перемещение точки приложения продольной силы.

Если поперечная сила отсутствует, переход от прямолинейной формы стержня к криволинейной возможен в случае приложения продольной критической силы $P = P_{\text{кр}}$ [2]. Эта ситуация соответствует потере устойчивости стержня, и уравнение примет вид

$$U_{\text{изг}} = \lambda P_{\text{кр}}.$$

Энергия изгиба с учетом уравнения нагружения балки

$$U_{\text{изг}} = \int_o^l \frac{M_{\text{изг}}^2}{2EJ} dx,$$

где $M_{\text{изг}} = EJk = EJ\dfrac{y''}{\left(1+y'^2\right)^{3/2}}$, k – кривизна балки, поэтому

$$U_{\text{изг}} = \int_0^l \frac{EJy''^2}{2\left(1+y'^2\right)^3} dx.$$

Перемещение λ определяется разностью между длиной l и проекцией l_p изогнутой упругой линии на прямую, соединяющую опоры

$$d\lambda = dx - dx\cos\delta = (1-\cos\delta)dx = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+y'^2}}\right)dx.$$

Поэтому

$$\lambda = \int_o^l dx - \int_0^l \frac{dx}{\sqrt{1+y'^2}}.$$

В случае если вместо сосредоточенной силы P на стержень действует распределенная сила q, перепишем зависимость $U_{изг} = \lambda P_{кр}$ в виде $U_{изг} = \lambda q_{кр} l$.

Величина распределенной нагрузки q является функцией индуцированной вихревым слоем скорости струи $\overline{w}_{\xi\eta}$.

Поскольку величина силы динамического давления, производимая потоком жидкости в направлении его движения P равна секундному количеству движения потока по этому направлению [3], то для распределенной нагрузки на стержень запишем

$$q = \frac{P}{l} = \mu\rho_г w_{\xi\eta}^2 \frac{F}{l} = \mu\rho_г w_{\xi\eta}^2, \text{ Н/м}^2,$$

где учтены условия размерности плоской задачи, при которых, в частности, момент инерции сечения стержня относительно оси z, проходящей через нейтральную линию ($y = 0$), равен $J = \frac{h^3}{12}$, м^3, $\rho_г$ – плотность грунта, кг/м^2; F – площадь давления индуцированного потока, м.

Момент инерции с учетом того, что толщина слоя h равна диаметру d_t агрегатов, слагающих дно, равен $J = \frac{d_t^3}{12}$.

При малых прогибах балки $\delta \approx h_p'$, где δ – угол изгиба балки, $h_p'(x)$ – производная функции глубины по длине потока, поэтому

$$d\lambda = dx - dx\cos\delta \approx \frac{\delta^2}{2}dx \text{ или } \lambda = \frac{1}{2}\int_o^l h_p'^2 dx.$$

Малое значение прогиба означает, что, например, при длине области действия струи за рисбермой 200 м глубина размыва, равная $h_p = 5$ м, составляет 2,5 %.

С учетом того, что $q = \mu\rho_г u^2$, где коэффициент расхода $\mu = 0{,}77$, запишем

$$q = \mu\rho_г C_{o1}^2 \left(\frac{2a}{x}\right)^2,$$

где учтена зависимость $u = C_{o1}\frac{2a}{x}$ [4].

С другой стороны, энергия изгиба балки приближенно равна

$$U_{изг} = \frac{1}{2}\int_o^l EJh_p''^2 dx.$$

Использовав равенство $E = c$, где c – сцепление грунта, отнесенное к ширине размыва b, Н/м^2; $J = \frac{d_t^3}{12}$ – момент инерции по ширине размыва, отнесенный к ширине размыва, м^3, запишем

$$U_{изг} = \frac{cd_t^3}{24}\int_o^l h_p''^2 dx.$$

Работа сил q на перемещении λ равна

$$\int_o^l q\lambda dx = 2a^2\mu\rho_г C_{o1}^2 \int_o^l \left(\frac{1}{x}\right)^2 h_p'^2 dx.$$

Для решения задачи следует приравнять эту величину к энергии изгиба $U_{изг}$ и найти функцию $h_p(x)$.

Решение соответствующей вариационной задачи достаточно сложный процесс, поэтому ограничимся приближением, подбирая функцию $t = f(x)$. Практика энергетических расчетов

показывает, что получаемые решения обычно дают завышенные значения q, что, вероятно, приводит к занижению расчетных величин искомых прогибов (глубин размыва) $t(x)$.

Выберем, например, функцию

$$h_p(x) = -a \cdot \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right),$$

производные которой имеют вид

$$h'_p(x) = -\frac{a \cdot l}{2x^2} \cdot \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right);$$

$$h''_p(x) = -\frac{a \cdot l^2}{4x^4} \cdot \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right) + \frac{a \cdot l}{x^3} \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right).$$

В результате интегрирования найдем

$$\int_o^l \left(\frac{1}{x}\right)^2 \left[-\frac{a \cdot l}{2x^2} \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right)\right]^2 dx = \frac{65a^4 e}{l^2},$$

$$\int_o^l \left[-\frac{a \cdot l^2}{4x^4} \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right) + \frac{a \cdot l}{x^3} \exp\left(1 - \frac{l}{2x}\right)\right]^2 dx = \frac{389a^2 e}{16l^3}.$$

Поскольку значение интеграла

$$\int_o^l q\lambda dx = 2\mu\rho_г C_{o1}^2 a \frac{65a^4 e}{l^3} = 130\mu\rho_г C_{o1}^2 \frac{a^5 e}{l^3},$$

а значение функции

$$U_{изг} = \frac{cd_t^2}{24} \int_o^l t''^2 dx = \frac{cdt_t^2}{24} \frac{389a^2 e}{16l^3} \approx cd_t^2 \frac{a^2 e}{l^3},$$

то, приравняв результаты, напишем

$$130\mu\rho_г a^3 C_{o1}^2 = cd_t^3.$$

Выразим величину C_{o1}, определяющую критическую скорость размыва, в виде

$$C_{o1} = \sqrt{\frac{cd_t^3}{130\mu\rho_г a^3}} \approx 0{,}1\sqrt{\frac{cd_t^3}{\rho_г}}, \text{ м/с},$$

где учтено, что $\mu = 0{,}77$, размерность сцепления c – Н/м^2, размерность плотности грунта $\rho_г$ – кг/м^3.

Полученное значение скорости направлено вниз под углом θ при наклонной струе потока. Уравнение кривой определяется относительно наклонной линии рисбермы.

Разрушение донного слоя внешними распределенными нагрузками исследовано на основе энергетической модели устойчивости стержней. Энергия изгиба определяется по зависимости для изгибающего момента. Работа внешних сил на перемещении стержня от действия распределенной нагрузки находится из условий плоской задачи.

В результате подстановки параметров слоя донного грунта в выражения энергии изгиба и работы силового действия, индуцированного струйным течением, находится функция распределения глубин размыва по длине русла. В итоге выведена формула для вычисления критической скорости размыва.

Список литературы

1. *Феодосьев, В.И.* Сопротивление материалов/ В. И. Феодосьев. М.: Наука, 1967. - 552 с.

2. Строительная механика. Динамика сооружений: учебник для вузов/ А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лащенков, Н.Н. Шапошников; под ред. А.Ф. Смирнова. М.: Стройиздат, 1984. - 416 с.

3. *Милович, А.Я.* Теория динамического взаимодействия тел и жидкости/ А.Я. Милович. М.: Госстройиздат, 1955. - 310 с.

4. *Кузнецова, Ю.А.* Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография/ Ю.А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.

05.23.05

С.В. Леонтьев к.т.н., В.А. Голубев, В.А. Шаманов, А.Д. Курзанов

ФГБОУ ВПО «ПНИПУ», строительный факультет, кафедра СИМ,
Пермь, n1306cl@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ГАЗОБЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

В статье представлены результаты исследования влияния различных газообразователей на формирование структуры ячеистого бетона, а также дана оценка эффективности их использования. Замена в составе АГБ алюминиевой пудры «ПАП-1» на специализированный газообразователь «Stapa Alupor N905» позволила снизить плотность образцов на 15-20% за счет формирования гексагональной ячеистой структуры материала, а также стабилизировать процессы газообразования и вспучивания ячеистобетонного массива.

Ключевые слова: *Автоклавный газобетон, теплоизоляция, алюминиевая паста, специализированный газообразователь, структурообразование.*

Многие десятилетия снижение плотности автоклавного газобетона (АГБ) является одной из главных задач научных исследований разных стран. Так, в России за последние 20 лет плотность выпускаемых из АГБ изделий снизилась с 640 кг/м^3 до 520 кг/м^3. Следуя намеченным тенденциям, некоторые производители выпускают блоки из АГБ с плотностью 300-400 кг/м^3. Перспективным так же является снижение плотности ячеистого бетона до 200 кг/м^3 и ниже [1]. Материал такой плотности можно эффективно использовать в качестве теплоизоляции ограждающих конструкций зданий, что позволит повысить производительность монтажных работ, увеличить темпы строительства и снизить нагрузку на фундаменты [2]. Однако производство изделий из АГБ пониженной плотности сопровождается рядом проблем, одной из которых является получение оптимальной пористой структуры. Именно этой проблеме в последнее время уделяется все большее внимание.

Одни авторы стремятся получить оптимальную структуру ячеистого бетона в виде равномерно распределенных по всему объему материала ячеек гексагональной формы, не учитывая при этом прочностные характеристики газосиликата [3]. Другие исследователи решают задачу обеспечения однородности поровой структуры по высоте массива [4]. При этом большинство авторов сходится во мнении, что главной технологической особенностью получения теплоизоляционных газобетонных изделий, характеризующихся высокой пористостью и достаточной прочностью, является создание оптимальных условий для одновременного протекания двух основных процессов, таких как вспучивание (газовыделение) и сохранение структуры пор (газоудержание) за счет набора необходимой пластической прочности межпорового пространства АГБ. Одновременное выполнение этих условий достигается правильным подбором вида и количества газообразователя и обеспечением требуемой скорости нарастания пластической прочности ячеистобетонной смеси.

Одним из видов таких газообразователей может являться пудра «ПАП-1», при использовании которой авторами были получены образцы теплоизоляционного автоклавного газобетона марки по средней плотности D250 и класса по прочности B0,5, отличающиеся разнородной пористой структурой [5]. К другому виду таких газообразователей можно отнести алюминиевые пасты или специализированные газообразователи (СГО), которые, в отличие от алюминиевых пудр марок «ПАП-1» и «ПАП-2», имеют более однородный дисперсный состав, низкую степень пыления и высокое содержание активного алюминия, что способствует получению АГБ пониженной плотности с равномерной структурой и формой пор.

Таким образом, с целью снижения плотности при сохранении заданного уровня прочности газосиликата, было принято решение исследовать влияние СГО на процессы структурообразования АГБ.

Основными показателями качества газообразователей были выбраны: гранулометрический состав, кинетика газообразования, содержание активного алюминия. Эффективность использования газообразователей оценивали по показателям плотности, теплопроводности и структуры пор образцов АГБ.

По результатам дисперсионного анализа (рис. 1) установлено, что алюминиевая пудра характеризуется разнородным дисперсным составом, нежели СГО. При этом распределение частиц СГО лежит в более узком интервале, что положительно сказывается на полноте и интенсивности протекания процесса вспучивания массива.

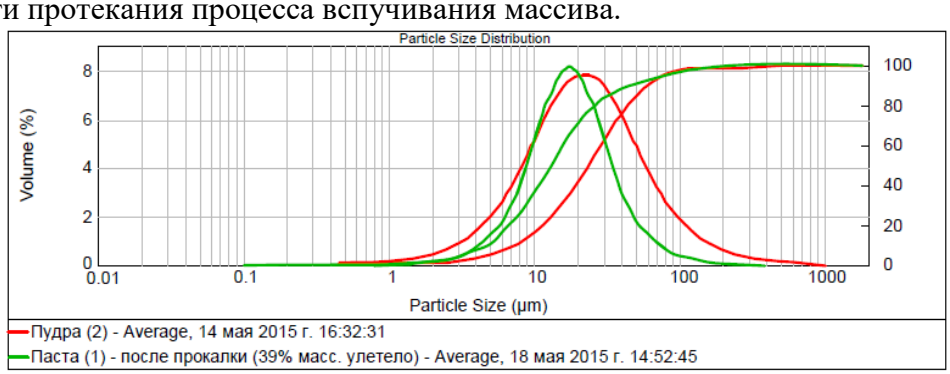


Рис. 1 – Результаты гранулометрического анализа

Данные, полученные в ходе определения кинетики газообразования (ГОСТ 5494-95), представленные на рисунке 2а в виде графика, позволяют сделать вывод, что при взаимодействии $Ca(OH)_2$ с СГО большее количество газа выделилось в течение первых 8 минут реакции. Реакция газовыделения при использовании пудры «ПАП-1» характеризуется длительным временем протекания, меньшим объемом выделенного водорода, и, что самое главное, неравномерной кинетикой газовыделения. Все вышеперечисленные факты оказывают значительное воздействие на динамику вспучивания массива.

Для изучения влияния выбранных газообразователей на теплофизические характеристики ячеистого бетона (плотность, теплопроводность и структура пор) был проведен промышленный эксперимент с изменением расхода газообразователей от 25 до 45 г на 50 литров ячеистобетонной смеси, с шагом варьирования 5 г. В результате была установлена нелинейная зависимость изменения плотности газобетона от расхода различных газообразователей (рис.2б).

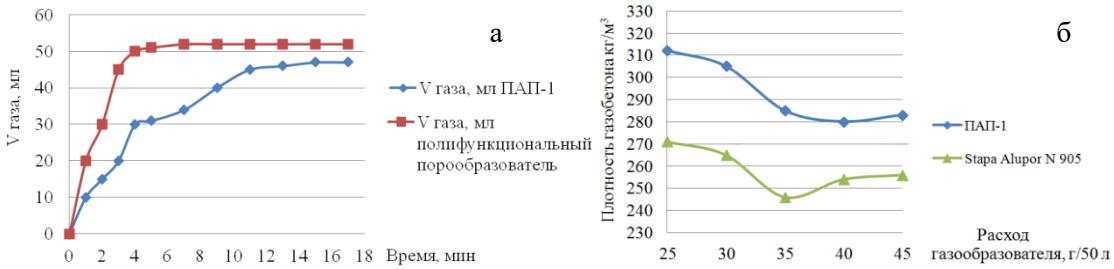


Рис. 2 – а) график зависимости объёма выделившегося газа от времени протекания реакции; б) график зависимости плотности газобетона от количества газообразователя

По графику на рисунке 2б видно, что наименьшая плотность АГБ получена при использовании СГО «Stapa Alupor N905» и составляет 245 кг/м^3, что на 15% меньше средней плотности образцов на пудре «ПАП-1».

Также необходимо отметить различия в процессах вспучивания массивов. При использовании СГО вспучивание массива протекало равномерно и за короткий временной интервал (порядка 4-5 минут), при этом не наблюдалось кипения и разрывов газобетонной массы, чего нельзя отметить у образцов на пудре. Такое различие также объясняется

разницей в гранулометрическом составе, кинетике газообразования, а также в количестве активного алюминия в составах газообразователей: у СГО его содержание больше в среднем на 10%.

В ходе анализа макроструктуры образцов (рис. 3) установлено, что образцы газобетона на СГО отличаются равномерной гексагональной структурой порового пространства, в то время как ячеистая структура АГБ на «ПАП-1» разнородна и неравномерна по всему объему массива. Это стало возможным благодаря стабилизации процессов газообразования и вспучивания образцов газобетона на основе алюминиевой пасты.

Однако в ходе проведенных экспериментов не была достигнута основная задача исследования, а именно снижение плотности автоклавного газобетона до 200 кг/м^3 и ниже. Попытка решить эту задачу только за счет увеличения расхода газообразователя приводит к разрушению межпоровых перегородок и оседанию массива в процессе набора его пластической прочности.

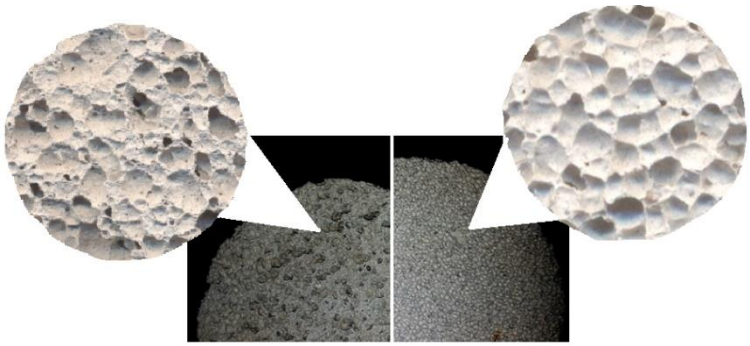


Рис. 3 – Макрофотографии образцов АГБ; слева – образец, полученный с использованием алюминиевой пудры «ПАП-1», справа – образец на основе алюминиевой пасты «Stapa Alupor N905»

Данный факт объясняется тем, что при оптимальном, для описанного выше эксперимента, расходе СГО, система, зависящая от протекания двух последовательных процессов (газовыделения и газоудерживания) находится в равновесии. При увеличении расхода СГО система переходит в нестабильное состояние, а именно, газовыделение происходит настолько интенсивно, что межпоровые перегородки не успевают набрать необходимую пластическую прочность, что, в конечном счете, приводит к оседанию массива и увеличению плотности АГБ.

Таким образом, для дальнейшего снижения плотности автоклавного газобетона необходимо провести дополнительные исследования и определить основные способы управления набором пластической прочности твердой фазы межпорового пространства материала.

Список литературы

1. Производство автоклавного газобетона в России: состояние рынка и перспективы развития / *Гринфельд Г.И.* //Строительные материалы. 2013. № 2.С.76-78.

2. Производство автоклавного газобетона в России: перспективы развития подотрасли / *Левченко В.Н., Гринфельд Г.И.* //Строительные материалы. 2011. №9.С. 44-47.

3. Высокопоризованные ячеистые бетоны для эффективных теплоизоляционных плит */ Е.М. Чернышов [и др.]* // Строительные материалы. 2013. №4. С.89-93.

4. Оптимизация структуры газосиликата с применением мультипараметрической модели плит */ А.А. Бедарев [и др.]* // Вестник ТГАСУ. 2007. №1. С.184-187.

5. Опыт получения автоклавного теплоизоляционного газобетона / *С.В. Леонтьев [и др.]* // Вестник ЮУрГУ. Строительство и архитектура. 2014. Том 1. № 1. С. 46-48.

05.13.18

Р.И. Ливеровский

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, кафедра математического и компьютерного моделирования, Саратов, r.liverovskiy@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ

Данное исследование посвящено модификации метода крупных частиц для случая четырехгранной сетки. В работе проводится сравнение численных результатов моделирования движения идеального сжимаемого газа, полученных с использованием метода Давыдова для трехмерного случая на четырехгранной сетке, с результатами, полученными различными методами в двухмерном пространстве.

Ключевые слова: *метод Давыдова, сжимаемый газ, нерегулярная четырехгранная сетка, численное моделирование.*

Введение

Разработка численных методов газодинамических расчётов в областях сложной формы имеет большое практическое и научное значение. При этом важную роль играет выбор расчётной сетки. Для областей сложной формы нельзя обойтись построением регулярной сетки, приходится строить многоблочные сетки, прибегать к измельчению сетки в районе обтекаемого тела, что значительно усложняет реализацию метода. Использование нерегулярных сеток является одним из способов решения данной проблемы. Использование нерегулярной четырехгранной сетки даёт возможность описать тело произвольной формы.

В данной работе рассматривается моделирование движения идеального сжимаемого газа около абсолютно твердого тела при помощи метода Давыдова [1], обобщенного на случай нерегулярной четырехгранной сетки для трехмерного пространства. Проводится сравнение полученных результатов с методом Давыдова и другими методами для двухмерного случая.

Постановка начальных и граничных условий

Рассмотрим движение идеального сжимаемого газа. В качестве исходных возьмем дифференциальные уравнения Эйлера в дивергентном виде (уравнения неразрывности, импульса, энергии) и уравнение состояния:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \rho}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho u}{\partial x} + \dfrac{\partial \rho v}{\partial y} + \dfrac{\partial \rho w}{\partial z} = 0, \\ \dfrac{\partial \rho u}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho u^2}{\partial x} + \dfrac{\partial \rho uv}{\partial y} + \dfrac{\partial \rho uw}{\partial z} + \dfrac{\partial p}{\partial x} = 0, \\ \dfrac{\partial \rho v}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho uv}{\partial x} + \dfrac{\partial \rho v^2}{\partial y} + \dfrac{\partial \rho vw}{\partial z} + \dfrac{\partial p}{\partial y} = 0, \\ \dfrac{\partial \rho w}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho uw}{\partial x} + \dfrac{\partial \rho vw}{\partial y} + \dfrac{\partial \rho w^2}{\partial z} + \dfrac{\partial p}{\partial z} = 0, \\ \dfrac{\partial \rho E}{\partial t} + \dfrac{\partial \rho uE}{\partial x} + \dfrac{\partial \rho vE}{\partial y} + \dfrac{\partial \rho wE}{\partial z} + \dfrac{\partial pu}{\partial x} + \dfrac{\partial pv}{\partial y} + \dfrac{\partial pw}{\partial z} = 0, \\ p = (\kappa - 1)\rho\left(E - \dfrac{u^2 + v^2 + w^2}{2} \right). \end{cases}$$

Здесь t, x, y, z – независимые переменные, ρ – плотность, u, v, w – компоненты вектора скорости вдоль осей x, y и z соответственно, E – полная энергия единицы массы газа, κ – отношение удельных теплоемкостей. Вид данной системы одинаков как для размерных, так и для безразмерных величин.

Рассмотрим расчетную область, покрытую нерегулярной четырехгранной сеткой (Рис. 1). Сверху, снизу, с фронта и с тыла области находится твердая непроницаемая стенка с выпуклым телом. Поток газа набегает слева и уходит через правую границу области.

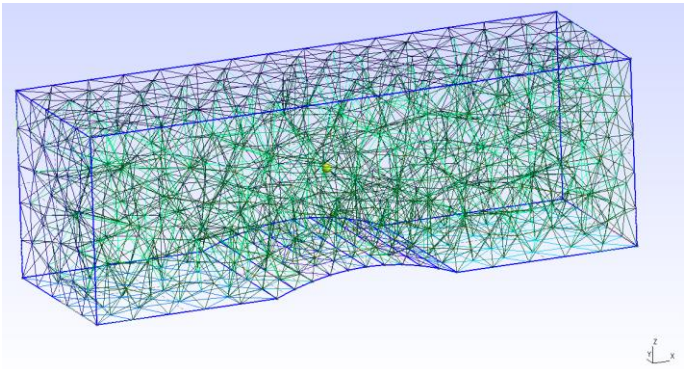


Рис. 1 – Расчетная область, покрытая четырехгранной сеткой

В случае однородного потока газа в начальный момент времени во все ячейки расчетной области помещаются некоторые начальные значения для газодинамических параметров потока:

$$\rho_i = \rho_0, u_i = u_0, v_i = v_0, w_i = w_0, E_i = \frac{1}{\kappa(\kappa-1)M_\infty^2} + \frac{1}{2}.$$

Здесь M_∞ – значение числа Маха на бесконечности. Граничные условия задаются аналогично двухмерному случаю [2].

Результаты

В данной работе при помощи метода Давыдова было промоделировано движение однородного потока сжимаемого газа около абсолютно твёрдого тела. В качестве начальных условий были взяты следующие значения газодинамических параметров:

$$\rho_0 = 1, u_0 = 1, v_0 = 0, w_0 = 0, E_i = \frac{1}{\kappa(\kappa-1)M_\infty^2} + \frac{1}{2}, \kappa = 1.4, M_\infty = 1.6.$$

Была построена картина изолиний, показывающих распределение числа Маха (Рис. 2) в потоке. Результаты расчетов отображаются с помощью изолиний в сечении трехмерной области плоскостью, параллельной плоскости xOz и разбивающей расчетную область на две равные части, для сравнения с двухмерным случаем.

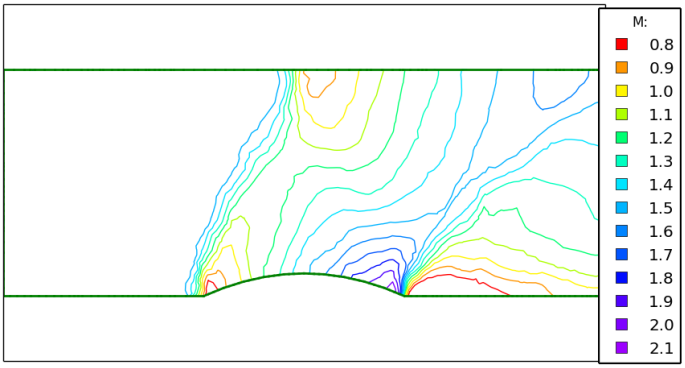


Рис. 2 – Распределение числа Маха по расчетной области для трехмерного случая (M_∞=1.6)

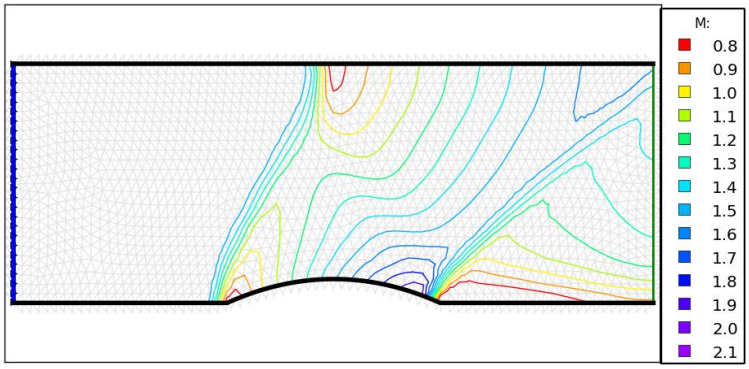


Рис. 3 – Распределение числа Маха по расчетной области для двухмерного случая (M_∞=1.6)

Расчеты проводились для области разбитой на 150000 тетраэдров, в сечении получилось 4000 треугольников. На Рис. 3 представлены результаты автора для двухмерного случая, полученные в [2]. Полученный в данном исследовании результат качественно совпадает с результатами в [2].

На Рис. 4 показана зависимость числа Маха на верхней и нижней стенках расчётной области от координаты x, представлены результаты, полученные в [2,3,4], и результаты, полученные автором для трехмерного случая. Видно, что результаты расчётов достаточно близки. Наблюдаемое расхождение в точке $x = 2.0$ можно объяснить различием геометрии расчётной сетки вблизи границы.

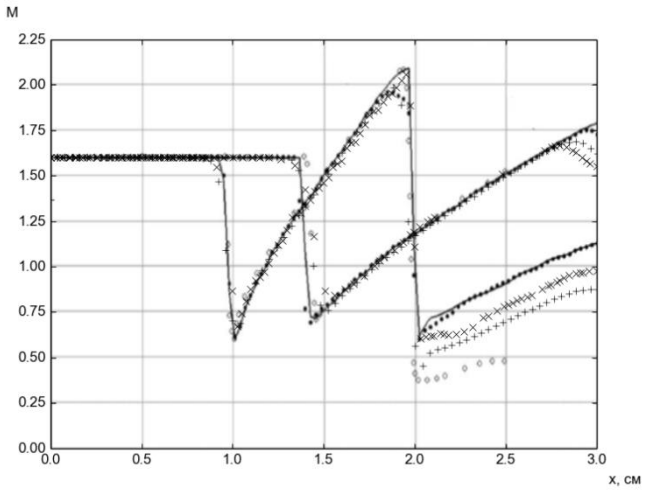


Рис. 4 – Число Маха на стенках: − — статья [3], • — статья [3] FLUENT,◦ — статья [4] , + — статья [2], × — результаты автора (M_∞=1.6)

Выводы

В данной работе проведено сравнение результатов решения тестовой задачи с помощью метода Давыдова для трехмерного пространства с результатами на основе метода Давыдова для двухмерного пространства, схем Годунова и AUSM [3,4]. Благодаря использованию нерегулярной четырехгранной сетки метод Давыдова позволяет описывать обтекание тел произвольной формы потоком газа, однако, одним из недостатков четырехгранной сетки является усложнение расчётных формул из-за необходимости раскладывать вектор скорости на нормальную и тангенциальные составляющие.

Список литературы

1. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.«Наука» 1982 г.

2. *Ливеровский Р.И., Шевырев С.П.* Численное моделирование плоских задач сверхзвуковой газовой динамики на треугольной сетке // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. № 4, 2014. С. 23–32.

3. *Котов Д.В., Суржиков С.Т.* Расчёт течений вязкого и невязкого газа на неструктурированных сетках с испльзованием схемы AUSM // Вычислительная механика сплошных сред. — 2011. — Т. 4, No 1. — С. 36–54.

4. *Issa R.I., Javareshkian M.H.* Pressure-Based Compressible Calculation Method Utilizing Total Variation Diminishing Schemes // AIAA J. — 1998. Vol. 36, No 9. — Pp. 1652–1657.

05.13.18

Р.И. Ливеровский, С.П. Шевырев к.ф.-м.н.

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
кафедра математического и компьютерного моделирования,
Саратов, r.liverovskiy@gmail.com, shevsp@rambler.ru

РАЗНОСТНАЯ СХЕМА МЕТОДА ДАВЫДОВА ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА НА НЕРЕГУЛЯРНОЙ ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ

В работе описывается разработанный численный подход к решению трехмерных уравнений течения невязкого совершенного газа с использованием нерегулярной четырехгранной сетки. Приведены расчетные формулы, описано задание начальных и граничных условий.

Ключевые слова: *метод Давыдова, сжимаемый газ, нерегулярная четырехгранная сетка.*

Введение

Использование нерегулярной четырехгранной сетки даёт возможность описать область произвольной формы, что значительно сложнее сделать, используя регулярную сетку, так как приходится прибегать к измельчению сетки в районе обтекаемого тела, что значительно усложняет реализацию метода. В данной работе представлены расчетные формулы метода Давыдова [1] для случая движения идеального сжимаемого газа, обобщенные на случай нерегулярной четырехгранной сетки для трехмерного пространства.

Классический метод Давыдова

Основная идея метода Давыдова (метода крупных частиц) состоит в расщеплении по физическим процессам исходной нестационарной системы уравнений Эйлера, записанной в форме законов сохранения. Весь процесс вычислений состоит из многократного повторения шагов по времени, стационарное решение задачи, если оно существует, получается в результате установления. Рассмотрим движение идеального сжимаемого газа в трехмерном пространстве. В качестве исходных возьмем дифференциальные уравнения Эйлера в дивергентном виде (уравнения неразрывности, импульса, энергии) и уравнение состояния:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial \rho u}{\partial x}+\frac{\partial \rho v}{\partial y}+\frac{\partial \rho w}{\partial z}=0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t}+\frac{\partial \rho u^2}{\partial x}+\frac{\partial \rho uv}{\partial y}+\frac{\partial \rho uw}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial x}=0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t}+\frac{\partial \rho uv}{\partial x}+\frac{\partial \rho v^2}{\partial y}+\frac{\partial \rho vw}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial y}=0, \\ \frac{\partial \rho w}{\partial t}+\frac{\partial \rho uw}{\partial x}+\frac{\partial \rho vw}{\partial y}+\frac{\partial \rho w^2}{\partial z}+\frac{\partial p}{\partial z}=0, \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t}+\frac{\partial \rho uE}{\partial x}+\frac{\partial \rho vE}{\partial y}+\frac{\partial \rho wE}{\partial z}+\frac{\partial pu}{\partial x}+\frac{\partial pv}{\partial y}+\frac{\partial pw}{\partial z}=0, \\ p=(\kappa-1)\rho\left(E-\frac{u^2+v^2+w^2}{2}\right). \end{cases}$$

Здесь t, x, y, z – независимые переменные, ρ – плотность, u, v, w – компоненты вектора скорости вдоль осей x, y и z соответственно, E – полная энергия единицы массы газа, κ – отношение удельных теплоемкостей. Вид данной системы одинаков как для размерных, так и для безразмерных величин [1].

Расчет каждого временного шага (вычислительного цикла) разбивается на три этапа:

1. Эйлеров этап, на котором пренебрегается всеми эффектами, связанными с перемещением элементарной ячейки (потока массы через границы ячеек нет), здесь определяются промежуточные значения искомых газодинамических параметров потока.

2. Лагранжев этап, на котором вычисляются потоки массы через границы эйлеровых ячеек.

3. Заключительный этап, на котором определяются в новый момент времени окончательные значения газодинамических параметров потока на основе законов сохранения массы, импульса и энергии.

Расчетные формулы модифицированного метода Давыдова

Расчетная область разбивается на множество четырехгранных ячеек. Достоинство четырехгранной сетки – в ее быстрой адаптации к произвольным границам. Все вычисляемые газодинамические параметры (плотность, скорость, полная энергия, давление) относятся к геометрическим центрам четырехгранников. Расчет одного временного шага разбивается на три этапа.

На первом, эйлеровом этапе, пренебрегают дивергентными членами. Укороченные дифференциальные уравнения эйлерова этапа

$$\begin{cases} \rho\dfrac{\partial u}{\partial t}+\dfrac{\partial p}{\partial x}=0, \\ \rho\dfrac{\partial v}{\partial t}+\dfrac{\partial p}{\partial y}=0, \\ \rho\dfrac{\partial w}{\partial t}+\dfrac{\partial p}{\partial z}=0, \\ \rho\dfrac{\partial E}{\partial t}+\dfrac{\partial pu}{\partial x}+\dfrac{\partial pv}{\partial y}+\dfrac{\partial pw}{\partial z}=0, \end{cases}$$

дискретизируются на четырехгранной сетке.

Для четырехгранной ячейки дифференциальные члены с давлением аппроксимируются с применением формулы Гаусса-Остроградского и теоремы о среднем [2]. Формула Гаусса-Остроградского, например, вдоль оси x имеет вид:

$$\iiint\limits_V \frac{\partial p}{\partial x}dV=\iint\limits_S pn_x dS.$$

Левую часть можно приближенно заменить на $\frac{\partial p}{\partial x}V_{pyr}$ (где V_{pyr} – объем четырехгранной ячейки сетки), так как применяется теорема о среднем, то точность данной замены порядка максимума из длины ребер четырехранной ячейки. Интеграл в правой части для четырехгранника распадается на четыре интеграла, в соответствии с количеством граней:

$$\iint\limits_S pn_x dS=\iint\limits_{S_1} pn_x dS+\iint\limits_{S_2} pn_x dS+\iint\limits_{S_3} pn_x dS+\iint\limits_{S_4} pn_x dS.$$

Таким образом, для $\frac{\partial p}{\partial x}$, $\frac{\partial p}{\partial y}$ и $\frac{\partial p}{\partial z}$ имеем сответственно:

$$\iint\limits_S pn_x dS\approx\sum_{i=1}^{4}p_i(n_x)_i S_i,\ \iint\limits_S pn_y dS\approx\sum_{i=1}^{4}p_i(n_y)_i S_i,\ \iint\limits_S pn_z dS\approx\sum_{i=1}^{4}p_i(n_z)_i S_i, \qquad (1)$$

аналогично, для $\frac{\partial pu}{\partial x}+\frac{\partial pv}{\partial y}+\frac{\partial pw}{\partial z}$ имеем:

$$\frac{\partial pu}{\partial x}+\frac{\partial pv}{\partial y}+\frac{\partial pw}{\partial z}\approx\frac{1}{V_{pyr}}\sum_{i=1}^{4}\left\{(pu)_i(n_x)_i+(pv)_i(n_y)_i+(pw)_i(n_z)_i\right\}S_i. \qquad (2)$$

Здесь S_i – площадь i-ой грани четырехгранника; n_x, n_y, n_z – проекции внешней нормали к каждой из граней на оси x, y, z соответственно; p_i, u_i, v_i, w_i – давление и компоненты вектора скорости в соседнем через i-ую грань четырехграннике. Внешние границы и границы на теле заменяется виртуальными ячейками, чтобы сохранить единую схему расчета. Все параметры в виртуальных ячейках, кроме скорости, заменяются аналогичными параметрами из соседних реальных ячеек. Далее вычисляются промежуточные значения для скорости и полной энергии:

$$\begin{cases} \tilde{u}_i^n = u_i^n - \dfrac{\Delta t}{\rho_i^n}(\partial p/\partial x)_i^n, \\ \tilde{v}_i^n = v_i^n - \dfrac{\Delta t}{\rho_i^n}(\partial p/\partial y)_i^n, \\ \tilde{w}_i^n = w_i^n - \dfrac{\Delta t}{\rho_i^n}(\partial p/\partial z)_i^n, \\ \tilde{E}_i^n = E_i^n - \dfrac{\Delta t}{\rho_i^n}\left\{(\partial(pu)/\partial x)_i^n + (\partial(pv)/\partial y)_i^n + (\partial(pw)/\partial z)_i^n\right\}, \end{cases}$$

где $(\partial p/\partial x)_i^n$, $(\partial p/\partial y)_i^n$, $(\partial p/\partial z)_i^n$, и $\left\{(\partial(pu)/\partial x)_i^n + (\partial(pv)/\partial y)_i^n + (\partial(pw)/\partial z)_i^n\right\}$ вычисляются по формулам (1), (2).

На втором, лагранжевом этапе учитывают то, что было опущено на эйлеровом этапе, то есть члены, описывающие перенос массы, импульса, энергии. Потоки массы через границы ячеек на лагранжевом этапе учитывают геометрию ячеек сетки. Рассмотрим произвольную грань тетраэдра, образованную точками (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3). Запишем формулу для потока массы через выбранную грань:

$$\Delta M^n_{K_{1,2,3}} = \rho_p^n \frac{\tilde{u}^n_{i(norm)} + \tilde{u}^n_{K_{1,2,3}(norm)}}{2} \Delta t S((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)),$$

где ρ_p^n – плотность в текущем тетраэдре, если поток вытекает из него, или плотность в соседнем через указанную грань тетраэдре, если поток втекает; $\tilde{u}^n_{i(norm)}$ – нормальная составляющая вектора скорости для текущего тетраэдра; $\tilde{u}^n_{K_{1,2,3}(norm)}$ – нормальная составляющая вектора скорости для соседнего тетраэдра; $K_{1,2,3}$ – грань K-го тетраэдра между вершинами с координатами (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3); $S((x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3))$ – площадь треугольника, образованного точками с координатами (x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2) и (x_3, y_3, z_3); Δt – шаг по времени.

На заключительном этапе вычисляются:

$$\rho_i^{n+1} = \rho_i^n + \frac{1}{V_i}\sum_{j=1}^{4} \Delta M^n_j,$$

$$u_i^{n+1} = \frac{1}{\rho_i^{n+1}}\left(\tilde{u}_i^n \rho_i^n + \frac{1}{V_i}\sum_{j=1}^{4} \Delta M^n_j \tilde{u}^n_p\right),$$

$$v_i^{n+1} = \frac{1}{\rho_i^{n+1}}\left(\tilde{v}_i^n \rho_i^n + \frac{1}{V_i}\sum_{j=1}^{4} \Delta M^n_j \tilde{v}^n_p\right),$$

$$w_i^{n+1} = \frac{1}{\rho_i^{n+1}}\left(\tilde{w}_i^n \rho_i^n + \frac{1}{V_i}\sum_{j=1}^{4} \Delta M^n_j \tilde{w}^n_p\right),$$

$$E_i^{n+1} = \frac{1}{\rho_i^{n+1}}\left(\tilde{E}_i^n \rho_i^n + \frac{1}{V_i}\sum_{j=1}^{4} \Delta M^n_j \tilde{E}^n_p\right).$$

где V_i – объем i-го тетраэдра, индекс p у переменных $\tilde{u}_p^n$, $\tilde{v}_p^n$, $\tilde{w}_p^n$, $\tilde{E}_p^n$ равен номеру текущего тетраэдра, если поток вытекает из него, иначе – номеру соседнего через указанную грань тетраэдра, если поток втекает.

Критерием устойчивости разностной схемы является условие, что каждая частица газа не должна перемещаться за один временной шаг на расстояние, большее, чем размер ячейки (критерий Куранта-Фридрихса-Леви).

Постановка начальных и граничных условий

В случае однородного потока газа в начальный момент времени во все ячейки расчетной области помещаются некоторые начальные значения для газодинамических параметров потока:

$$\rho_i = \rho_0, u_i = u_0, v_i = v_0, w_i = w_0, E_i = \frac{1}{\kappa(\kappa-1)M_\infty^2} + \frac{1}{2}.$$

Здесь M_∞ – значение числа Маха на бесконечности.

На стороне области, на которой происходит «подпитка» набегающего на тело потока, значения компонент вектора скорости берутся:

$$u^n = u_0, v^n = v_0, w^n = w_0.$$

На сторонах области, где отстутствуют твердые непроницаемые стенки ставятся неотражающие граничные условия на искусственных, не существующих в реальности границах:

$$u^n_{fictive} = u_{border}, v^n_{fictive} = v_{border}, w^n_{fictive} = w_{border}.$$

На теле, а также на границах области, которые являются непроницаемыми стенками, выполняются условия непротекания: нормальная к телу или непроницаемой стенке компонента вектора скорости равна нулю, для этого в фиктивные ячейки помещаются такие значения u, v, w, чтобы $u^n_{fictive(norm)} = -u^n_{border(norm)}$.

Решение тестовой задачи

Рассмотрим расчетную область, покрытую нерегулярной четырехгранной сеткой (Рис. 1). Сверху, снизу, с фронта и с тыла области находится твердая непроницаемая стенка. Поток газа набегает слева и уходит через правую границу области.

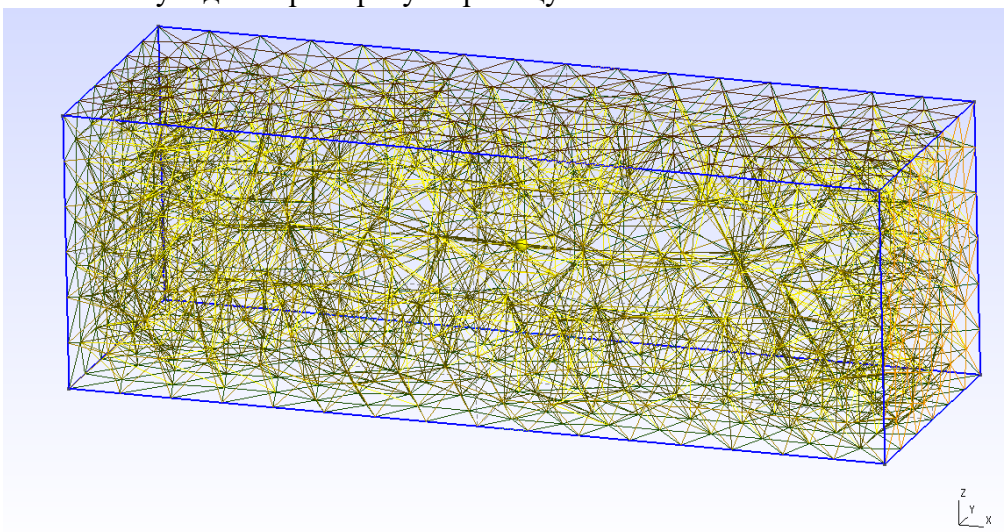


Рис. 1 – Расчетная область, покрытая четырехгранной сеткой

В данной работе при помощи метода Давыдова было промоделировано движение однородного потока сжимаемого газа по области, представленной на Рис. 1. Область покрыта четырехгранной сеткой из 27947 четырехгранников. В качестве начальных условий были взяты следующие значения газодинамических параметров:

$$\rho_0 = 1, u_0 = 1, v_0 = 0, w_0 = 0, E_i = \frac{1}{\kappa(\kappa-1)M_\infty^2} + \frac{1}{2}, \kappa = 1.4, M_\infty = 1.6.$$

На Рис. 2 показана зависимость числа Маха на верхней и нижней стенках расчётной области от координаты x. Видно, что значение числа Маха на стенках совпадает со значением $M_\infty = 1.6$.

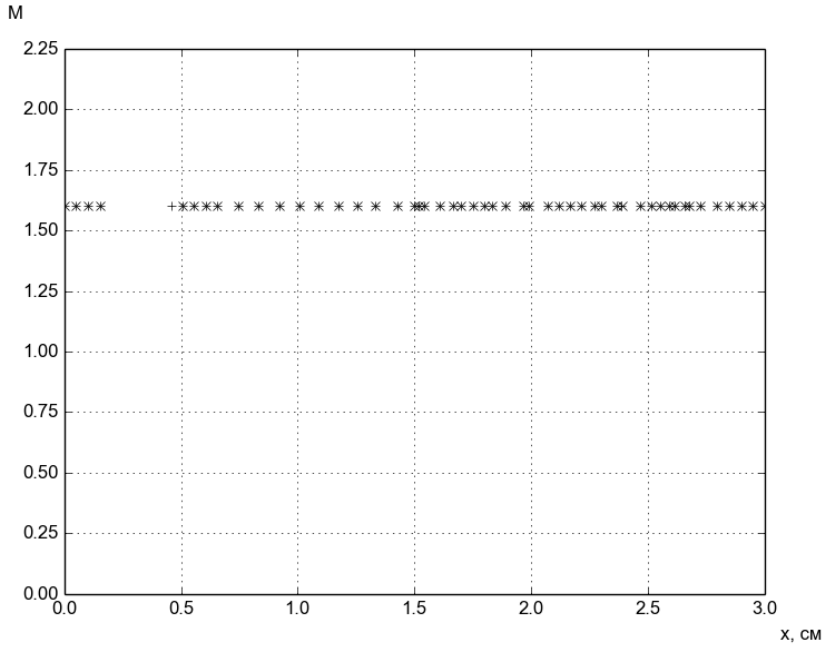


Рис. 2 – Число Маха на стенках: + — на верхней стенке, × — на нижней стенке (M_∞=1.6)

Выводы

В данной работе представлена модификация метода крупных частиц для случая сжимаемого газа на нерегулярной четырехгранной сетке. Использование метода Давыдова на нерегулярной сетке позволяет описывать обтекание тел произвольной формы потоком газа, что невозможно сделать, используя регулярную сетку, так как нельзя достаточно точно описать границу тела.

Список литературы

1. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.«Наука» 1982 г.

2. *Шевырев С.П.* Разностные схемы метода Давыдова на произвольной сетке // Математика. Механика: сб. науч. тр., Саратов: Изд-во Сарат. Ун-та. 2005. Вып. 7. С. 205–209.

05.11.13

С.А. Лисаков, А.Н. Павлов к.т.н., Е.В. Сыпин к.т.н., Г.В. Леонов д.т.н.

Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ,
кафедра методов и средств измерений и автоматизации,
Бийск, foxlsa@mail.ru, pan@bti.secna.ru, sev@bti.secna.ru, leonov@bti.secna.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ–ВОЗДУХ»

В статье описывается постановка задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух». Рассмотрены параметры и характеристики газодисперсной системы «угольная пыль–воздух», влияющие на ослабление оптического излучения. Проанализированы подходы к моделированию ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» и обосновано использование теории Ми. Сформулированы исходные данные для проведения моделирования. Выполнена постановка задачи расчета. Дальнейшая работа направлена на моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» в соответствии с постановкой задачи расчета.

Ключевые слова: *оптическое излучение, оптико-электронный датчик, возгорание, газодисперсная система, ослабление.*

Введение

В промышленности существует множество взрывоопасных технологических процессов, связанных с газодисперсными системами: пылеосаждение, пневмотранспортировка, размельчение материалов и др. С такими процессами связаны в первую очередь угледобывающие шахты в связи с наличием горючей пыли и метана в газовой фазе [1].

Одним из направлений, развитие, которого может дать существенное повышение уровня пожарной безопасности угольных шахт, является использование автоматических систем противопожарной защиты и взрывоподавления [1].

Наиболее перспективными с точки зрения обеспечения быстродействия являются оптико-электронные датчики (ОЭД), входящие в состав автоматических систем предотвращения взрывов. Оптико-электронные датчики реагируют на световое излучение пламени [1].

Газодисперсные системы имеют большую поглощающую способность, что усложняет применение существующих оптико-электронных датчиков. На качество работы ОЭД оказывают влияние расстояние от датчика до точки возгорания и оптические свойства среды. Поэтому учет влияния запыленной среды угольных шахт на работу оптико-электронных датчиков является актуальной задачей [2, 3].

В случае использования ОЭД в угольных шахтах промежуточной средой выступает рудничный воздух. Рудничный воздух – это смесь газов, паров и пыли, движущаяся по выработкам и постоянно претерпевающая изменения по сравнению с атмосферным воздухом [4].

Свет, проходя через пылегазовую систему, ослабляется в результате рассеяния и поглощения. Наиболее существенное влияние на ослабление излучения оказывают частицы угольной пыли. Для газовой составляющей ослабление излучения значительно меньше [5].

Интенсивность ослабления света зависит от размеров частиц пыли, их концентрации, комплексного коэффициента преломления и угла рассеяния [6].

В связи с вышеизложенным была сформулирована цель: выполнить постановку задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– рассмотреть параметры и характеристики газодисперсной системы «угольная пыль–воздух», влияющие на ослабление оптического излучения;

– проанализировать подходы к моделированию ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух»;

– сформулировать исходные данные для проведения моделирования;

– выполнить постановку задачи расчета.

Параметры и характеристики газодисперсной системы «угольная пыль–воздух»

К параметрам и характеристикам частиц пыли в рудничной атмосфере, влияющим на ослабление оптического излучения относятся: форма и дисперсный состав частиц угольной пыли, дисперсия комплексного показателя преломления, концентрация частиц пыли.

При этом для определения влияния частиц пыли на ослабление излучения необходимо учитывать рабочий диапазон длин волн, определяемый излучением продуктов горения и особенностями применяемых оптико-электронных датчиков.

Данные о параметрах и характеристиках частиц, а также о диапазоне длин волн оптического излучения позволят определить оптимальный подход к моделированию ослабления.

Форма частиц угольной пыли

Рудничная пыль состоит из частиц различной неправильной формы. Форму частиц характеризуют через соотношение их размеров: длины l, ширины s и толщины h.

Форма частиц может быть: кубообразная – $l=(1-1.3)s$; $h=(1-0.7)s$; столбчатая – $l>1.3s$; $h=(1-0.7)s$; плитчатая – $l=(1-1.3)s$; $h=(0.7-0.3)s$; удлиненно-плитчатая – $l>1.3s$; $h=(0.7-0.3)s$; пластинчатая – $l=(1-1.3)s$; $h>0.3s$; удлиненно-пластинчатая – $l>1.3s$; $h>0.3s$ [6].

Преобладание одной из форм частиц зависит от физико-механических свойств угля. Поскольку практически трудно установить форму мелких частиц, для ее характеристики пользуются понятиями эквивалентного диаметра (диаметра шара с объемом, равным объему частицы) $d_Э$; проекционного (диаметра круга с площадью, равной площади проекции частицы) $d_П$; седиментационного (диаметра шара, имеющего одинаковую с частицей скорость падения) d_C.

Дисперсный состав угольной пыли

Для расчета ослабления оптического излучения угольной пылью важное значение имеет ее дисперсный состав. Под дисперсным составом пыли понимают количественное соотношение частиц различных размеров. Поскольку угольная пыль в рудничной атмосфере является полидисперсной, то для расчета ослабления необходимо знать распределение частиц по размерам в пылевом потоке [7].

В практике дисперсный состав пыли характеризуют функцией распределения $P(\delta)$ массы материала по диаметрам частиц или соответствующей плотностью распределения $f(\delta)$. Функция распределения устанавливается экспериментально на основе известных методов дисперсионного анализа и выражается табличными данными или кривыми распределения [8].

В работе [8] обосновано, что распределение рудничной пыли в выработках наилучшим образом описывается двухпараметрическим распределением Розина-Раммлера при среднем значении показателя степени $a=2$ и коэффициенте $b=0.005$ (формула (1)). Распределение позволяет учесть влияние на дисперсный состав аэродинамических процессов, связанных с витанием пыли в воздухе.

$$P(\delta)=1-\exp(-b\delta^a),$$
$$f(\delta)=ba\delta^{a-1}\exp(-b\delta^a), \quad (1)$$

где δ – эквивалентный диаметр частиц пыли ($\delta=d_Э$), мкм; a и b – коэффициенты, определенные по опытным данным.

Комплексный показатель преломления частиц угольной пыли

Комплексный показатель преломления относится к оптическим свойствам, характеризующим угольную пыль.

Комплексный показатель преломления $m = n - i\chi$ состоит из вещественной и мнимой частей. Вещественная часть $\mathrm{Re}(m) = n$ представляет собой показатель преломления, определяемый как отношение скорости распространения света в вакууме к скорости его распространения в данной среде. Мнимая часть $\mathrm{Im}(m) = i\chi$ характеризует затухание амплитуды электромагнитных колебаний в веществе, обусловленное поглощением.

На рис. 1 приведены данные о показателях преломления $n(\lambda)$ и поглощения $\chi(\lambda)$ (λ – длина волны) для частиц кокса и угольной пыли различных топлив в видимой и инфракрасной областях спектра от 0.5 до 5 мкм. Заметное влияние на величины $n(\lambda)$ и $\chi(\lambda)$ оказывает содержание углерода в топливе C^{Γ} и содержание летучих υ^{Γ}. Более высоким значениям C^{Γ} соответствуют более высокие значения $n(\lambda)$ и $\chi(\lambda)$ [11].

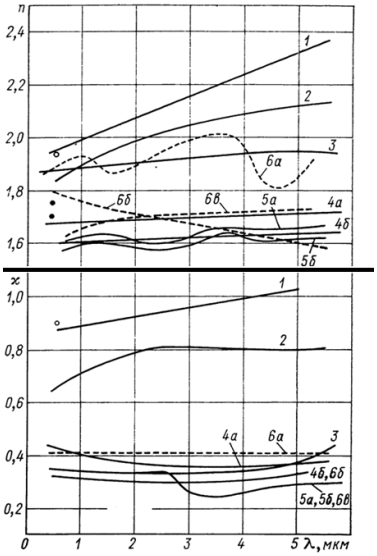


Рис. 1 – Дисперсия показателей преломления $n(\lambda)$ и поглощения $\chi(\lambda)$ кокса и угольной пыли 1 – кокс ($C^{\Gamma} = 99.5\%$); 2 – антрацит ($C^{\Gamma} = 93\%$; $\upsilon^{\Gamma} = 2.5\%$); 3 – тощий уголь ($C^{\Gamma} = 89\%$; $\upsilon^{\Gamma} = 10\%$); 4 – каменный уголь ($C^{\Gamma} = 78...85\%$; $\upsilon^{\Gamma} = 23...30\%$) 4а – марка ПС; 4б – марка Г; 5 – бурый уголь ($C^{\Gamma} = 66...73\%$; $\upsilon^{\Gamma} = 47...52\%$); 5а – назаровский; 5б – ирша-бородинский; 6 – данные по [11]: 6а – тощий уголь; 6б – каменный уголь; 6в – бурый уголь.

Дисперсия оптических констант антрацита, тощего и каменного углей удовлетворительно описывается зависимостями вида:

$$\begin{aligned} n(\lambda) &= A + B\lambda^{0.5} \\ \chi(\lambda) &= C + D\lambda^{0.5} - E(\lambda - 1)^2 \end{aligned} \quad . \qquad (2)$$

Численные значения коэффициентов A, B, C, D и E приведены в таблице 1 [11].

Таблица 1 – Численные значения коэффициентов A, B, C, D и E

	A	B	C	D	E
Антрацит	1.72	0.190	0.59	0.130	0.005
Тощий уголь	0.84	0.045	0.44	–0,047	–0.002
Каменный уголь марки Г	1.60	0.08	0.33	–0.025	–0.003
Каменный уголь марки ПС	1.68	0.08	0.36	–0.025	–0.003

Концентрация частиц угольной пыли в газодисперсной системе

Содержание пыли по массе или числу частиц в единице объема воздуха называют концентрацией и выражают в граммах или миллиграммах на 1 м^3 аэрозоля [12].

Концентрация частиц угольной пыли в рудничной атмосфере определяется рядом факторов, включающих аэрогазодинамические характеристики проводимой выработки, условия проветривания, пылеобразующую способность угольного пласта, особенности технологии проведения выработки и т.д. [13].

Данные об уровне запыленности шахтного воздуха в горных выработках при различных производственных процессах приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Уровень запыленности шахтного воздуха в горных выработках при различных производственных процессах

Производственные процессы	Запыленность шахтного воздуха г/м^3
Взрывные работы в тупиковом забое	0.5–20
Работа угольного комбайна, врубовой машины, качающегося конвейера, перегрузка угля с конвейера в вагонетки	0.5–30
Работа отбойными молотками по углю	0.5–15
Сухое бурение шпуров по породе	0.1–10
Погрузка машинами сухой горной породы	0.1–5
Погрузка сухой породы в вагонетку вручную	0.06–0.34
Перегрузка угля с конвейеров на конвейер при высоте падения угля 0.4 м	0.11–0.17

Рабочий диапазон длин волн излучения

Рабочий диапазон длин волн излучения соответствует излучению продуктов горения метана, регистрируемому оптико-электронными датчиками.

Спектральный состав излучения и его интегральная по спектру интенсивность зависят от мощности очага горения, горючего материала и типа горения (тлеющее или пламенное) [13]. Основной вклад в излучение продуктов горения углеводородов вносят молекулы углекислого газа и воды. Излучение продуктов горения носит селективный характер и сосредоточено в полосах поглощения паров воды и двуокиси углерода. Максимумы энергии излучения соответствуют следующим длинам волн для углекислого газа – 1.34, 4.26, 7.45 и 15.05 мкм, для паров воды – 1.29, 1.87, 2.66, 2.74 и 6.27 мкм [14].

Исходя из спектрального распределения излучения продуктов горения углеводородов, а также с учетом возможности технической реализации ОЭД, диапазон исследуемых длин волн составляет от 0.7 до 5 мкм.

Подходы к моделированию ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух»

Расчет спектрального коэффициента ослабления излучения частицами пыли выполняется следующими способами:

– аналитическое решение поставленной задачи;

– на основании полученных экспериментальных данных и эмпирических формул.

Аналитическое решение задачи может быть выполнено на основе теории Ми [15].

Необходимыми условиями применения теории Ми являются следующие ограничения [15]:

– рассеянный свет всегда имеет ту же длину волны, что и рассеиваемый свет (процессы, включающие какие-либо квантовые переходы, исключаются);

– рассматриваются независимые частицы;

– влияние многократного рассеяния не учитывается (теория Ми применима для малой оптической толщины запыленной среды).

Теория Ми применяется как для очень малых, так и для очень больших частиц по сравнению с длиной волны падающего излучения [15]. Из приведенных выше данных видно, что размеры частиц в рудничной атмосфере значительно превосходят основные длины волн теплового излучения продуктов горения (основная доля частиц с размерами от 10 до 30 мкм; диапазон длин волн от 0.7 до 5 мкм).

Исходя из дисперсного состава и концентрации угольной пыли следует, что расстояние между частицами значительно превышает размер частиц, а также длину волны излучения, т.е. происходит рассеяние независимыми частицами.

Например, даже при концентрации пыли в запыленном потоке равной 200 г/м^3 и размере частиц $\delta = 10$ мкм среднее расстояние между частицами составляет 170 мкм. При этом выполняется условие, в соответствии с которым расстояние между частицами должно превышать диаметр частиц в 1.5 раза [16].

Таким образом, расстояние значительно превышает как размер частиц, так и основные длины волн излучения. Для рассматриваемого круга задач частицы можно считать не взаимодействующими.

Теория Ми применима к расчету ослабления единичной частицей и может быть непосредственно использована лишь применительно к запыленным средам, содержащим небольшое количество частиц в единице объема, или к малым толщинам слоя.

Поскольку в рассматриваемой задаче рассеяние происходит на больших частицах, и толщина слоя может быть значительной это необходимо учитывать при последующем анализе результатов моделирования.

При этом энергия, рассеянная большими частицами, сконцентрирована в узком направленном вперед пучке и не вычитается из основного потока, а ослабление при достаточно больших концентрациях или толщинах слоя происходит главным образом за счет многократного поглощения на частицах, расположенных на пути пучка [16].

С учетом рассмотрения всех ограничений можно сделать вывод о том, что для расчета коэффициента ослабления в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» может использоваться теория Ми.

Исходные данные для проведения моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль – воздух»

При формулировке задачи Ми используются следующие основные параметры:

– параметр дифракции ρ, который характеризует соотношение между диаметром частицы d и длиной волны падающего излучения λ: $\rho = \pi d / \lambda$.

– комплексный показатель преломления m.

– угол рассеяния θ: определяется направлением падающих волн, точкой рассеяния и направлением наблюдения.

Дополнительно нужна информация о концентрации угольной пыли в дисперсной системе и о законе распределения частиц пыли по массе.

Исходные данные для проведения моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Исходные данные для проведения моделирования

Параметр	Значение
Диапазон длин волн излучения λ, мкм	0.7–5
Диаметр частиц пыли *d*, мкм	1–40
Распределение $P(\delta)$ массы пыли по диаметрам частиц	Распределение Розина-Раммлера (1) с коэффициентами *a*=2 и b=0.005
Комплексный показатель преломления частиц пыли каменного угля	Формула (2), таблица 1
Концентрация частиц угольной пыли, г/м^3	0.06–30

Постановка задачи расчета

Моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» заключается в решении следующих задач:

–в вычислении факторов ослабления, рассеяния и поглощения для дисперсной системы с определенным распределением массы пыли по диаметрам частиц;

–в получении зависимостей факторов ослабления, рассеяния и поглощения оптического излучения дисперсной системой от длины волны падающего излучения;

–в расчете коэффициентов пропускания дисперсной системы от концентрации угольной пыли;

–в получении индикатрис рассеяния оптического излучения для отдельных частиц пыли различных размеров, а также для полидисперсной системы частиц в целом.

Расчет ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» может быть выполнен с помощью специализированного программного обеспечения

MiePlot v4.4 [17]. В MiePlot реализован классический алгоритм BHMIE используемый для расчета характеристик рассеяния на однородном шаре, опубликованный в [18].

Выводы и заключение

В результате выполнения работ была выполнена постановка задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух».

Дальнейшая работа направлена на моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» в соответствии с постановкой задачи расчета.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-06719 а.

Список литературы

1. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage / Pavlov A.N., Terentiev S.A., Povernov E.S., Sypin E.V. – International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2010. – P. 417-419.

2. The study of influence of gas-dispersed medium like coal dust-air on the optical radiation attenuation / Mikhanoshina J.L., Pavlov A.N., Sypin E.V. – International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2012: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 226-229.

3. Experimental research backscattering in the disperse system / Yakusheva O.Y., Pavlov A.N., Sypin E.V. – 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 246-248.

4. *Ушаков К.З.* Аэрология горных предприятий: учебник для студентов горных специальностей вузов / К.З. Ушаков, А.С. Бурчаков, Л.А. Пучков, И.И. Медведев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 412 с.

5. *Поскачей А.А*. Оптико-электронные системы измерения температуры / А.А. Поскачей, Е.П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248 с.

6. *Петунин П.М*. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах / П.М. Петунин, Г.С. Гродель, Н.И. Жиляев и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1981. – 271 с.

7. Борьба со взрывами угольной пыли в шахтах / М.И. Нецепляев [и др.].–М.:Недра,1992.–298с.

8. *Новикова Е.А.* Повышение безопасности конвейерного транспорта в горных выработках угольных шахт: моногр. / Е.А. Новикова. – Д.: Национальный горный университет, 2013.–99с.

9. *Кудряшов В.В.* Смачивание пыли и контроль запыленности в шахтах / В.В. Кудряшов, Л.Л. Воронина, М.К. Шуринова и др. – М.: Наука, 1979. – 200 с.

10. *Кудряшов В.В.* Свойства рудничной пыли и радиоизотопный метод определения запыленности воздуха/ В.В. Кудряшов, В.Ф. Химченко // Колыма, 1969. – № 6. – С. 31-33.

11. *Блох А.Г.* Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатом-издат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 240 с.

12. *Васючков Ю.Ф.* Горное дело: Учеб. для техникумов/Ю.Ф. Васючков.–М.:Недра,1990.–512с.

13. Предупреждение взрывов пылеметано-воздушных смесей / В.И. Мамаев [и др.]. – М.: Недра, 1990. – 159 с.

14. *Иваницкий А.Г.* Характеристики термического воздействия огненного шара взрыва и факела горения углеводородов // 14 Минский международный форум по тепло- и массообмену. – 2012. Т. 1 Ч. 1, С. 106-109.

15. *Дейрменджан Д.* Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами: пер. с англ. / Д. Дейрменджан. – М.: Мир, 1971. – 164 с.

16. *Блох А.Г.* Тепловое излучение в котельных установках / А.Г. Блох.–Л.:Энергия,1967.– 328с.

17. *Laven, P.* MiePlot. A computer program for scattering of light from a sphere using Mie theory & the Debye series [электронный ресурс] / P. Laven. – 2013. – Режим доступа: http://www.philiplaven.com/.

Борен Г.Ф. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: пер. с англ. / Г.Ф. Борен, Д.Р. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.

05.26.02

Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова д.т.н.

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
аэрокосмический факультет, кафедра системы жизнеобеспечения,
Москва, ldv.medtech@gmail.com, buksan@list.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНЕ

Телемедицинские методики возникли и совершенствовались на основе медицинского контроля, разрабатываемого и применяемого для пилотируемых космических полетов. На Земле и в Космосе возникают ситуации, когда требуется принимать решение на месте. В этом случае необходима разработка система поддержки принятия решения для той или иной медицинской ситуации. Для космических проблем такие системы разрабатываются, в связи предстоящими пилотируемыми полетами к планетам.

Ключевые слова: *телемедицина, теория поддержки принятия решений, здравоохранение.*

Введение. Несмотря на явную медико-социальную привлекательность, темпы внедрения телемедицинских методов в практику во многом определяются именно экономическими факторами.

Цели, задачи, затраты. Существует множество видов медицинских задач, которые необходимо решать для отдалённых населённых пунктов и в ряде случаев экономическая эффективность применения телемедицины оправдывает себя.

Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) являются основной причиной смерти во всем мире и в Российской Федерации в частности. Наиболее распространенные из них это: хронические ревматические болезни сердца, эссенциальная гипертензия, болезни, ишемическая болезнь сердца, стенокардия, острый инфаркт миокарда, цереброваскулярные болезни, гипертензивная (гипертоническая) болезнь, острый и подострый эндокардит, кардиомиопатия и другие болезни сердца. Не утешительная статистика показывает с каждым годом увеличение заболеваемости сердечно-сосудистыми заболеваниями среди населения России.

Телемедицина и медицинский контроль в космическом полете. Телемедицинские методики возникли и совершенствовались на основе медицинского контроля, разрабатываемого и применяемого для пилотируемых космических полетов в конце 70-х годов прошлого века. Принципы медицинского контроля, разработанные для пилотируемой космонавтики средства съема, обработки и представления медицинской информации, как нельзя лучше подходят для задач телемедицины, предназначенной для населения в труднодоступных районах.

Применительно к задачам медицинского контроля (МК) во время длительных космических полетов (ДКП) определялись основополагающие принципы, перечисленные ниже:

1. Патогенетический принцип
2. Плановые скрининговые обследования
3. Индивидуализация диагностических обследований
4. Коррекция программы обследований в зависимости от состояния членов экипажа
5. Оценка изменений функций организма с учетом адекватности условиям среды
6. Преемственность проведения обследований на всех этапах подготовки к полету, в полете и после его завершения
7. Информационно-анамнестический анализ
8. Конфиденциальность результатов медицинских обследований

Сформированная многоуровневая модель процесса принятия решения с учетом задачи качества представляет собой многоразмерную (десятки переменных и десятки ограничений) модель. Рассмотрим теоретические основы такого процесса.

$$\text{Пусть } C: \sup\{ f_0(x) \mid f_j(x) \le 0, \ (1)$$
$$j = 1,..., m, x \ge 0$$

- задача математического программирования

$$F(x,u) = f_0(x) - \sum_{j=1}^{m} u_j f_j(x)$$

- и её функция Лагранжа.

Задача (1) эквивалентна (по значению)

$$\sup \inf F(x,u) \ (=; v) \qquad (2), \ x \ge 0 \qquad u \ge 0$$
$$\sup \inf F(x,u) \ (=: v^*) \qquad (3), \ x \ge 0 \qquad u \ge 0$$

Задача является двойственной к (1) по определению.

Если (1) разрешима с (3) (т.е. v-конечно и $\exists[\bar{x}, \bar{u}] \ge 0 : F(\bar{x}, \bar{u}) = v$) и v = v^* то задача (1) собственная, в противном случае не собственная.

Если (1) – задача линейного программирования

$$L: \sup\{(c,x) \mid A_x - b \le 0, x \ge 0\} \qquad (4)$$

то (3) может быть преобразована к виду

$$L^*: \inf\{b,u \mid A_u^T - c \le 0, u \ge 0\} \qquad (4)^*$$

Обозначим допустимые множества в задачах (4) и (4)* через M и M* соответственно. Их разрешимость эквивалентна тому, что $M \ne 0 \ M^* \ne 0$

Если $\bar{S} = [\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}]$ - конкретная противоречивая реализация задачи LS т.е. $\bar{S} \notin S$, то оптимальную коррекцию можно понимать как задачу корректирования $\bar{S}$ на S.

Рассмотрим проблему вероятностно-гарантированного подхода к оптимизации выбора средства медицинского контроля. Т.е. перейдем в класс параметрических задач. Связь между известными параметрами (наблюдаемыми параметрами) устанавливается на основе многомерных функций уловной плотности вероятности p(Z/Y) и интерпретируется как неопределенно-случайная, при помощи модели следующего вида

$$P_{ys} = F(S^*, \omega), \ (5), \ P_{ys} = (P(Y_1 / S^*), \ldots, P(Y_m / S^*))^T$$

вектор апостериорных вероятностей исследуемых параметров Yi, i=1,…, m размерности $(m \times 1)$

при условии регистрации вектора качества (и/или технологической возможности), компоненты которого SK, K = 1,…,2r характеризуют факт наличия $(S_k^* = 1)$ или продукта $(S_K^* = 0)$ нужных параметров во временном отрезке функционирования одной из 2r возможных комбинаций $Z_k^*, k = 1,..., r$.

ω - неопределенно случайный вектор имеющий сложную структуру.

$$\omega^T = (\omega^{iT}, \omega^{2T}, ..., \omega^{mT}) \qquad (6)$$

ωiT, i=1,…,m, - блок размерности, $(2^r + 1) \times 1$ с компонентами,

$$\omega^{iT} = (\eta_i, \xi_{i1}, ..., \xi_{ik}), \ \eta_i = P(Y_i), i = 1,...m; \ \xi_{ih} = p(S_k / Y_i), h = 1,..., 2^r$$

Компоненты характеризуют:

$\eta_i = P(Y_i)$ - неопределенность значения вероятности выбора Yi возникающая вследствие ограниченности полетных наблюдений, технологических незавершенностей, методических погрешностей.

$\xi_{ih} = p(S_k / Y_i)$ - неопределенность вероятностей признаков (параметров) Sk для каждого Yi.

Неопределенно-случайный вектор ω задается на доверительном множестве W(βз), вероятности меры βз.

Наибольшей степенью особенности рассматриваемых задач отвечает представление доверительного множества в виде параллелепипедов в Rm(n+1) образованного пересечением доверительных интервалов для вероятностей $P(Y_i)$, $p(S_k / Y_i)$.

Дальнейшая работа заключается в последовательном решении комплексных задач:

- оценка вероятностей допустимых состояний в условии присутствия неопределенно случайных факторов.
- параметризация решающего условия
- вероятностной оптимизации параметров решающего условия.

Для оптимизации параметров решающего условия предложен скалярный функционал $V(\alpha_0, W(\beta_з)\varepsilon)$ характеризующий вероятность ошибочного выбора при фиксированном значении параметров качества (параметров решающего условия). Метод изолированной оптимизации углового положения разделяющей линии.

Задача оптимизации сводится к задаче минимизации скалярной функции

$$\alpha_0^* = \arg\min V(\alpha_0, W^0, \varepsilon_0), \quad \pi/4 \le \alpha_0 \le \pi/2$$

При этом

$$W(\beta_з) = W^0 \text{ и } \varepsilon = \varepsilon_0 \text{ оценка } V(\alpha_0, W^0, \varepsilon_0)$$

может быть получена на основе следующего соотношения

$$V(\alpha_0, W^0, \varepsilon_0) = 1 - (1 - \Phi_1(\alpha_0)) \cdot \Phi_2(\alpha_0) \qquad (7)$$

$\Phi_1(\alpha_0)$ - функция распределения, характеризующая ошибку 1-го рода,

$\Phi_2(\alpha_0)$ - функция распределения, характеризующая ошибку 2-го рода.

Результатом оптимизации является отыскание оптимального доверительного множества W*(βз) в классе параллелепипедов Eβ вероятностной меры βз, который обеспечивает при фиксированных $\varepsilon_0 \alpha_0$ минимум вероятностной ошибки выбора на основе оптимизации функционала $V(\alpha_0, W(\beta_з)\varepsilon_0)$:

$$W^* = \arg\min V(\alpha_0, W(\beta_з), \varepsilon_0); \quad (8), \; W \in E_\beta$$

За счет выбора параметра ε, определяющего различные варианты расслоения пространства реализации исходного вектора параметров Zt, = 1,…,2r

при этом $\varepsilon^* = \arg\min V(\alpha_0, W_0, \varepsilon)$; (9) .

Подобная система была применена Строгоновой Л.Б. 2000г. для решения вопроса о системе поддержки принятия решения по системе исследования жидких сред человека в условиях космического полета. [3]

Заключение. При использовании методов поддержки принятия решений в условиях отдалённых населённых пунктов возможно снижение себестоимости и повышение эффективности оказания медицинской помощи. Данный подход позволяет предупреждать и своевременно оказывать медицинскую помощь людям с сердечно-сосудистыми заболеваниями, лишёнными традиционной медицинской поддержки.

Список литературы

1. Math methodology for the supporting theory of decision taking processes in medicine, D. Litvina, L. Strogonova, IN-TECH-2014, p. 191-192.
2. Math methodology for the supporting theory of decision taking processes in medicine. D. Litvina, L. Strogonova, IN-TECH-2013, p. 21-24.
3. Математические методы и аппаратура для психофизиологического контроля и поддержки групп работающих на особо опасных производствах. Строгонова Л.Б., ISTIC Scientific Advisory Committee, London, UK, 2003,сс. 106-124.

05.13.12

В.Х. Май, Н.Н. Черникова, А.И. Сердюк д.т.н.

Оренбургский государственный университет,
Аэрокосмический институт, кафедра систем автоматизации производства,
Оренбург, natalchernikova@yandex.ru

О НОВОМ ПОДХОДЕ К РАЗРАБОТКЕ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Разработан новый подход к созданию систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) механической обработки. Подход включает формализованное описание интеллектуальных и типовых задач, решаемых инженером – технологом. Разработана опытная версия САПР, осуществляющая структурно-параметрический синтез технологических процессов.

Ключевые слова: *машиностроение, технология, автоматизация проектирования, САПР ТП.*

Одним из наиболее трудоемких этапов в машиностроении остается технологическая подготовка производства.

Современные САПР ТП (Темп, Вертикаль, Адем, ТехноПро, Компас-АВТОПРОЕКТ, СПРУТ-технология и другие) являются мощными средствами автоматизации труда технологов.

Однако известные САПР ТП не обладают в полной мере интеллектуальной составляющей творчества технолога, связанной с автоматизацией анализа различных вариантов получения исходных заготовок, использования технологического оборудования, выбора технологических баз и формирования маршрутных технологических процессов, назначения вида и количества технологических переходов, выбора материала и геометрии режущих инструментов, назначения режимов резания.

Возникает задача разработки нового подхода к разработке САПР ТП, основанного на использовании опыта формализованного описания задач технологической подготовке производства, накопленного в смежных областях наук о технологии машиностроения и об автоматизированном проектировании технологических процессов.

Анализ задач, решаемых инженером-технологом, позволил дифференцировать их как интеллектуальные и типовые.

К интеллектуальным отнесены слабо формализованные задачи, связанные с выбором технологических баз и формированием вариантов маршрутно-операционного технологического процесса, гарантирующего требуемую точность изготовления изделий при минимальной их себестоимости [1, 2].

Под типовыми процедурами проектирования понимаются часто повторяющиеся, хорошо формализованные действия, связанные с описанием поверхностей детали и заготовки, назначением числа технологических переходов, выбором режущего инструмента, расчетом режимов резания и норм времени.

Для решения интеллектуальных задач предлагается использование аппарата технологического размерного анализа [3].

Аппарат размерного анализа технологических процессов представляет собой строго формализованный инструментарий, адекватно отображающий последовательность проектирования, расчета и анализа маршрутно-операционных технологических процессов механической обработки. При этом размерные схемы могут рассматриваться как средства интерактивной графической визуализации структуры технологического процесса.

Использование математического обеспечения РА ТП дает возможность в автоматизированном режиме рассчитать технологическую размерную цепь, заданную графической структурной схемой, и позволяет 1) оценить корректность разработанного

технологического процесса по критерию соответствия точности изготовленной детали требованиям ее чертежа; 2) рассчитать межпереходные (настроечные) размеры с допусками и отклонениями, необходимые для настройки станков; 3) рассчитать максимальные припуски на обработку, необходимые для выбора геометрии и материала режущих инструментов, а также режимов резания; 4) рассчитать размеры исходной заготовки с допусками и отклонениями с учетом необходимых припусков на обработку.

Многолетнее использование в учебном процессе Оренбургского государственного университета компьютерной программы АСТРА (Автоматизированная Система Технологического Размерного Анализа) подтвердило эффективность аппарата РА ТП для создания САПР ТП.

Математическое описание процессов проектирования технологии механической обработки с позиции теории множеств [4, 5] позволило систематизировать модели формирования групп поверхностей, модели базирования и модели назначения переходов и составления планов обработки, что создает теоретическую основу для автоматизации формирования оптимальных вариантов технологических процессов.

С учетом накопленных материалов разработана интерактивная экранная форма цифрового и графического описания структуры технологического процесса (рис. 1) с возможностями сохранения и считывания промежуточных и окончательных результатов, их редактирования и дополнения.

В случае корректности разработанного ТП, результаты расчета размерных цепей в виде межпереходных размеров, их отклонений и припусков на обработку через обменный файл передаются на следующую экранную форму для выполнения типовых процедур проектирования.

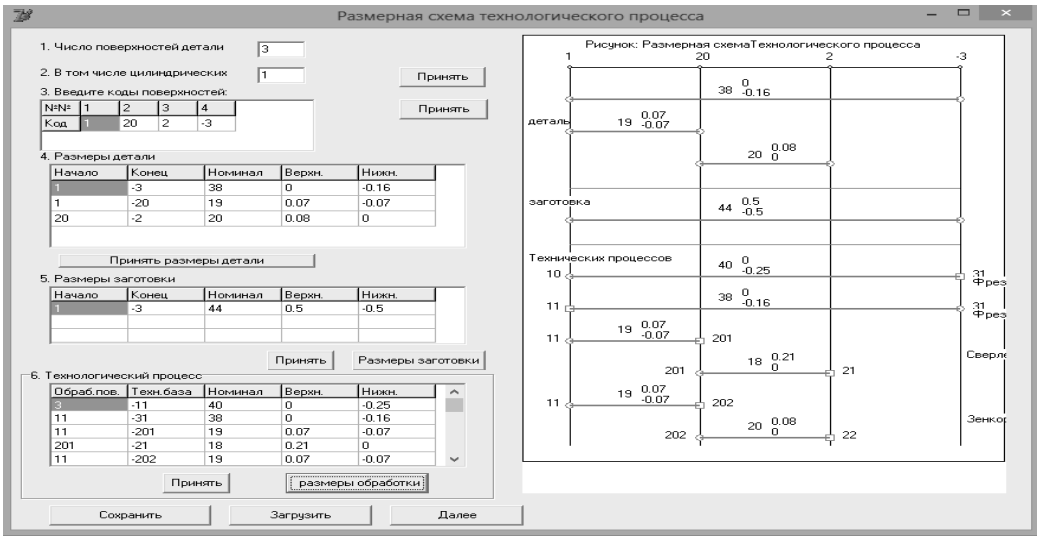


Рис.1. Интерактивная форма описания стуктуры ТП

В качестве математического аппарата при разработке исходного кода типовых процедур использован математический аппарат, изложенный в справочнике [6]. Данный аппарат представляет собой математические модели для определения нормативных значений и поправочные коэффициенты, значения которых выбираются из соответствующих таблиц для конкретных условий механообработки.

Выводы

Установлено, что аппарат размерного анализа технологических процессов представляет собой строго формализованный инструментарий, адекватно отображающий последовательность проектирования, расчета и анализа маршрутно-операционных технологических процессов механической обработки.

Математическое описание процессов проектирования технологии механической обработки с позиции теории множеств позволило систематизировать модели формирования групп поверхностей, модели базирования и модели назначения переходов и составления

планов обработки, что создает теоретическую основу для автоматизации формирования оптимальных вариантов технологических процессов.

Разработаны практические методики автоматизации технологических расчетов, основанные на использовании предложенного математического аппарата и реализованные в виде программного кода типовых процедур проектирования технологических процессов.

В разработанных методиках количество технологических переходов, глубина резания, а также материал и геометрические параметры режущей части инструмента рассчитываются по критериям точности и себестоимости обработки, а варианты минутной подачи и скорости резания назначаются по критерию производительности обработки.

Список литературы

1. *Балакшин, Б.С.* Теория и практика технологии машиностроения/ Б. С. Балакшин. В 2-х ки. Кн.2. Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1982. – 367 с.

2. *Суслов, А.Г.* Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А.М.Дальский. – М.: Машиностроение, 2002.– 684 с.

3. *Матвеев, В.В.* Размерный анализ технологических процессов / В.В. Матвеев, М. М. Тверской, Ф. И. Бойков и др. . – М.: Машиностроение, 1982. – 264 с.

4. *Капустин, Н.М.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении: Учеб. для вузов / Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина. – М.: Высш. шк., 2004. – 415 с.

5. *Норенков, И.П.* Основы автоматизированного проектирования / И.П. Норенков. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 430 с.

6. Общемашиностроительные времени и режимов резания для норми-рования работ, выполняемых универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: в 2-х ч. / – Ч.2 Нормативы режимов резания. - М.: Экономика, 1990. - 472 с.

7. *Сердюк, А.И.* Автоматизация проектирования режимов резания на многоцелевых станках/ Р.Р. Рахматуллин, А.И. Сердюк, А.О. Казаков и др. // Программные продукты и системы. – 2013.– № 1 – С. 114 – 118.

05.11.13

А.А. Мальцев, И.А. Мальцев

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, кафедра «Конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств», Казань, malcev_@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ СВЕТОДИОДА МЕТОДОМ МНОГОВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА

В статье рассмотрены особенности моделирования эквивалентной тепловой схемы светодиода для нестационарного теплового процесса, методом многовариантного анализа.

Ключевые слова: *тепловое сопротивление переход-корпус, эквивалентная тепловая схема светодиода, метод многовариантного анализа.*

Надежность работы светодиодов в значительной степени зависит от перегрева p-n перехода и величины теплового сопротивления [1].

Известные методы измерения теплового сопротивления переход-корпус в большинстве случаев измеряют интегральное тепловое сопротивление светодиода [2]. Для современных светодиодов при расчете теплового сопротивления переход-корпус R необходимо учитывать КПД.

$$R = \frac{\Delta U \max}{TKH \times (1-\eta) \times P} \qquad (1)$$

где $\Delta Umax$ – максимальное изменение прямого напряжения перехода;

TKH – температурный коэффициент напряжения p-n перехода

P - мощность, рассеиваемая на светодиоде;

η – КПД светодиода;

Определение КПД требует дополнительных измерений, и как следствие увеличивает время контрольных операций. Использование нестационарного режима, в частности анализ процесса охлаждения светодиода после окончания импульса мощности имеет ряд преимуществ. Во-первых, нестационарный режим дает возможность определять не только интегральное тепловое сопротивление, но и тепловые сопротивления и теплоемкости отдельных конструктивных элементов светодиода. Во-вторых, анализ проводиться после окончания импульса мощности, то есть в тот момент, когда светодиод не излучает световой энергии, следовательно, нет необходимости измерять КПД.

Рассмотрим особенности анализа нестационарного режима на примере SMD светодиода. Конструкции современных SMD светодиодов таковы, что основная часть тепловой энергии при охлаждении распространяется через основание корпуса. Сверху кристалл полупроводника светодиода покрыт полимерной линзой, теплопроводность которой на два порядка ниже, чем у медного основания корпуса, поэтому можно считать, что тепловой поток через линзу ничтожно мал. Тепловая мощность выделяется в p-n переходе, распложенном на поверхности кристалла, распространяется через полупроводник, слой для крепления кристалла к корпусу, далее, к нижней поверхности корпуса светодиода. Эквивалентная тепловая схема светодиода для нестационарного режима показана на рис. 1. Здесь *R0, C0* - тепловое сопротивление и теплоемкость кристалла светодиода. *R1, C1* - тепловое сопротивление и теплоемкость слоя для крепления кристалла к корпусу. *R2, C2* - тепловое сопротивление и теплоемкость корпуса светодиода. *Rк-с* – тепловое сопротивление корпус-окружающая среда. Считаем, что светодиод имеет эффективную систему охлаждения, поэтому тепловое сопротивления корпус-окружающая среда имеет минимальное значение, то есть выполняется условие $Rк\text{-}с << R0, R1, R2$. Источник тепловой мощности *V1* подключает и отключает ключом *S1*. После окончания импульса мощности, начинается процесс охлаждения светодиода. Методика расчета тепловых сопротивлений *R0, R1, R2* и теплоемкостей *C0, C1, C2* приведена в [4].

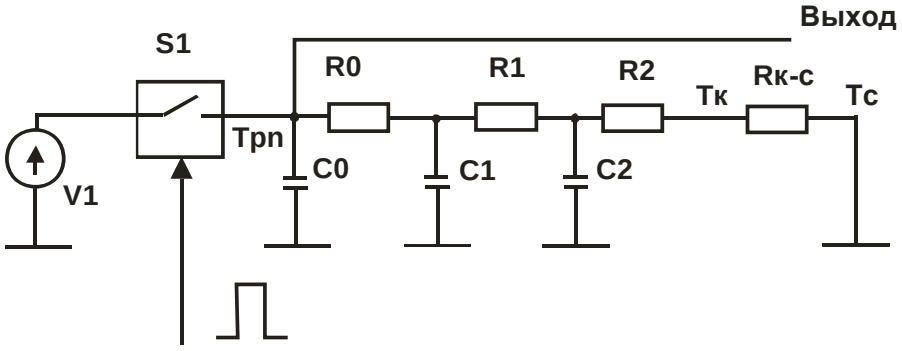


Рис.2. Эквивалентная тепловая схема светодиода

Анализ кривой охлаждения светодиода, позволяет определить величины отдельных элементов эквивалентной тепловой схемы. Для этого проведем многовариантный анализ эквивалентной тепловой схемы. Многовариантный анализ представляет собой процесс варьирования различных параметров схемы с заданным шагом для наблюдения ее реакции. Графики при изменении параметров методом вариации отображаются в одном графическом окне в виде семейства кривых. В [4,5] показано, что наибольшее влияние на интегральное тепловое сопротивление переход-корпус оказывают величины *R0, R1*. Значения тепловых сопротивлений *R0, R1* будут иметь случайный характер, поскольку зависят от многих технологических факторов. Определение аналитического выражения, описывающего конкретную экспериментальную кривую охлаждения и дальнейший расчет элементов тепловой схемы связан, с большим объемом вычислений. Многовариантный анализ позволяет провести сравнения экспериментальной кривой и кривых многовариантного анализа по коэффициентам корреляции, без определения аналитического выражения. При этом точность определения отдельных тепловых сопротивлений и теплоемкостей будет зависеть от количества шагов многовариантного анализа. В качестве примера приведен многовариантный анализ эквивалентной тепловой схемы светодиода LEMWS59R80 Series (производитель LG Innotek, Китай), выполненный в САПР MicroCap. В качестве элементов многовариантного анализа выбраны тепловые сопротивления *R0, R1*. Количество шагов многовариантного анализа равно 10. На рис.3 приведены графики многовариантного анализа нормированной температуры p-n перехода светодиода в зависимости от времени. Для каждого графика САПР формирует таблицу значений нормированной температуры p-n перехода светодиода.

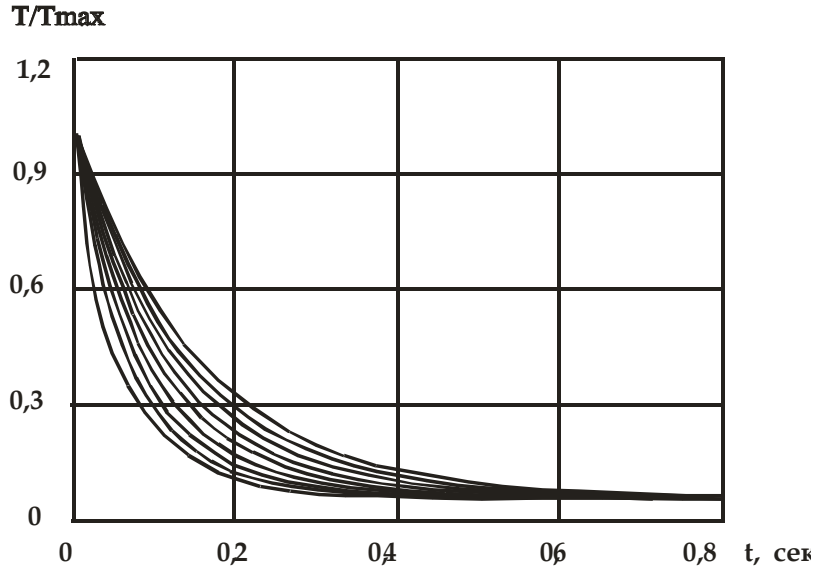


Рис.3. Графики многовариантного анализа нормированной температуры p-n перехода светодиода

Результаты многовариантного анализа переносятся в электронные таблицы Excel. Туда же заносится таблица экспериментальных данных, полученная для исследуемого светодиода. Затем производится расчет коэффициентов корреляции экспериментальной кривой охлаждения попарно с каждым вариантом многовариантного анализа. Полученные коэффициенты корреляции выводятся в виде диаграммы. На рис.4 приведены диаграммы коэффициентов корреляции для многовариантного анализа светодиода рис.3

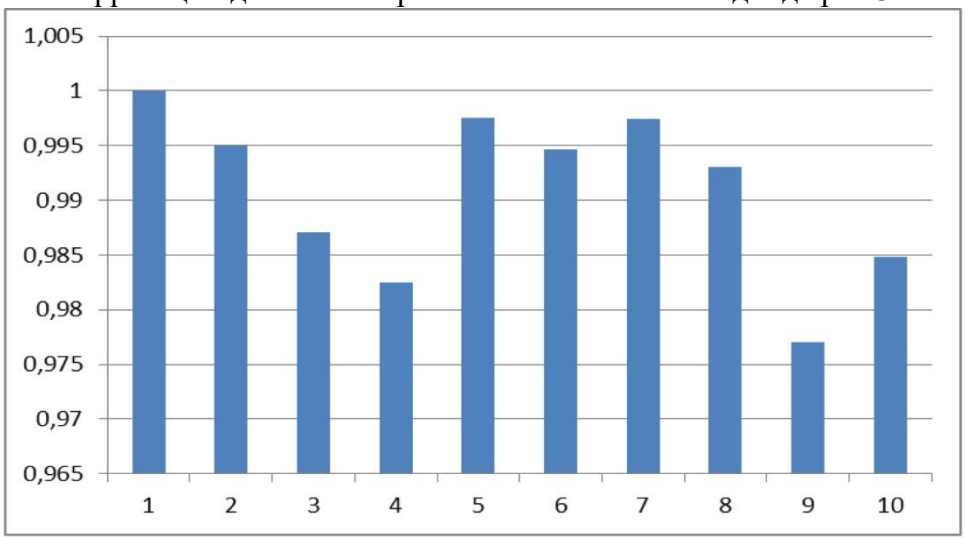


Рис.4. Диаграммы коэффициентов корреляции для многовариантного анализа температуры p-n перехода светодиода.

Из рис. 4 видно, наибольший коэффициент корреляции имеет вариант №1. Выбираем эквивалентную тепловую схему, которая соответствует этому варианту, по таблицам САПР MicroCap определяем величины *R0, R1*. Точность расчета предлагаемого способа будет определяться количеством шагов многовариантного анализа.

Выводы: Использование нестационарного теплового режима позволяет определять теплоемкости и тепловые сопротивления отдельных конструктивных элементов полупроводникового прибора. При использовании этого режима исключается необходимость измерения КПД светодиода.

Многовариантный анализ эквивалентной тепловой схемы и последующее сравнение с экспериментальными графиками с использованием коэффициентов корреляции позволяет определить тепловые сопротивления и теплоемкости отдельных элементов корпуса светодиода. Это дает разработчику светодиодных изделий ценную информацию о качестве и надежности работы используемых светодиодов.

Список литературы

1. *Николаев Д., Феопентов А.* Основы теплового менеджмента при конструировании полупроводниковых световых приборов//Полупроводниковая светотехника.-2010.- №1.- С.44-47.

2. ГОСТ 19656.15-84. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения теплового сопротивления переход - корпус и импульсного теплового сопротивления.

3. *Мальцев И.А.* Анализ тепловой эквивалентной схемы полупроводниковых приборов при нестационарном тепловом режиме// Научно-технический вестник Поволжья.- 2014г.- №1.- С.121-125.

4. *Зенин В., Хишко О.* Влияние марки припоя и способов пайки кристалла на параметры силовых полупроводниковых приборов на примере транзистора КП767В//Компоненты и технологии.- 2009.- №8.- С.146-151.

5. *Дохтуров В., Смирнов С., Гончарова Ю.* Влияние локализации тепловыделения на тепловое сопротивление мощных полупроводниковых источников света//Полупроводниковая светотехника.-2013. - №3. - С.18-19.

05.13.15

В.Ю. Мельцов, А.С. Куваев

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», факультет автоматики и вычислительной техники, кафедра электронных вычислительных машин, Киров, meltsov@vyatsu.ru, aleksey-kuvaev@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА С БЛОКОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ УНИФИКАЦИИ

В работе представлено описание процесса разработки исполнительной подсистемы машины логического вывода. Рассмотрена детализированная структура исполнительного процессора, а также структура блока унификации с последовательным сопоставлением термов. Приведены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: *машина логического вывода, исполнительный процессор, блок унификации, ПЛИС.*

Сегодня мы пытаемся решать с помощью компьютеров любые задачи, в том числе и не вычислительного характера: задачи медицинской и технической диагностики, логического прогнозирования [1], управления крупными предприятиями, 3D-моделирования, интеллектуального анализа данных и так далее. В подобных задачах информация представляется в виде семантического описания предметной области, и, следовательно, необходимо переходить на обработку знаний, т.е. сложных структур символьных данных [2]. Именно поэтому стали появляться языки логического программирования, а также различного рода экспертные системы.

Основным недостатком программного подхода создания интеллектуальных высокопроизводительных систем является их низкое быстродействие, вследствие «семантического разрыва» между языком описания предметной области и машинным языком. Второй проблемой является низкая степень реализуемого параллелизма при решении «логических» задач, несмотря на использование серийных многоядерных процессоров и средств параллельного программирования. Для решения указанных проблем необходимо создавать специализированные высокопроизводительные аппаратные платформы с целью реализации на них машин логического вывода (МЛВ) – основа любой интеллектуальной системы [3].

Не так давно в Европе была предпринята попытка создания подобной платформы на базе Пролог-процессора [3]. Однако из-за низкого быстродействия этот процессор не получил широкого распространения. Именно поэтому есть крайняя необходимость в разработке аппаратных средств систем обработки знаний с максимальной поддержкой параллелизма: от уровня языка описания заданий до нижнего «машинного» уровня. Предлагается в основу разрабатываемой системы заложить высокоскоростной параллельный метод дедуктивного логического вывода – метод на основе операции деления дизъюнктов [4].

Анализируя особенности, заложенные в основу метода логического вывода, ключевой из которых является динамически проявляющийся параллелизм, становится понятна неэффективность использования традиционной Фон-Неймановской архитектуры для специализированного процессора. Было принято решение использовать архитектуру с управлением потоком данных – dataflow архитектуру. Данная архитектура ориентирована на параллельные асинхронные вычисления, а также позволяет эффективно реализовать автоматическое распределение ресурсов.

Обычно основу машины логического вывода составляют два компонента: процессор команд (ПК) и исполнительный процессор (ИП) [3]. При этом особое внимание следует уделять исполнительному процессору, на котором выполняются команды, сформированные процессором команд МЛВ. От быстродействия ИП будет зависеть производительность всей системы в целом. Поэтому было принято решение начать разработку именно с этого компонента МЛВ.

Из всего списка команд, получаемых от ПК, следует выделить команду унификации двух предикатов. При программном моделировании работы машины логического вывода было выявлено, что данная команда не только является самой часто выполняемой в исполнительном процессоре, но и имеет самое большое время выполнения. Это связано с тем, что она применяется при обработке предикатов – многомерных структур данных, которые могут содержать несколько уровней вложенности. С увеличением арности предикатов сложность их унификации значительно увеличивается. Поскольку каждое правило содержит несколько предикатов, а база исходных посылок состоит из несколько правил – команды унификации занимают около 70-75% процессорного времени [3].

Таким образом, при разработке структуры ИП было принято решение для выполнения команд унификации выделить отдельный блок. Это позволит не только исполнять команду унификации параллельно с остальными командами ИП, но и специализировать данный блок для повышения быстродействия МЛВ. Для выполнения всех остальных команд в структуру ИП введен операционный модуль.

Структура МЛВ с детализацией узлов и блоков ИП приведена на рис. 1. Диспетчер ресурсов исполнительного процессора отслеживает освободившиеся узлы и блоки ИП и посылает на них соответствующие команды для обработки. Это обеспечит эффективность загрузки компонентов ИП при реализации параллельного выполнения команд в блоке унификации и операционном модуле.

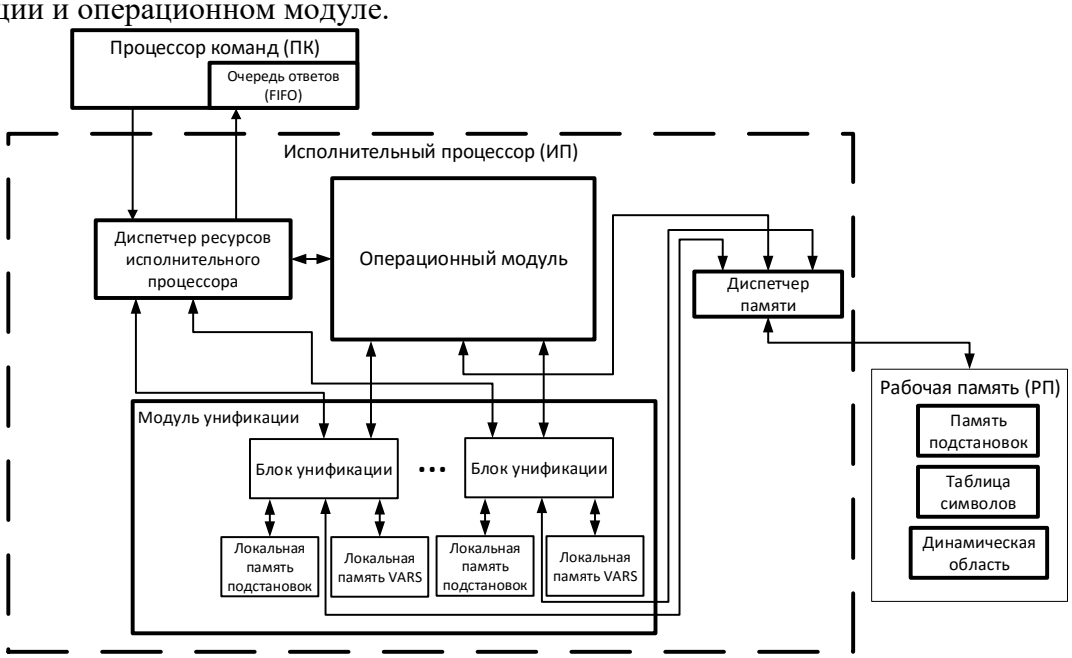


Рис. 1 – Структура МЛВ

Были проанализированы две возможные структуры блока унификации: с последовательным и параллельным сопоставлением термов. Блок унификации с последовательным сопоставлением гораздо проще в своей организации, поэтому именно он был выбран для первой реализации исполнительного процессора до принципиального уровня. Блок унификации включает в себя блок сопоставления, который последовательно считывает пары термов из рабочей памяти, выполняет сопоставления и записывает их во внутреннюю память подстановок.

Все остальные команды ИП выполняются в операционном модуле (рис. 2). Особенностью системы команд (СК) данного модуля является её разбиение на два уровня: уровень команд и уровень микрокоманд.

Для микрокомандного устройства управления были разработаны форматы данных, команд и микрокоманд, а также алгоритмы выполнения соответствующих специализированных микрокоманд. Несмотря на некоторую схожесть с привычным ассемблером, данные микрокоманды имеют свои отличия из-за их ориентации на обработку данных, представленных в специализированных форматах.

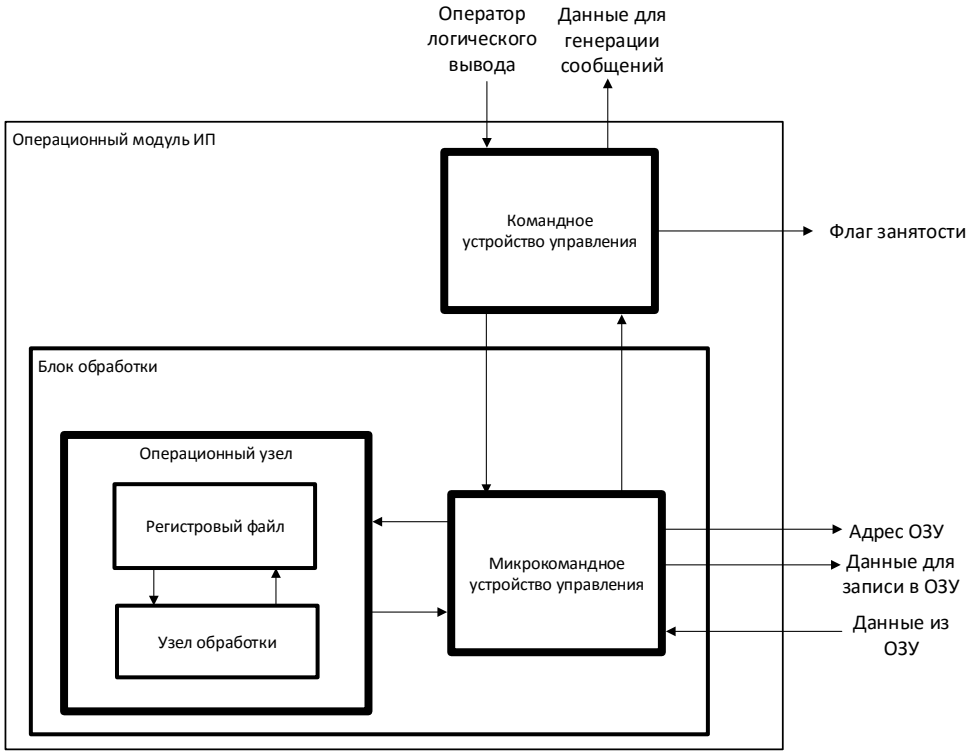


Рис. 2 – Структура операционного модуля исполнительного процессора

На сегодняшний день исполнительный процессор, содержащий один блок унификации с последовательным сопоставлением термов, реализован до уровня принципиальных схем в САПР Quartus. Операционный модуль занимает 1417 логических ячеек в ПЛИС, устройство управления операционным модулем – 1427 логических ячеек, блок последовательной унификации – 1386 логических ячеек. Таким образом разработанный ИП в целом занимает 4230 логических ячейки.

Проведенные на стенде mini DiLab с ПЛИС Cyclone III эксперименты, показали преимущества специализированного процессора при обработке команды МЛВ, в среднем в 2– 3,5 раза, по сравнению с микропроцессором Intel Pentium Core i5. Если взять более современные ПЛИС, например VIRTEX VII с частотой 700 МГц, то преимущество специализированного процессора возрастет еще примерно в 6-8 раз. Кроме того сейчас ведутся исследования по проектированию и реализации на ПЛИС исполнительного процессора с несколькими параллельно работающими блоками унификации.

Список литературы

1. *Strabykin D.A.* Logical method for predicting situation development based on abductive inference. Journal of Computer and Systems Sciences International. 2013. Т. 52. № 5. P. 759-763.
2. *Мельцов В.Ю., Чистяков Г.А*. Формирование базы знаний на основе структуры Крипке и формул темпоральной логики / Фундаментальные исследования. 2013. № 8-4. С. 847-852.
3. *Meltsov V.Yu*. High-performance systems of deductive inference (monograf). Science Book Publishing House LLC. Yelm, WA, USA., 2014. 215 p.
4. *Страбыкин Д.А.* Машины логического вывода на основе теории параллельных дедуктивных и абдуктивных вычислений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Санкт-Петербург, 2000.

05.07.05

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров, А.И. Плотников

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», аэрокосмический факультет, Центр высокопроизводительных вычислительных систем, Пермь, mevpstu@gmail.com, modorsky@pstu.ru, president@pstu.ru, Andrew-plotnikov-ai@yandex.ru

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА В АЭРОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Решается задача по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) лопатки компрессора в потоке газа с учетом работы направляющего аппарата. Реализуется связанная постановка задачи. Обнаружен эффект возрастания напряжений в лопатке, в аэроупругой постановке по сравнению с нестационарным расчетом напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: *компрессор, газодинамический поток, напряженно-деформированное состояние, связанная задача аэроупругости.*

1. Введение

В процессе эксплуатации компрессоров могут возникнуть вибрации, сопровождающиеся увеличенными динамическими нагрузками на опоры и вызывающие снижение эксплуатационных характеристик [1].

Имеется множество причин возникновения вибраций в лопаточных машинах. Например, имеют место технологические дисбалансы валов и других деталей вращения, возникают дисбалансы при монтаже, что приводит к вибрациям. Необходим также учет колебательных процессов в магнитных подвесах. Кроме того, важным фактором, влияющим на вибрации, являются колебательные процессы в лабиринтных уплотнениях и в газодинамическом тракте. [2, 3, 4, 5, 6].

Вместе с тем, в настоящее время, ввиду сложности расчетов анализ вибраций и аэродинамики выполняются по отдельности. Неучет значимых факторов приводит к тому, что вибрации в компрессорах на сегодняшний день не поддаются прогнозированию.

2. Физическая модель

В данной работе реализуется полностью связанная неунифицированная схема решения аэроупругой задачи, применительно к моделированию в динамической системе «газ-ротор-статор взаимодействия» на примере экспериментальной ступени компрессора.

Рассмотрены два домена: входной направляющий аппарат (ВНА) и сам ротор. Домен ВНА стационарен, домен ротора вращается с постоянной угловой скоростью. Производится учет взаимовлияния газодинамического потока и деформирования лопатки ротора. Рассматривается сектор, представляющий собой 1/12 часть конструкции. Сектор ограничен плоскостями, на которых записываются условия периодичности. Рассматривается течение идеального газа с заданными свойствами; химические процессы не учитываются; поток однофазный; расчеты проведены без учета гравитации; стенки конструкции не поглощают и не выделяют тепло, шероховатые; коэффициенты теплоемкости не зависят от абсолютной температуры.

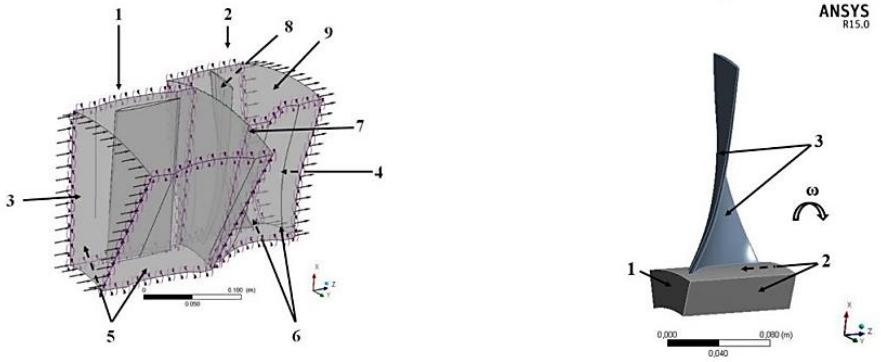
3. Математическая модель

В соответствии с выбранной физической используется математическая модель, включающая в себя две подмодели. Подмодель газодинамики базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии, уравнении состояния совершенного сжимаемого газа и замыкается начальными и граничными условиями. Граничные условия для газодинамики представлены на рисунке 1а. Математическая подмодель для оценки НДС записывается следующим образом [7, 8]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \qquad (1)$$

где m – матрица масс; c – матрица демпфирования; k – матрица жесткости; $F(t)$ – вектор нагрузки; x – перемещения.

В любой момент времени эти уравнения можно рассматривать, как набор статических уравнений равновесия, которые также учитывают силы инерции и демпфирования. Для решения этих уравнений используется интегрирование по времени методом Newmark [7, 8]. Шаг интегрирования по времени рассчитывается. Граничные условия для конструкции представлены на рисунке 1б.



1 – домен статора; 2 – домен ротора; 3 – вход; 4 – выход; 5 – симметрия домена статора; 6 – симметрия домена ротора; 7- интерфейс между доменами; 8 – интерфейс «газ-конструкция» (подвижная сетка лопатки ротора); 9 – подвижная сетка зазора в домене ротора

1 – запрет перемещений по нормали к поверхности замка лопатки; 2 – симметрия; 3 – интерфейс «конструкция – газ»

а б

Рис. 1 – Граничные условия: а – для газодинамического расчета; б – для расчета НДС

Затем были разработаны твердотельные и сеточные модели конструкции и газодинамической части. Количество элементов сеточной модели газодинамического тракта ротора составило 108345 узлов и 99240 элементов; конструкции – 7728 узлов и 3378 элементов.

4. Проведение вычислительных экспериментов

Решение отыскивается итерационным способом. Два решателя – Transient Structural (нестационарная механика, метод конечного элемента) и CFX Transient (газодинамика, метод конечного объема) объединены передачей данных. Блок-схема такого решения представлена в [9].

Расчеты проведены в системе компьютерного инженерного анализа ANSYS 15.0. Расчет является трудоемким, т.к. приходится на каждом шаге по времени решать и газодинамическую, и прочностную задачи. Для ускорения счета использовался вычислительный кластер ЦВВС ПНИПУ, производительностью 21 Тфлопс. Продолжительность расчета составляет в среднем 4 часа на 16 ядрах «IntelXeon E5-2680».

5. Результаты

По результатам вычислительных экспериментов получена зависимость прироста перемещений, обусловленного учетом аэроупругости от скорости вращения, в контрольной точке, расположенной на верхней кромке лопатки. На рисунке 2 представлен график, по вертикальной оси которого отложена разность перемещений, полученных при расчете 2*FSI* и нестационарного решения НДС (вычисляется по формуле: $\Delta U=U_{2FSI}-U_{\text{нест}}$). По горизонтальной оси отложены частоты вращения ротора. Для анализа выбирались точки, соответствующие моменту времени возникновения второго пика в расчете 2*FSI*. При этом по диаграмме Кэмпбелла была определена критическая частота вращения модельной ступени компрессора, которая составила 1013,8 рад/с. Этим обусловлен рост перемещений при вращении на скоростях, близких к критической. Вместе с тем видно, что критическая частота в аэроупругой постановке ниже, чем та, что определена по вышеуказанной диаграмме примерно на 10 Гц.

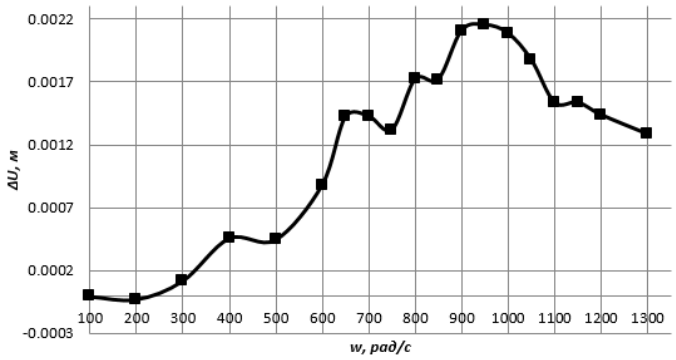


Рис. 2 – Влияние аэроупругости на полные перемещения в контрольной точке, расположенной на верхней кромке лопатки.

В вычислительном эксперименте получена временная зависимость напряжений по Мизесу σ в нестационарном расчете (без учета *FSI*) и в 2*FSI* расчете для скорости вращения ротора ω=650 с$^{-1}$ (см. рис. 3).

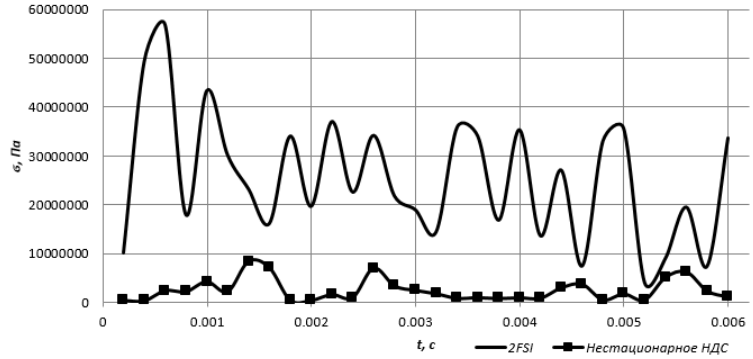


Рис. 3 – Напряжения по Мизесу (ω=650 с$^{-1}$).

Был проведен анализ этих зависимостей при различных скоростях вращения ротора. При этом были получены графики зависимостей $\Delta\sigma_{\max}$ от ω (рис. 4), где $\Delta\sigma_{max} = \frac{\Delta\sigma_{max}^{FSI} - \Delta\sigma_{max}^{\text{нест}}}{\Delta\sigma_{max}^{\text{нест}}}$, $\Delta\sigma_{\text{ср}} = \frac{\Delta\sigma_{\text{ср}}^{FSI} - \Delta\sigma_{\text{ср}}^{\text{нест}}}{\Delta\sigma_{\text{ср}}^{\text{нест}}}$.

Видно, что на частотах, близких к критическим, наблюдается рост $\Delta\sigma_{\max}$, связанный с учетом аэроупругого эффекта. Вместе с тем, обнаружено, что зависимость $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ от *t*, где $\Delta\sigma_{\text{ср}}^{FSI} = \frac{\sum_1^N \Delta\sigma^{FSI}}{N}$, $\Delta\sigma_{\text{ср}}^{\text{нест}} = \frac{\sum_1^N \Delta\sigma^{\text{нест}}}{N}$, менее информативна и не имеет ярко выраженного максимума в критической области.

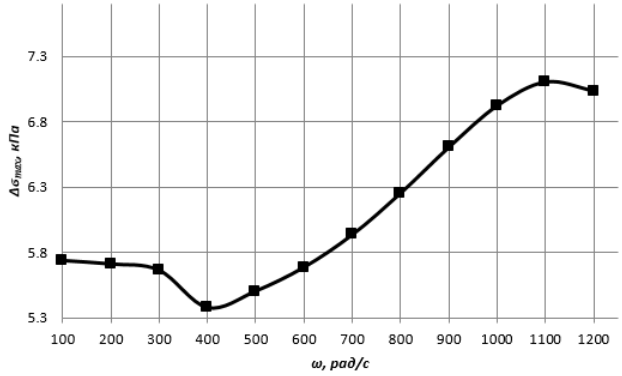


Рис. 5 – Зависимость $\Delta\sigma_{\max}$ от частоты вращения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Список литературы

1. *Мехоношина Е.В., Модорский В.Я.* Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора// - Казань: Научно-технический вестник Поволжья. 2014 г. -№5 – С.264-268. ISSN 2079-5920

2. *Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.* Газоупругие процессы в энергетических установках// – М. Наука, 2007. – 176 с.

3. *Копысов С.П., Тонков Л.Е., Чернова А.А.* Двухстороннее связывание при моделировании взаимодействия сверхзвукового потока и деформируемой пластины. Сравнение численных схем и результатов эксперимента// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 78-85.

4. *Амарантов Г.Н., Егоров М.Ю., Егоров С.М., Егоров Д.М., Некрасов В.И.* Численное моделирование внутрикамерных процессов при выходе на режим работы ракетного двигателя твердого топлива// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2010. – Т. 3, № 4. – С. 5-17.

5. *Ганеева М.С., Моисеева В.Е., Скворцова З.В*. Нелинейный изгиб и устойчивость эллипсоидальной оболочки, взаимодействующей с жидкостью// Вычисл. мех. сплош. сред. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 32-40.

6. *Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский,* Разработка методики численного моделирования аэроупругой работы компрессора. Научно-технический вестник Поволжья. №5 2014г. – Казань: Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – 392 с. (264-268стр.)ISSN 2079-5920.

7 ANSYS Structural Analysis Guide, Release 15.0.

8. *Erke Wang, Thomas Nelson*. Structural Dynamic Capabilities of ANSYS// – Nonlinear Analysis Using ANSYS - The University Of Maine, 2015.

9. *Jianping Zhang, Liang Guo, Helen Wu, Aixi Zhou, Danmei Hu, Jianxing Ren.* The influence of wind shear on vibration of geometrically nonlinear wind turbine blade under fluid–structure interaction// Ocean Engineering. – 84 (2014). – P. 14–19.

05.09.01

И.Ш. Мустафин, А.В. Волков, А.А. Попов

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, кафедра Электроники и наноэлектроники,
Саранск, ilshat-mustafin@yandex.ru, elsoldador@rambler.ru

АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ КЛЮЧАХ ИНВЕРТОРА

В работе рассматривается актуальные вопросы повышения энергоэффективности регулируемых электроприводов. Одним из вариантов подобных систем является электропривод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Рассматривается влияние коммутационных на энергетические показатели машинно-вентильного каскада.

Ключевые слова: *регулируемый электропривод, энергетические показатели, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, алгоритм управления.*

Сегодня электропривод переменного тока (ЭП) является самым надежным и экономически целесообразным способом преобразования электрической энергии в механическую. Применение теории векторного управления в силовой преобразовательной технике создает предпосылки для разработок как частично, так и полностью управляемых электромеханических систем, функционирующих в соответствии с заданными законами [1,2].

Важным вопросом при реализации энергоэффективных законов управления ЭП является их влияние на энергетические показатели ПЧ. Коммутационные потери в силовых ключах являются одной из основных составляющих общих потерь в ЭП. Особенно актуально это для привода на основе АД, поскольку применение двух ПЧ может свести на нет все усилия по реализации энергоэффективных законов управления. Поэтому следует учесть потери в IGBT-транзисторах, которые чаще всего применяются для построения ПЧ.

Определим активные потери в элементах силовой части ПЧ, где в качестве нагрузки выбран АД с короткозамкнутым ротором 4АК160М4УЗ мощностью 14 кВт. Структура силовых ПЧ двухзвенная с промежуточным звеном постоянного тока. Входное напряжение инвертора примем $U_d = 537B$, а максимальный фазный ток $I_{\max} = 39,47A$.

Для расчета потерь активной мощности от протекания прямых токов в транзисторах и диодах инвертора необходимо знание средних и действующих значений этих токов [3,4].

Простые расчетные соотношения для средних и действующих значений токов транзисторов и диодов инвертора с синусоидальной ШИМ можно получить, если сделать допущение о пределе кратности отношения частот коммутации (частоты тактов при ШИМ) к выходной частоте инвертора. Тогда импульсы тока в вентиле можно аппроксимировать непрерывной функцией, равной на каждом такте среднему значению исходной импульсной функции анодного тока. Реальные импульсы тока вентиля подвержены двойной модуляции: амплитудной по закону модуля синусоиды выходного тока инвертора и широтно-импульсной по закону синусоидального модулирующего сигнала, формирующего синусоидальную ШИМ в инверторе. Тогда среднее значение тока транзистора за период выходной частоты инвертора можно получить усреднением указанной аппроксимирующей непрерывной функции текущих средних значений по тактам тока вентиля:

$$I_T = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \vartheta_{И.Т} I_{T\max} \sin \omega t d\vartheta; \qquad (1)$$

где $\vartheta_{И.Т} = \frac{1}{2}\left[1 + M\sin(\omega t + \varphi)\right] = \frac{t_{И.Т}}{T_T}$ – текущее значение относительной длительности импульса тока вентиля (в интервале такта T_T); φ – фаза выходного тока инвертора относительно первой гармоники выходного напряжения инвертора; M – глубина широтно-

импульсной модуляции, задаваемая отношением амплитуды модулирующего сигнала к амплитуде симметричного треугольного опорного сигнала; $I_{T\max}$ – амплитуда синусоиды выходного тока инвертора. В нашем случае $M = \frac{U_d}{U_t} = \frac{537}{15} \approx 35$, где U_t – амплитуде симметричного треугольного сигнала.

После вычисления интеграла (1) получим:

$$I_T = \frac{I_{\max}}{2\pi}\left(1 + \frac{M\pi}{4}\cos\varphi\right) = \frac{39,47}{2\pi}\left(1 + \frac{35\pi}{4}0,95\right) = 170,5A \qquad (2)$$

Среднее значение тока обратных вентилей инвертора определяется как разница средних значений полуволны выходного тока инвертора и тока транзистора (2):

$$I_Д = \frac{1}{\pi}I_{\max} - I_T = \frac{I_{\max}}{2\pi}\left(1 - \frac{M\pi}{4}\cos\varphi\right) = \frac{39,47}{2\pi}\left(1 - \frac{35\pi}{4}0,95\right) = 157,9A \qquad (3)$$

На основе выражения (2) вычисляется действующее значение тока транзистора:

$$I_{Т.Д} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \vartheta_{И.Т} I_{T\max}^2 \sin^2 \omega t d\vartheta} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2M}{3\pi}\cos\varphi} = \frac{39,47}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2M}{3\pi}\cdot 0,95} = 76,1A$$

В соответствии с отмеченным рассмотрением тока диода (3) дополняющего в нулевые паузы ток транзистора до полуволны синусоиды действующее значение тока диода будет очевидно равно:

$$I_{Д.Д} = \sqrt{\left(\frac{I_{\max}}{2}\right) - I_{Т.Д}^2} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2M}{3\pi}\cos\varphi} = \frac{39,47}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{1}{4} - \frac{2M}{3\pi}\cdot 0,95} = 74,61A$$

Действующее значение входного тока инвертора при симметричных фазах нагрузки:

$$I_{ВХ.Д} = I_{\max}\frac{\sqrt{6}}{8}\sqrt{4 - M^2 + 4M^2\cos^2\varphi} = 39,47\cdot\frac{\sqrt{6}}{8}\sqrt{4 - M^2 + 4M^2\cos^2\varphi} = 67,8A$$

Коэффициент гармоник входного тока инвертора, определяющий степень загрузки токами высших гармоник конденсатора фильтра в звене постоянного напряжения инвертора, будет равен:

$$K_{Г.Т.ВХ} = \frac{\sqrt{I^2_{ВХ.Д} - I^2_{ВХ.СР}}}{I_{ВХ.СР}} = \sqrt{\frac{4 - M^2 + 4M^2\cos^2\varphi}{6M^2\cos^2\varphi} - 1} = 0,7$$

Электрические потери в силовых ключах трехфазного АИН, выполненного по мостовой схеме:

$$P_n = 6\cdot P_k, \qquad (4)$$

где $P_к$ — мощность потерь энергии в силовом ключе.

Мощность потерь в силовом ключе инвертора определяется следующим выражением:

$$P_k = I_{Т.Д}\cdot U_{gr} + I^2_{Д.Д}\cdot R_{dif} \qquad (5)$$

Подставляя выражение (5) в (4) получим:

$$P_n = 6\cdot(I_{Т.Д}\cdot U_{gr} + I^2_{Д.Д}\cdot R_{dif}), \qquad (6)$$

где U_{gr} – граничное падение напряжения при прямом и обратном токах; R_{dif} – дифференциальные сопротивления при прямом и обратном токах. Значение U_{gr} и R_{dif} определяются из паспортных данных на конкретный модуль (в нашем случае значение $U_{gr} = 1,8B$, $R_{dif} = 0,0080Ом$). Подставляем значения в (6) получим :

$$P_n = 6\cdot(I_{Т.Д}\cdot U_{gr} + I^2_{Д.Д}\cdot R_{dif}) = 6\cdot(76,1\cdot 1,8 + 74,6^2\cdot 0,0080) \approx 1089Bm$$

Полученные значения мощности потерь в силовых ключах инвертора соответствуют рекомендациям, данным в [5]. Специальный подбор силовых ключей в ПЧ по минимуму коммутационных потерь не осуществлялся.

Проведенные исследования позволяют дать ряд рекомендаций для снижения коммутационных потерь в преобразователях частоты в системе электропривода на базе АД:

– подбор ключей по основным электрическим параметрам,

– выбор оптимального способа ШИМ,

– применение специальных энергоэффективных алгоритмов управления, предложенных в статье [6].

Список литературы

1. *Ботвинник М.М.* Управляемая машина переменного тока / М.М. Ботвинник, Ю.Г. Шакарян. – М.: Наука, 1969. – 142 с.

2. *Тутаев Г.М.* Асинхронизированный вентильный двигатель как многоканальный объект управления / Г.М. Тутаев // Электричество. – 2013. – № 10. – С. 48-51.

3. *Гуляев И.В*. Электропривод на базе асинхронизированного вентильного двигателя / И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 70-73.

4. *Зиновьев Г.С.* Силовая электроника : учебное пособие для бакалавров / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2015. – 667 с.

5. *Семенов Б.Ю.* Силовая электроника : профессиональные решения / Б.Ю. Семенов. – М. : Издательство Солон-Пресс, 2011, – 416 с.

6. *Тутаев Г.М.* Анализ потерь в электроприводе с асинхронизированным вентильным двигателем / Г.М. Тутаев, Е.Н. Белкина // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 2. – С. 206-209.

05.18.12

Р.В. Муцаев

ФГОУ ВПО «Астраханский Государственный Технический Университет»,
кафедра «Технологические машины и оборудование»,
Астрахань, mr.shatoevskiy@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНУЛИНА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИФРУКТАНОВ

Проведен анализ патентной и технической литературы, изучены способы получения полифруктанов из растительного сырья. Выявлены основные недостатки существующих способов. Предложена возможность интенсификации процесса экстрагирования при помощи использования ультразвукового излучения; проведены первые эксперименты.

Ключевые слова: *ультразвуковое излучение, полифруктаны, процесс экстрагирования.*

Введение.

Пребиотики являются одним из наиболее привлекательных и самых динамично развивающихся сегментов рынка функциональных добавок пищевой отрасли в России и в мире. Инулин в процентном соотношении занимает наибольшую часть рынка функциональных ингредиентов. Данный пребиотик регулирует обмен веществ, позволяет снизить уровень сахара в крови, предотвращает возникновение осложнений сахарного диабета, потому используется в качестве компонента лечебно-профилактического питания для диабетиков. Инулин также широко применяется в пищевой промышленности в качестве основного компонента для производства фруктозного сахара. В последнее время инулин используется также как заменитель жиров в молочных продуктах и десертах, т.к. способен придавать продуктам сливочную насыщенность и консистенцию.

Российский рынок инулина полностью импортозависим, в стране отсутствует промышленное производство высококачественного инулина для широкого использования в пищевой, фармацевтической, медицинской промышленности (только проекты на стадии разработки). Инулиносодержащие продукты отечественного производства - это высушенный измельченный топинамбур (60-70 % инулина) и сок топинамбура (около 15 % инулина). Существующие технологии инулина достаточно сложны, предусматривают использование энергоемких и длительных процессов на отдельных стадиях производства (экстракция, кристаллизация при низких температурах, многоступенчатая очистка экстрактов) либо экологически небезопасны, т.к. осуществляются с использованием химических реагентов.

Результаты исследования.

Анализ существующих способов производства инулина позволил выявить ряд перспективных технологий полифруктанов, в частности, инулина.

Известен способ получения инулина из клубней топинамбура, включающий его кристаллизацию и сушку. В известном способе [3] из измельченных клубней топинамбура при помощи физико-механического отделения водорастворимых веществ от нерастворимых в воде волокнистых веществ клубней получают сок, из которого при помощи нагревания до 80-85°С в течение 1-3 мин и фильтрования удаляют белковые и окрашенные вещества. После чего полученный фильтрат сока очищают от высокомолекулярных веществ инулиновой природы с молекулярной массой более 6500 Да и коллоидно-дисперсных веществ при помощи ультрафильтрации на полых волокнах. Полученный концентрат разводят водой и подвергают диафильтрации. Пермеат после ультрафильтрации и пермеат после диафильтрации объединяют и проводят нанофильтрацию, пропуская объединенный раствор через полунепроницаемую мембрану с порогом задерживания 4500 Да. При этом в концентрате накапливается инулин, а низкомолекулярные и неорганические примеси переходят в ультрафильтрат. В известном способе инулин получают из сока свежесобранного сырья (топинамбура), но способ не позволяет получать химически чистый

инулин с молекулярной массой 5000 - 6000 Да, который пригоден для использования в фармакологии и медицине. Использование ультрафильтрации для очистки инулина требует наличия специальных фильтров и мембран, которые малодоступны для промышленного использования. Кроме того, очистка извлечений из топинамбура с помощью ультрафильтрации и фильтрации на мембранах не дает возможности освободить извлечения, содержащие инулин от высокомолекулярных природных полимеров белков и пектинов.

Для получения инулинсодержащего раствора по *известному способу*[6] клубни топинамбура моют в емкости с водой, инспектируют, затем режут на ломтики, после чего ломтики сушат. Высушенные ломтики измельчают в муку до тонины помола 50-60 микрон. Муку топинамбура размешивают в горячей воде с температурой 50-60°С до получения однородной консистенции без комков. Затем полученную суспензию с соотношением компонентов 1:4 подогревают до 80-85°С выдерживают при перемешивании 1-1,5 ч. для экстракции фруктозанов. В описанном способе приведены примеры получения инулинсодержащего раствора как на основе сока кашицеобразной консистенции, полученной при измельчении свежесобранных клубней топинамбура, так и на основе приготовления водной суспензии из муки топинамбура.

Однако в данном способе после осветления инулинсодержащего раствора большую сложность представляет отделение из него активированного угля, так как частицы угля проходят через фильтрующую ткань и попадают в фильтрат. Раствор остается сильно окрашенным, что влияет на цветность конечного продукта и, соответственно, на качество инулина, получаемого из инулинсодержащего раствора. Кроме того, из инулинсодержащего раствора, полученного при реализации известного способа, невозможно получить химически чистый инулин с молекулярной массой 5000 - 6000 Да для использования его в фармакологии и медицине, так как нанофильтрацию проводят на полимерных полунепроницаемых мембранах, которые имеют ограничения по температуре и низкий ресурс эксплуатации до 1 года в связи с тем, что подвержены химической деградации за счет гидролиза, окисления и микробного воздействия.

Известен способ получения инулина и других фруктаносодержащих продуктов из топинамбура [2]. В известном способе клубни топинамбура моют в емкости с водой, инспектируют, затем режут на ломтики, после чего ломтики сушат. Высушенные ломтики измельчают в муку до тонины помола 50-60 микрон. Муку топинамбура размешивают в горячей воде с температурой 50-60°С до получения однородной консистенции без комков. Затем полученную суспензию с соотношением компонентов 1:4 подогревают до 80-85°С и выдерживают при перемешивании 1-4,5 ч. для экстракции фруктозанов.

Вышеописанный способ получения инулина и других фруктаносодержащих продуктов из топинамбура имеет целый ряд недостатков. Резка клубней топинамбура осуществляется крупными ломтиками и, поскольку клубни топинамбура содержат большое количество сахаристых веществ (в том числе инулина), из-за чего сушка весьма затруднена, так как ломтики слипаются, их необходимо постоянно перемешивать, при этом усложняется оборудование, увеличивается потребление энергии. Кроме того, крупные ломтики темнеют за счёт окисления, что требует больше усилий при обесцвечивании конечной продукции. Небольшой выход инулина в раствор определяет то, что измельчение продукта осуществляется до тонины помола 50-60 микрон. Приготовление суспензии начинают в режиме невысоких температур 50-60°С, а для проведения экстракции осуществляют принудительный подогрев до 80- 85°С. Однако при этом длительность экстракции сокращается, что недостаточно для максимального выхода фруктозанов в раствор.

Известен способ получения инулин-пектинового концентрата в порошке для медицинских и пищевых целей из высушенного сырья [4], заключающийся в том, что проводят водное экстрагирование из порошка сухих клубней топинамбура фракций инулина и водорастворимого пектина, экстрагирование пектинов водным раствором кислоты лимонной из оставшегося сырья, кристаллизацию и осаждение инулина и пектинов.

Недостатками данного способа получения инулин-пектинового концентрата является небольшой выход пектина и его невысокие качественные характеристики (связывающая способность, степень этерификации, уронидная составляющая, полная статическая обменная емкость). Инулин-пектиновый концентрат также обладает невысокой детоксицирующей активностью.

Известен способ комплексной переработки топинамбура, предусматривающий мойку топинамбура, его паровую очистку, доочистку, резку, бланширование, протирку, экстрагирование подкисленной водой с разделением фаз, очистку экстракта путем введения в него хлористого кальция, нагревания до кипения, медленного охлаждения, выдержки в течение 60 минут и центрифугирования с удалением осадка и получением инулинсодержащего раствора [1].

Недостатком является потеря пектиновых веществ на стадии очистки экстракта. Кроме этого, подкисление раствора инулина может приводить к гидролизу инулина и, соответственно, снижению выхода.

Известен способ получения инулина и других фруктаносодержащих продуктов из топинамбура и другого инулинсодержащего сырья [5], включающий экстрагирование фруктанов горячим солевым раствором из сырья с последующей фильтрацией и депигментацией на анионите, концентрирование, осаждение, фильтрацию, промывку и вакуум-сушку готового продукта.

Выводы.

Из обзора патентной и технической литературы следует, что существует достаточно большое количество способов получения инулина из клубней топинамбура, однако все они имеют схожие недостатки, такие как:

1) Сравнительно небольшой выход конечного продукта и его невысокое качество;
2) Относительно большая длительность процесса, что делает производство инулина нерентабельным;
3) Получение конечного продукта с примесями;
4) Частичные потери инулина вследствие экстракции спиртовым раствором (агрессивная среда);

Ни в одном из существующих способов не отражена возможность использования ультразвука при экстрагировании инулина из раствора топинамбура.

С помощью ультразвука частотой 19-44 кГц из растений с сокращением процесса экстракции на 1-2 порядка можно извлекать флавоноиды, дубильные вещества, фенолгликозиды, связанные кумарины, антоцианы, фенолкарбоновые кислоты. При этом, значительно возрастает выход экстрактивных веществ.

Например, выход розового и облепихового масла увеличивается на 10-15%, атропина на 18-25%, валериановой кислоты - на 20%, платифиллина - на 15%, фуранохромонов - на 30%, кверцетина на 47%, эргостерина – на 45-60%, урсоловой кислоты - на 10%.

Наша гипотеза.

В нашей диссертационной работе мы планируем интенсифицировать процесс экстракции инулина из инулинсодержащего сырья (клубней топинамбура) при помощи ультразвуковых колебаний. Это значительно ускорит процесс, увеличит выход продукта, а также существенно удешевит экстрагирование. Перед применением УЗ колебаний продукт будет измельчен для достижения максимальной эффективности процесса и уменьшения его длительности. Одновременно с этим необходимо обеспечить доступ экстрагента к каждой частице, что будет достигнуто перемешиванием во время УЗ-обработки и максимальным уменьшением соотношения экстрагент/сырье (гидромодуль). Подогрев экстрагента будет осуществляться в допустимых пределах во избежание его перегрева, т. к. при этом интенсивность передачи ультразвуковой энергии падает.

Для сравнения ниже представлены результаты экспериментов экстракции топинамбура с использованием ультразвука частотой 100 кГц и без ультразвука (табл. 1-4).

Таблица 1 - Экстрагирование без ультразвука. Гидромодуль – 1:5, $t_{нач} = 55ºC$

T, мин	$C_{в-ва}$	m, г
5	2%	50
20	2,8%	50
40	3%	50

Таблица 2 - Экстрагирование без ультразвука. Гидромодуль – 1:3, $t_{нач} = 70ºC$

T, мин	$C_{в-ва}$	m, г
5	3,3%	50
20	4,8%	50
50	5,5%	50

Таблица 3 - Экстрагирование с ультразвуком. Гидромодуль – 1:5, $t_{нач} = 55ºC$

T, мин	$C_{в-ва}$	m, г
5	2%	50
20	2,2%	50
40	3%	50

Таблица 4 - Экстрагирование с ультразвуком. Гидромодуль – 1:3, $t_{нач} = 70ºC$

T, мин	$C_{в-ва}$	m, г
5	4%	50
20	5,4%	50
35	6%	50

Полученные результаты экспериментальных исследований по экстрагированию инулина из клубней топинамбура показали, что эффективность комплексно-исследовательных способов (с применением ультразвука, без применения ультразвука) недостаточна для рентабельного производства инулина. Однако, анализ литературных данных [8], а также постановочные эксперименты получения инулина при частоте 22 кГц, проведенные авторами, увеличивают интенсивность процесса экстракции на 15-20% и повышают рентабельность промышленного производства исследуемого продукта.

Таким образом, целью дальнейших исследований является разработка рационального способа получения инулина при использовании ультразвука частотой 22 кГц и варьировании влияющих на процесс экстракции факторов (температура, состав гидромодуля и т.д.)

Список литературы

1. Акопян Ю.Р., Разработка технологии получения фруктозного сиропа из топинамбура: Автореф. дис. канд.тех.наук. – Москва,1994 – 6-16 с.
2. Заявка № 20091 1 1945 на изобретение, 10.10.2010. Артемьев В.Д., Васильева Ю.П.
3. Патент РФ № 2148588, 10.05.2000. Манешин В.В., Артемьев В.Д., Васильева Ю.П.
4. Патент РФ № 2169002, 20.06.2001. Самокиш И.И., Зяблицева Н.С., Компанцев В.А.
5. Патент РФ №2175239, 27.10.2001. Аравина Л.А., Городецкий Г.Б., Иванова Н.Я., Комаров Е.В., Момот Н.Н., Черкасова М.А.
6. Патент РФ № 2281291, 10. 08. 2006. Манешин В.В., Артемьев В.Д., Васильева Ю.П., Чеботарева Т.И.
7. ООО «Центр ультразвуковых технологий» [Электронный ресурс] – сайт: http://u-sonic.com/tech/obrabotka-zhidkikh-i-zhidkodispersnykh-sred/ekstragirovanie_02/
8. Молохова Л.Г., Решетникова А.Е. Сравнительная характеристика эффективности методов экстракции. - В кн.: Материалы 2-го Всесоюзного съезда фармацевтов. Рига, 1974, с. 91

05.22.10

А.И. Новиков к.т.н.

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, кафедра автомобилей и сервиса, Воронеж, kar1660n@gmail.com

О ДИЛЕММЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Получение эффективных, экологически безопасных и экономически оправданных результатов эксплуатации автомобильных энергетических установок в современных условиях возможно лишь путем применения в системе энергообразования альтернативных источников энергии и (или) улучшения свойств традиционных. В работе на основании теоретических и эмпирических данных предпринята попытка рассмотрения дилеммы.

Ключевые слова: *дилемма, автомобильные энергетические установки, экологическая безопасность, автомобильные топлива, эффективность эксплуатационных материалов, ресурсосбережение.*

Обеспечение эффективности и экологической безопасности автомобильных энергетических установок напрямую связано с качественными процессами, протекающими в камере сгорания. Получение экономически оправданных результатов эксплуатации в современных условиях возможно лишь в виде дилеммы: путем применения в системе энергообразования альтернативных источников и (или) улучшения свойств традиционных моторных топлив [1]. Система энергообразования характеризуется термодинамическими и рабочими процессами тепловыделения и тепловых потерь, в основе которых находятся химмотологические процессы превращения топлива, определяющие эксплуатационные свойства [2,3]. Качество распределения смеси в значительной мере определяется поверхностным натяжением капель топлива. Уменьшение силы такого натяжения способствует более тонкому распылению топлива [4].

Традиционная методика – совершенствование конструкции – не оказывает влияния на уже выпущенный ряд автомобилей. Согласно данным исследования структуры российского автопарка, проведенного аналитическим агентством «АВТОСТАТ» [5], по состоянию на январь 2015 года в России насчитывалось 40,85 млн. легковых (3,73 млн. грузовых) автомобилей, возраст 33,1 % (75 %) которых старше 15 (10) лет. Для сравнения, в России средний возраст легковых автомобилей в 2015 (2011) годах составлял 12,4 (13,5) года, грузовых – 18,9 (19,2); автобусов 15,3 (14,5) года; легких коммерческих автомобилей – 13,7 (12,6) лет.

Прогностические данные Института энергетических исследований (ИНЭИ) РАН показывают за период с 2010 по 2040 гг. резкий рост спроса в мире и России на возобновляемые источники энергии, в том числе на неуглеродные (альтернативные), на 92 % при росте спроса на нефть и газ в 19 и 64 % соответственно [6].

Значимой экологической проблемой всех крупных городов России является загрязнение атмосферного воздуха автомобильным транспортом, происходящее в основном на урбанизированных площадях и дорогах, доля которых, по разным оценкам ученых, немногим превышает 10 % огромной площади – 17 075,4 тыс. км^2, которую занимает Российская Федерация. Это обстоятельство связано с ростом автомобилизации (6,6 % по России в период с 2013 по 2014 гг. до 274 авт./1000 чел.) в крупнейших и крупных городах, а также низкой эффективностью очистки выбросов и сбросов загрязняющих веществ.

В атмосферу крупных городов с отработавшими газами поступают 9 веществ, определяющих 95 % суммарного ущерба окружающей среде и здоровью населения [7]: оксиды азота (44,5 %), свинец (21 %), акролеин (7,5 %), сажа (7,4 %), оксид углерода (6 %), диоксид серы (3,4 %), формальдегид (2,8 %), бенз(а)пирен (1,3 %), ацетальдегид (1,1 %).

Определенный интерес представляет работа профессора Санкт-Петербургского государственного университета Анатолия Алексеевича Остапенко [8], в которой исследовалось воздействие электрических полей высоких напряженностей на мономолекулярные углеводороды. Автор считает, что результатом воздействия переменных электрических полей является нарушение гомогенности структуры слабопроводящих жидкостей. Связывается этот эффект с инжекцией электрического заряда в двойной приэлектродный слой и возникновением объемного заряда в слабопроводящей жидкости, в результате чего в ней возникают ионы и иономолекулярные комплексы, которые могут приводить к изменению структуры жидкой слабопроводящей среды и заметно влиять на наблюдаемую в электрическом поле вязкость. Отмечено, что изменение частоты электрического поля оказывает на вязкость большее влияние, чем изменение амплитуды напряженности поля.

Один из возможных путей снижения токсичности заключается в комбинированном воздействии на углеводородные топлива магнитным, электрическим и акустическим полями. Исследованиями на кафедре автомобилей и сервиса ВГЛТУ под руководством проф. В.С. Волкова было выявлено, что в результате применения устройства для одновременного воздействия на легкое углеводородное топливо (бензин) магнитным, электрическим, акустическим полями (в эксперименте использовалась лабораторная одноцилиндровая установка) при работе двигателя на холостом ходу выбросы NO_x снизились на 43%, CH – на 43%, CO^2 – на 9%, CO – на 37% относительно работы двигателя без устройства. При работе под нагрузкой 20% от максимальной выбросы CO снизились на 14%. При нагрузке 40% – на 21%. При нагрузке 60% – на 42%. При работе под нагрузкой 20% от максимальной выбросы NO_x после обработки снизились на 10%. При нагрузке 40% – на 16%. При нагрузке 60% – на 14%. При работе под нагрузкой 20% от максимальной выбросы CO_2 после обработки снизились на 2,9%. При нагрузке 40% – на 6,8%. При нагрузке 60% – на 9%. При работе под нагрузкой 20% от максимальной выбросы CH после обработки снизились на 24%. При нагрузке 40% – на 22%. При нагрузке 60% – на 20%.

Противовесом данной работе являются исследования профессора Ковровской технологической академии Юрия Анатольевича Микипориса [4], показывающие, что существующие способы электризации топлива сложны, их реализация требует значительного изменения конструкции двигателя и можно воздействовать на топливо лишь на небольшом участке системы (например, внутри топливного шланга). Кроме того, напряженность создаваемого ими электрополя значительно уступает естественной электростатической напряженности, получаемой при трибоэлектризации.

Бензин является неполярным диэлектриком с диэлектрической проницаемостью равной 2,3. В его молекулах центры положительных зарядов ядер и отрицательных зарядов электронных облаков совпадают. В работе Виктора Григорьевича Мурамовича [6] предполагается, что под воздействием переменного электрического поля декан ($C_{10}H_{22}$), входящий во все углеводородные топлива, дает продукты состава C_5H_{10} и C_6H_{14}, которые в дальнейшем подвергаются деструкции, продуктами которой являются этилен (C_2H_4) и пропилен (C_3H_6). Компонент бензина изооктан (C_8H_{18}) под действием переменного электрического поля может дать этилен и ацетилен (C_2H_2) – газообразные продукты, обладающие большей теплотой сгорания, чем исходное вещество. Под воздействием электрического поля в бензине уменьшаются концентрации насыщенных и ароматических углеводородов. В углеводородных молекулах энергия межатомных связей C – C составляет 3,6 электрон вольта, а C – H от 4 до 4,5 электрон вольт. Значит, под воздействием переменного электрического поля с достаточной амплитудной напряженностью, углеводородные молекулы могут не только делиться на более мелкие, но и подвергаться более глубокой деструкции. В результате такой деструкции от углеводородных молекул может отрываться атомарный водород, что уменьшает коэффициент поверхностного натяжения, температура воспламенения смеси и увеличивает теплоту сгорания.

Таким образом, дилемма не исключает целесообразности проведения дальнейших исследований по оценке эффективности и экологической безопасности на других типах энергетических установок и альтернативных видах топлив.

Список литературы

1. *Новиков А.И., Дорохин С.В., Новикова Т.П., Каширских А.Г.* К вопросу развития системы энергообразования двигателей внутреннего сгорания // Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования : в 2 т.: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф., Воронеж, 20-21 марта 2014 г. / под общ. ред. А.И. Новикова ; ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2014. – Т. 1. – С. 272-274.

2. *Сафиуллин Р.Н.* Теоретические основы эффективности энергопреобразования в ДВС и методы ее повышения : монография. СПбГАСУ, 2011.

3. *Гащук П.Н.* Энергетическая эффективность автомобиля. Львов : Свит, 1992. 208 с.

4. *Баженов Ю.В., Микипорис Ю.А.* Экологические проблемы эксплуатации автотранспорта // Транспорт Российской Федерации. 2006. № 5. С. 91. Режим доступа: http://rostransport.com/transportrf/pdf/5/91.pdf

5. Средний возраст легковых автомобилей в России – 12,4 года // Автостат: аналитическое агентство. URL: http://www.autostat.ru/news/view/21125/ (дата обращения: 27.09.15).

6. *Новиков А.И.* Перспективы развития альтернативных источников энергии, способных обеспечить экологическую безопасность и ресурсосбережение в автотранспортном комплексе // Изв. ТулГУ. Технич. науки. – 2015. – Вып. 5. – Ч. 1. – С. 189-194.

7. *Волков В.С., Новиков А.И., Колупаев М.В., Чалик В.А.* О снижении токсичности отработавших газов автомобильного транспорта // Актуальные научные вопросы и современные образовательные технологии: сб. науч. тр. по материалам Междунар. научно-практ. конф. 28 июня 2013 г.; М-во образования и науки РФ. – Тамбов: ТРОО «Бизнес-наука», 2013. – Ч. 7.– С. 34-35.

8. *Ostapenko A.A.* Influence of an electric field on the dynamic viscosity of liquid dielectrics // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. 1998. Т. 43. № 1. С. 35-38.

9. *Мурамович В.Г.* Теоретико-методические основы молекулярной модификации углеводородного топлива для транспортных средств электрическими полями: автореф. дисс. … д-ра техн. наук : 05.22.01. Санкт-Петербург, 2013. 230 с.

05.13.01

[1]А.Ю. Панов, [2]М.С. Трофимова

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт промышленных технологий машиностроения,
[1]кафедра Теоретическая и прикладная механика, Нижний Новгород, fam@nntu.nnov.ru
[2]кафедра Машиностроительные технологические комплексы,
Нижний Новгород, maya47@yandex.ru

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ ВНЕДРЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ «ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА»

В работе рассмотрена проблема отечественных автомобилестроительных предприятий, возникающая при совершенствовании своей системы менеджмента качества (СМК) в соответствии с международными стандартами; представлены этапы методики эффективного управления проектом внедрения процедуры APQP.

Ключевые слова: *автомобилестроение, перспективное планирование качества продукции, оценка рисков, информационный поток, DFD-диаграмма.*

Введение

Руководство отечественных автомобилестроительных предприятий предпринимает попытки проведения нововведений в области улучшения системы менеджмента качества (СМК) в соответствии с международными стандартами. Однако довольно часто такие попытки терпят неудачу по причине отсутствия методики эффективного управления проектами по развитию СМК.

В условиях жесткой конкуренции среди отечественных и зарубежных поставщиков автокомпонентов особую важность приобретает умение грамотно управлять проектами по развитию СМК. Кроме того, нововведения в области улучшения СМК в большой степени сопряжены с рисками, которые необходимо научиться минимизировать.

Прежде всего речь идет о следующих видах рисков [1]:

— технические;
— временные;
— экономические (финансовые).

Этапы методики эффективного управления проектом внедрения процедуры APQP

Разработаем методику эффективного управления проектом внедрения процедуры «Перспективное планирование качества производства» (APQP) в соответствии со стандартами ISO/TS 16949:2009 [2] и ГОСТ Р 51814.6-2005 [3]. В качестве инструмента управления предприятием используем проект - контроллинг.

Основной задачей проект - контроллинга является грамотное отслеживание этапов реализации проекта, контроль и информационная поддержка процесса управления проектом.

Предлагаются следующие этапы методики:

1. Составление плана реализации проекта;
2. Проведение анализа информационных потоков;
3. Оценка рисков;
4. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем принятия решений в условиях риска;
5. Моделирование информационной системы контроллинга процедуры APQP, анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

В статье рассмотрим подробно выполнение двух первых этапов предложенной методики.

1. Составление плана реализации проекта

В плане необходимо указать следующие параметры проекта: мероприятия, сроки, мощности (людские и материальные ресурсы и планируемые затраты). Так как процедура

APQP состоит из пяти этапов, в нашем случае будет пять функций. Разработанный бланк плана реализации проекта представлен в Таблице 1.

Таблица 1 - Бланк плана реализации проекта «Внедрение процедуры APQP»

Функции	Параметры проекта			
	Мероприятия	Сроки	Мощности	Затраты
1 Планирование				
2 Проектирование и разработка а/к				
3 Проектирование и разработка процессов				
4 Окончательная подготовка производства а/к				
5 Производство и действия по улучшению				

2. Проведение анализа информационных потоков

2.1.1 Анализ всех доступных источников информации

Все доступные APQP-команде источники информации, необходимые для более полного понимания и формулирования потребностей/пожеланий потребителя, следует проанализировать и представить в виде таблицы. Она позволит визуально определить весь перечень данных, необходимых для успешного перспективного планирования качества продукции, быстро выявить, какой из типов данных еще не получен и в какой из категорий информации его следует искать.

2.1.2 Анализ планируемых потоков информации в процессе выполнения APQP

Анализ информационных потоков помогает APQP – команде понять механизм работы предприятия. Изучая информационные связи и информационные потоки служба контроллинга рассматривает вопросы как возникает, перемещается и обрабатывается информация, а также направления и интенсивность документооборота на предприятии [4].

В настоящее время больше популярно использование графиков, изображающих не статические связи между отделами, а поток документов, связанный с выполнением какой-то определенной рабочей задачи [4].

Для построения графиков, отражающих информационные потоки данных, широко применяются методологии Гейна-Сарсона и Йодана/Де Марко [5].

Проведем анализ информационных потоков, возникающих при внедрении процедуры APQP. Всю информацию разделим на «Процессы», «Потоки данных», «Внешние сущности» и «Хранилища данных» и оформим в виде таблицы, фрагмент которой представим в Таблице 2.

Таблица 2 - Элементы процедуры APQP

1	**2**	**3**	**4**
Процессы	**Потоки данных**	**Внешние сущности**	**Хранилища данных**
1.1 Анализ общей информации	2.0 Общая информация или «голос потребителя»	3.1 Потребитель	4.1 БД проектов
1.2 Определение целевого потребителя	2.01 Бизнес-план потребителя	3.2 Служба маркетинга	4.2 БД потребителя
	2.001 Потребности/ пожелания потребителя		
1.3 Анализ бизнес-плана потребителя	2.02 Данные об опорных показателях продукции/ процессов	3.3 Служба проектировани я	4.3 БД главного конструктора

2.1.3 Построение DFD - диаграмм потоков данных

Построим DFD - диаграммы потоков данных. Они являются графическими иерархическими спецификациями, описывающими систему с позиций потоков данных [5].

Для сложных систем, имеющих большое количество внешних сущностей, строится иерархия контекстных диаграмм [6].

Используем нотацию Гейна-Сарсона для построения диаграмм, отражающих взаимосвязь элементов Таблицы 2. Построим общую схему процесса APQP (рис.1).

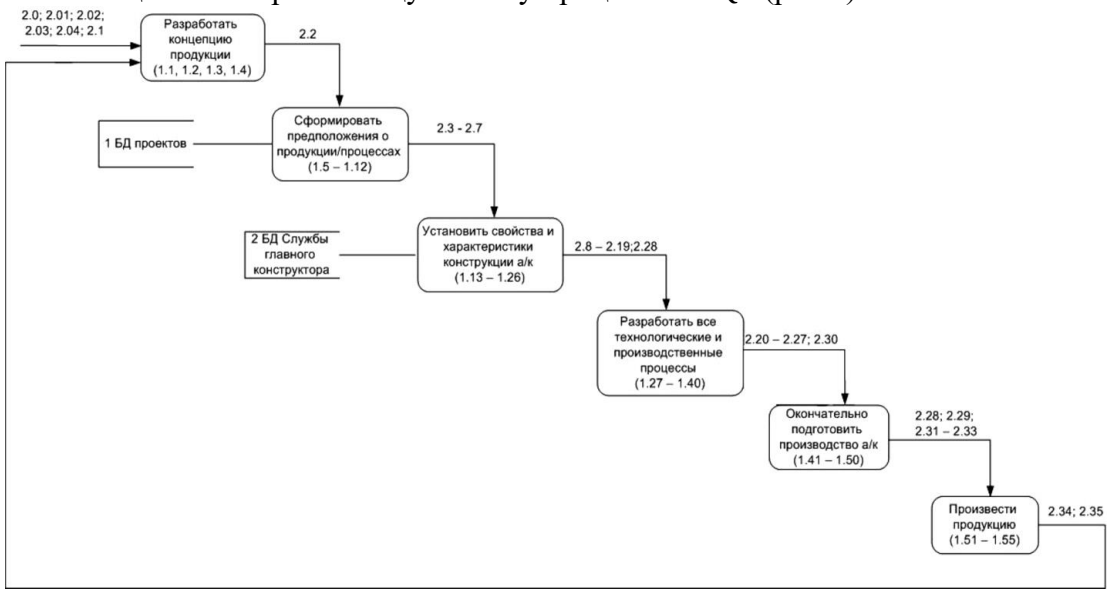


Рис.1 - Общая схема процесса APQP

Построенная схема визуально показывает, как объединены между собой основные элементы процедуры APQP и как направлены потоки информации. Для полного анализа потоков данных необходимо провести декомпозицию общей схемы (рис. 1). В данной статье представлена схема декомпозиции на примере процесса «Разработка концепции продукции» (рис. 2).

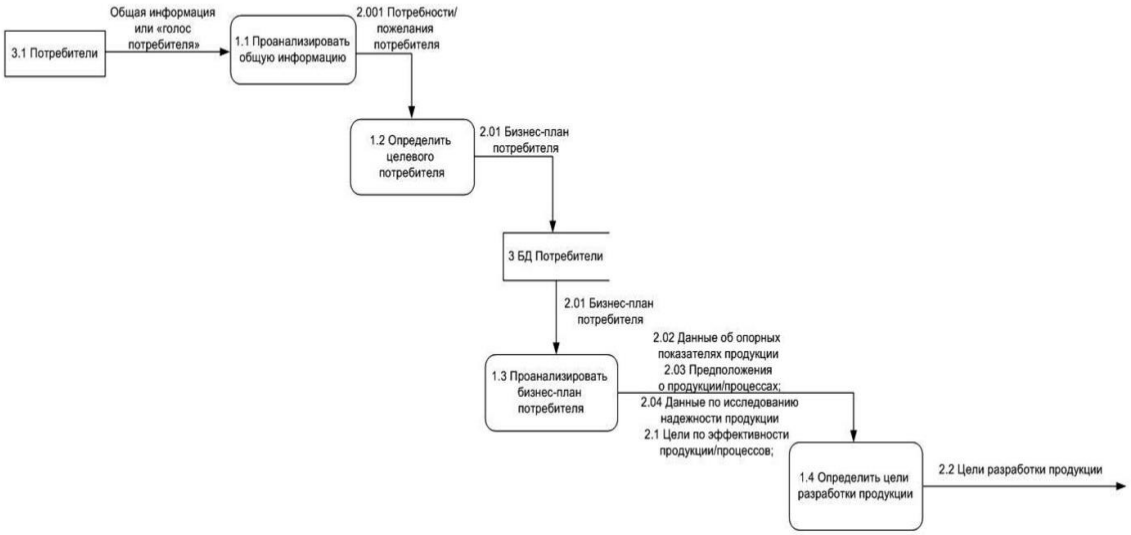


Рис.2 – Схема процесса «Разработка концепции продукции»

Построенная схема наглядно показывает из каких четырех этапов состоит процесс разработки концепции продукции и как общая информация или «голос потребителя» при прохождении этих этапов преобразуется в цели разработки продукции.

Заключение

Таким образом, в статье сформирован бланк плана реализации проекта «Внедрение процедуры APQP», позволяющий выделить функции и параметры проекта. Построена DFD - диаграмма потоков данных и приведен пример ее декомпозиции. Полученные диаграммы позволяют визуализировать взаимосвязь информационных потоков, что помогает APQP – команде соблюдать правильную последовательность выполнения этапов процедуры APQP и достигать поставленных целей.

Список литературы

1. *Ананькина, Е.А.* Конроллинг как инструмент управления предприятием/ Е.А. Ананькина, С.В. Данилочкин, Н.Г. Данилочкина. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. – 280 с.
2. ГОСТ Р ИСО/ТУ 16949-2009 Система менеджмента качества. Особые требования по применению ИСО 9001:2008 в автомобильной промышленности и организациях, производящих соответствующие запасные части.
3. ГОСТ Р 51814.6 – 2005 – «Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Менеджмент качества при планировании, разработке и подготовке производства автомобильных компонентов».
4. *Теплякова, Т.Ю.* Контроллинг : учебное пособие / Т. Ю. Теплякова. - 142 с.□– Ульяновск: УлГТУ, 2010.
5. *Калянов, Г.Н.* Консалтинг при автоматизации предприятий (подходы, методы, средства) // М.: СИНТЕГ, 1997, -316с.
6. *Горбаченко, В.И.* Проектирование информационных систем с CA ERwin Modeling Suite 7.3: учебное пособие / В. И. Горбаченко, Г. Ф. Убиенных, Г. В. Бобрышева – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – 154 с.

05.09.01

С.А. Панфилов д.т.н., О.В. Кабанов, М.А. Бобров, А.С. Хрёмкин

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева»,
кафедра теоретической и общей электротехники, кафедра электроники и наноэлектроники.
Саранск, panphilovsa@gmail.com, jhostmc@mail.ru, bobrovma92@mail.ru,
hremkinandrei@rambler.ru

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ

В данной статье проводится обзор современных методов определения теплофизических свойств (ТФС) материалов, и строительных объектов. Приводится классификация существующих методов. Предложен алгоритм для исследования ТФС объектов.

Ключевые слова: *алгоритм, теплопроводность, энергоэффективность, метод.*

Одной из актуальных проблем в повышении энергоэффективности является применение простых и надёжных способов определения потерь теплоты через ограждающие конструкции объекта в окружающую среду и анализ теплофизических свойств (ТФС), которые влияют существенным образом на тепловой режим. Уменьшение потерь теплоты объектом в окружающую среду существенно отражается на его энергоэффективности. Чтобы решить проблему уменьшения теплопотерь ограждающей конструкции объекта, необходимо знать его ТФС. Известно, что с течением времени свойства материалов подвержены изменениям. Точная информация о теплопотерях позволяет с большей достоверностью определить нужную мощность системы теплоснабжения, что, в свою очередь существенным образом оказывает влияние на энергосбережение объекта. Для определения ТФС ограждения основным источником информации является эксперимент. Методы, используемые для определения ТФС объектов и (или) материалов делят на три основных вида: нестационарный, стационарный и комплексный. Методы нестационарного определения ТФС материалов являются наиболее перспективными, за счёт простоты, небольшого времени проведения эксперимента и т.д. [1,4,5,6,7,10,15,16]. Стационарный способ основывается на законе Фурье [10,11,12,16]. При использовании этого метода каждому исследуемому образцу должна быть придана форма в виде пластины, полой трубы в виде цилиндра, в которых воспроизводится одномерное температурное поле. Методика монотонного режима используется при изучении свойств материалов в диапазоне температур от - 50 °С до + 80 °С, а в интервале температур сопоставимых с комнатной используют метод регулярного режима 1 рода. Нестационарные способы являются перспективными, а нестационарные при установлении теплопроводности в отличие от стационарных используют меньшее время и меньше тепловой энергии. Основные недостатки: сложные уравнения для расчёта ТФС, сложность определения взаимосоответствия реальных граничных условий при исследование с теоретическими условиями. Более достоверную информацию о ТФС анализируемого вещества в результате одного эксперимента позволяют получить комплексные методы. Кроме того экспериментальные способы применяемые при исследовании ТФС материалов, подразделяют на абсолютные и относительные. Самые перспективные способы изучения теплопроводности – абсолютные. Для анализа ТФС материала так же применяют способы температурных волн. Большое количество методов с применением температурных волн подчиняется закону косинусов. ТМНК (температурные методы неразрушающего контроля) из вышеперечисленных занимают ведущее место при изучение ТФС веществ. Согласно [2,6,8,9,13,14,15,17,19] МНК имеют широкий функционал возможностей, высокую результативность, действительность и эффективность. Вышеперечисленные методики и используемые в них средства измерений (СИ) подразделяются на группы. К первой группе относятся контактные способы и СИ, ко второй бесконтактные способы и СИ. В контактном способе в отличие от бесконтактного применяется прямой контакт СИ с поверхностью

исследуемого участка образца подвергаемого анализу. Для этого применяют погружаемые и не погружаемые термодатчики [3,6,8,9,13]. Способы теплового неразрушающего контроля основываются на мгновенном и (или) импульсном воздействии тепла на анализируемый материал. ТМНК хорошо представлены в [2,6,8,9,13,14,15,17,18,19] они имеют широкие функциональные возможности. На исследуемую поверхность материала размещают импульсный тепловой источник, а на установленном расстоянии от источника рабочие концы термопар. Далее в источник тепла поступает тепловой импульс с установленной мощностью, затем определяется такой промежуток времени, при котором устанавливается заданное значение. Как только заданное значение достигнуто, записывается мощность источника тепла и определяется температура в определённой точке. Данный способ определяет ТФС материала без нарушения его структуры. Установление теплопроводности анализируемых материалов так же можно производить и бесконтактным методом [2,18,19]. Для установления ТФС свойств исследуемого объекта его поверхность подвергается нагреванию непрерывным тепловым потоком от передвижного источника теплоты. Вслед за движущимся источником теплоты с одной и той же скоростью передвигаются несколько термоприёмников служащих для регистрации показаний температуры с нагреваемой поверхности. При использование данного способа возникают потери тепла в окружающую среду. Данные способы так же применяются в методах регулярного режима, в квазистационарных и стационарных тепловых режимах [7], и методе температурных волн. Вышеописанные способы определения ТФС исследуемых материалов в большинстве случаев требуют воспроизведения специальных условий для проведения эксперимента, размещения в толще исследуемого материала специальных датчиков и т. д. Поэтому для получения высокой энергоэффективности в объектах промышленного, гражданского и коммерческого использования целесообразно разрабатывать инновационные методы для установления теплофизических свойств ограждений различного рода сооружений. Из-за продолжительного периода эксплуатации нарушения целостности ограждающих конструкций, изменения свойств конструктивных слоёв возникают трудности при определении ТФС. Большинство рассмотренных выше методов имеют ряд существенных ограничений, к которым можно отнести: невозможность исследования теплофизических свойств материалов без нарушения целостности исследуемой конструкции, высокая энергоёмкость проводимого исследования, необходимость наличия эталонного образца, создание специальных условий, большие потери тепла и, вследствие этого, большие погрешности результатов. Основываясь на проведённом анализе был разработан алгоритм для энергоэффективного исследования ТФС объекта рис. 1. Управление работай алгоритма осуществляется микропроцессором.

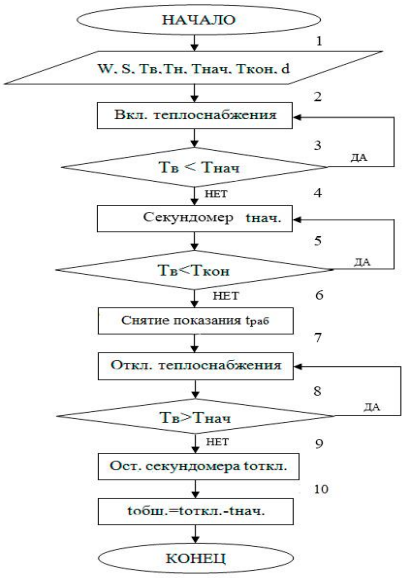


Рис. 1 - Алгоритм для определения ТФС объекта

На рис.1 представлена блок-схема алгоритма определения ТФС объекта. В блоке 1 определяются значения и коэффициенты, требующие для дальнейшего расчета, а именно мощность источника теплоснабжения W, площадь исследуемого объекта S, внутренняя и наружная температуры Тв и Тн, начальная и конечная температуры Тнач и Ткон внутри объекта, усреднённая толщина материала исследуемого объекта d. В 2 производится подача теплоснабжения. Затем в 3 происходит проверка условия: «внутренняя температура больше начальной », при выполнении условия, продолжается подача тепла, если условие не выполняется, управление передается последующему блоку 4, и производится запись временного интервала. В блоке 5 производится проверка условия: «внутренняя температура меньше конечной », при его выполнении происходит возврат в 4 блок, если условие не выполняется, в блок 6, где осуществляется показание времени работы. В блоке 8 производится проверка условия: «внутренняя температура больше начальной», при не выполнении, происходит завершение регистрации времени в 9 блоке. В 10 блоке происходит подсчёт времени работы с момента включения источника тепла и до остывания помещения до Тнач.

После завершения работы алгоритма по полученным данным производится расчёт ТФС исследуемого объекта.

1 Рассчитывается количество теплоты Q, затраченное на разогрев объекта от Тнач до Ткон:

$$Q = W \cdot t_{раб};$$

где W- фиксированная мощность системы теплоснабжения;

Тнач - начальная температура которая устанавливается индивидуально для каждого объекта в зависимости от внешних условий;

Ткон - конечная температура которая устанавливается индивидуально для каждого объекта в зависимости от внешних условий;

tраб - время потребовавшееся для нагревания объекта от Тнач до Ткон.

2 Рассчитывается термическое сопротивление исследуемого объекта:

$$\kappa = \frac{Q}{S \cdot (Тнач - Ткон) \cdot t_{общ}};$$

где κ - термическое сопротивление исследуемого объекта; S - площадь исследуемого объекта;

tобщ – время с момента включения теплоснабжения и до остывания температуры внутри объекта до Тнач.

Затем вычисляется коэффициент теплопроводности исследуемого объекта λ по следующей формуле:

$$\lambda = \kappa / d,$$

где d - усреднённая толщина ограждающей конструкции исследуемого объекта.

Достоинствами данного алгоритма являются возможность определения параметров объекта без нарушения конструкции сооружений, низкая энергоёмкость эксперимента, отсутствие зависимости от условий окружающей среды.

Список литературы

1. *Аметистов Е.В.* Основы теории теплообмена. М.:Изд. МЭИ, 2000.242 с.
2. А.с. № 1377695 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / *Т. И. Чернышева*
3. *Баталов В.С.* Одновременное определение теплофизических параметров твердофазовых веществ // ИФЖ. 1982. Т.42, № 6. С. 1026 — 1027.
4. *Белов Е.А., Соколов Г.Я., Платунов Е.С.* Цифровой экспресс-измеритель теплоограждающих конструкций с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника.1986. № 4. С. 756 - 760.
5. *Богословский В.Н.* Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования. М.: Высшая школа, 1982. - 415с.
6. *Бровкин В. Л* Частное решение уравнения теплопроводности // Изв. вузов. Энергетика. 1980. № 11. С. 120.
7. *Вавилов В.П.* Тепловые методы неразрушающего контроля: Справочник. М.: Машиностроение, 1991. 240 с.
8. *Видин Ю.В. Иванов В.В.* Расчет температурных полей в твердых телах, нагреваемых конвекцией и радиацией / Красноярск, 1965. 95 с.
9. *Дульнев Г.Н., Лукьянов Г.Н.* Аппаратура для автоматизации теплофизических исследований // ИФЖ. 1981. Т. 40, №4. С. 717.
10. *Кулаков М.В., Макаров Б. И.* Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979. 96 с.
11. *Курепин В.В., Козин В. М., Левочкин Ю. В.* Приборы для теплофизических измерений с прямым отсчетом // Промышленная теплотехника. 1982. Т. 4, №3. С. 91.
12. *Курепин В.В., Шатунов Е.С., Белов Е.А.* Энтальпийный термозонд для неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов // Промышленная теплотехника. 1982. № 4. С. 78.
13. *Мак Адаме В.Х.* Теплопередача. М.: Металлургия, 1961. 686 с.
14. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под редакцией *А.В. Лыкова.* М.: Энергия, 1973. 336 с.
15. *Рудзит Я.А., Путалов В. Н.* Основы точности и надежность в приборостроении. М.: Машиностроение, 1991. 302 с.
16. СНиП II - 3 -79* Строительная теплофизика. М.: Стройиздат,1996.
17. *Табунщиков Ю.А., Хромец Д. Ю.* Тепловая защита ограждающих - конструкций зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1986. .
18. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник / Под общ. ред. *В.А. Григорьева и В.М. Зорина.* М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.
19. Теплотехнический справочник. Т. 2. / Под общей ред. *В. И. Юренева* и *П. Д. Лебедева.* М.: Энергия, 1975. 896 с.

05.07.05

П.В. Писарев, В.Я. Модорский

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего профессионального образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (ПНИПУ) Пермь, pisarev85@live.ru, modorsky@pstu.ru.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЕРЕПУСКНОГО КАНАЛА И ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ВЫХОДНЫХ СЕЧЕНИЙ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ

В рамках данной работы проводиться исследование влияния длины перепускного канала и отношения площадей выходных сечений на колебательные процессы в двухступенчатом центробежном насосе. Выявлено, что длина соединительного канала влияет на угол сдвига фаз φ, а изменение площади выходного сечения первой ступени влияет на амплитуду колебательных процессов.

Ключевые слова: *двухступенчатый центробежный насос, перепускной канал, колебательные процессы, угол сдвига фаз.*

Проблема по снижению интенсивности колебательных процессов существует во многих отраслях в частности, в топливных системах питания космических летательных аппаратах, в системах отопления и горячего водоснабжения, в пищевой, химической промышленности, при перекачке нефти и нефтепродуктов. В частности известно, что возникновение пульсаций давления в свободных объемах улитки первой и второй ступеней центробежных насосов ТНА ЖРД может негативно влиять на динамику тяги двигателя и приводить к непрогнозируемым динамическим эффектам.

Рассматриваемая в работе модель двухступенчатого центробежного насоса [1,2] позволяет учитывать характерные особенности колебательной системы "вход - свободный объем насоса первой ступени - крыльчатка первой ступени - соединительный канал - крыльчатка второй ступени - свободный объем насоса второй ступени - выход". При этом учитываются скорость вращения, неравномерность потока на входе и выходе из соединительного канала.

Для удобства регистрации пульсаций давлений, в расчетную модель были помещены математические датчики. Все "датчики" располагаются на оси симметрии модели[1,2].

На первом этапе исследования, проводилась оценка влияния расхода через выход первой ступени на колебательные процессы в двухступенчатом центробежном насосе. Изменение расхода в насосе достигается за счет изменения площади выходного сечения первой ступени в модельном двухступенчатом центробежном насосе. Согласно плану вычислительного эксперимента, варьировалось отношение площадей $\Delta S = S_2/S_1$ и (где S_1 – площадь основного входа в первую ступень, S_2 – площадь выходного сечения из первой ступени в соединительный канал) 0,0524, 0,3215 5, 1,5072.

На рисунке 1 показан график зависимости амплитуды колебаний давления ΔP от номера контрольных точек в соединительном канале $N_{тз}$ при различных отношениях площадей ΔS. Максимальные амплитуды колебаний наблюдаются при ΔS = 0,3 по всей длине расчетной модели. Минимальные амплитуды колебаний наблюдаются при ΔS = 1,5.

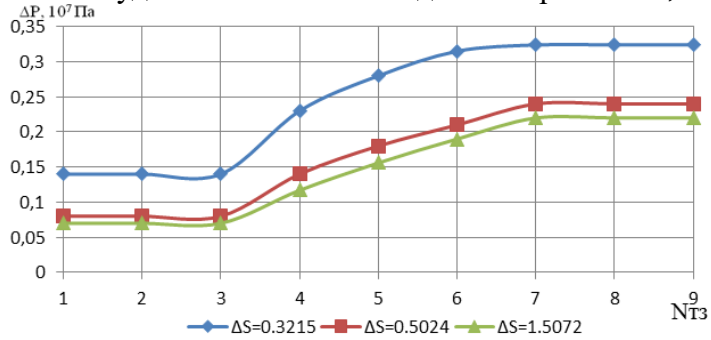


Рисунок 1. – График зависимости ΔP от Nтз при различных $\Delta S_{вых}$`.

Анализ графика зависимости изменения амплитуды колебания от номера контрольной точки и площади выходного сечения, представленного на рисунке 2, показал что:

1) Амплитуда колебаний усиливается в 2,31 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при $\Delta S = 0{,}3215$.

2) Амплитуда колебаний усиливается в 3 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при $\Delta S = 0{,}0524$.

3) Амплитуда колебаний усиливается в 3,14 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при $\Delta S = 1{,}5072$.

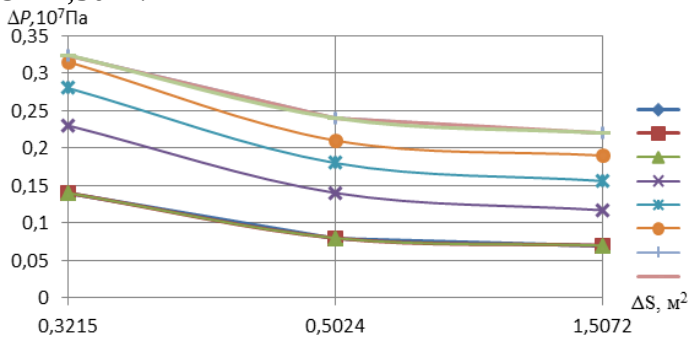


Рисунок 2 – График зависимости ΔP от ΔS при различных точках.

Таким образом, можно сделать вывод, что при уменьшении площади выходного сечения первой ступени происходит увеличение амплитуды колебаний давления, а также снижение интенсивности пульсаций давления при движении жидкости в сторону второй ступени и наоборот. При увеличении площади выходного сечения первой ступени происходит незначительное усиление амплитуды колебаний давления, а также повышение интенсивности пульсаций давления при движении жидкости в сторону второй ступени.

На втором этапе исследования, проводился анализ зависимости амплитуды колебаний давлений, от значений длины соединительного канала. Длина принималась 220 мм, 330 мм и 440 мм. Численные эксперименты проводились для угла сдвига фаз $\varphi = \pi$.

На рисунке 3 приводится график зависимости ΔP от номера точки замера Nтз при различных длинах соединительного канала. Максимальные амплитуды колебаний наблюдаются при $L = 220$ мм вблизи улитки второй ступени. При $L = 330$ мм вблизи улитки второй ступени, наоборот, наблюдается ослабление колебаний по сравнению с вариантом, соответствующим $L = 440$ мм.

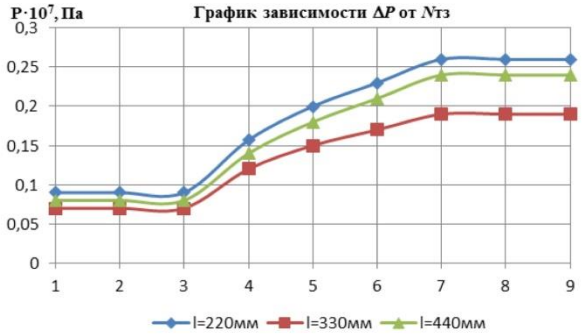


Рисунок 3 – График зависимости ΔP от Nтз при различной длине перепускного канала

Анализ графика зависимости ΔP от Nтз при различных L показал, что при уменьшении длины канала до 220 мм происходит усиление амплитуды колебания давления, на 12% в районе первой ступени и на 8% в районе второй ступени. При уменьшении длины канала до 330 мм происходит ослабление амплитуды колебания давления на 14% в районе первой ступени и на 26% в районе второй ступени.

Рассмотрим график зависимости амплитуды колебаний давления в зависимости от номера контрольной точки и длины соединительного канала центробежного насоса рисунок 4:

1) Амплитуда колебаний усиливается в 2,89 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при $L = 220$ мм.

2) Амплитуда колебаний усиливается в 2,71 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при L = 330 мм.

3) Амплитуда колебаний усиливается в 3 раза при движении жидкости в сторону второй ступени при L = 440 мм.

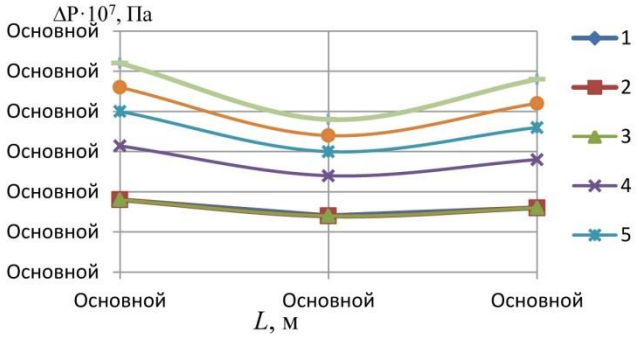


Рисунок 4 – График зависимости ΔP от L для различных Nтз.

Из графика видно что максимальное усиление наблюдается в контрольных точках 7, 8, 9, эффект ослабляется в точках 1, 2, 3. Наибольшее значение амплитуды колебания давления наблюдается в расчетном случае с длиной канала 220 мм, наименьшее при длине канала 330 мм. При дальнейшем увиличении длины канала до 440 мм, так же наблюдается рост амплитуды колебаний. Таким образом, можно сделать вывод, что длина соединительного канала влияет на угол сдвига фаз φ.

Список литературы

1. *Писарев П.В., Модорский В.Я., Щенятский Д.В., Арбузов И.А., Бульбович Р.В., Кириевский Б.Е., Ташкинов А.А.* Численное моделирование колебательных процессов в центробежном насосе // Научно-технический вестник Поволжья. –2012. – № 3. – С. 44-49.

2. *Писарев П.В., Арбузов И.А., Ташкинов А.А., Щенятский Д.В., Кириевский Б.Е., Бульбович Р.В., Модорский В.Я.* Численное моделирование колебательных процессов в соединительном канале модельного насоса // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 6. – С. 100-103.

05.07.05

П.В. Писарев, А.А. Паньков, А.Н. Аношкин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего профессионального образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (ПНИПУ) Пермь,
pisarev85@live.ru, a_a_pankov@mail.ru, anoshkin@pstu.ru

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРИ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ.

В рамках данной работы проводиться исследование влияния объема цилиндрического резонатора Гельмгольца на величину собственной частоты резонатора и значения коэффициента потери акустического давления в модельном канале. Проводиться анализ распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала.

Ключевые слова: *звукопоглощающие конструкции, резонатор Гельмгольца, коэффициент потери акустического давления, метод конечных элементов, численный анализ.*

В настоящее время, в связи с высокими требованиями, предъявляемыми Международной организацией гражданской авиации. А так же ужесточением норм на шум, излучаемого авиационными двигателями. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых, современных методов по снижению шума. Наиболее перспективным путем решения данной задачи является использование резонансных звукопоглощающих конструкций (ЗПК), в основном устанавливаемые в канале воздухозаборника и внешнем контуре двигателя. Для выбора более эффективной конструкции ЗПК, возникает необходимость в исследовании свойств отдельно взятого резонатора (ячейки). Поэтому проведение численных экспериментов по расчету звукопоглощающих свойств ячеек ЗПК является актуальной задачей.

В рамках данной работы осуществляется расчет величины демпфирующего эффекта производимого цилиндрическими ячейками, которые представляют собой резонатор Гельмгольца с различным объемом, в диапазоне рабочих частот 100-600 Гц.

Для проведения вычислительных экспериментов были построены геометрические модели, базовая модель представляет собой канал конечной длины - 1 (рисунок 1), квадратного сечения по центру на одной из продольных граней расположена ячейка - 2 цилиндрической формы, соединенная с каналом "узким" горлом - 3 цилиндрической формы. Остальные модели отличаются от базовой объемом резонатора, который изменялся за счет его высоты. В расчетах значение высоты варьировалось в интервале 100÷200мм с шагом 25 мм.

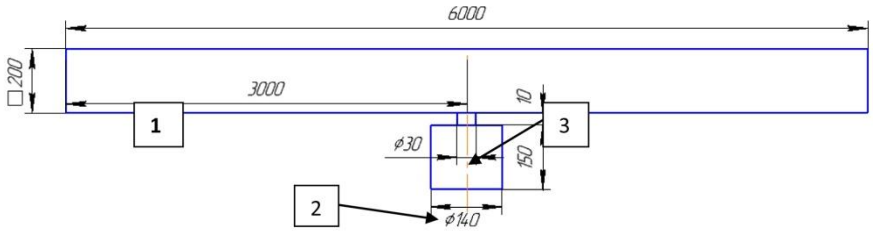


Рисунок 1. Геометрические характеристики базовой модели.

Сеточная модель: структура расчетной сетки принималась следующая. Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов применялась расчетная сетка, ячейки которой имеют форму, близкую к форме равностороннего тетраэдра [1]. Максимальный размер элемента определялся как N_{max} =343[m/s]/6[kHz]/10=0,0057 м., минимальный размер элемента принимался N_{min}= 0,001 м, общее количество элементов составило 17 млн. элементов. Помимо прочего при измельчении сетки избегались резкие отличия размеров соседних ячеек – линейные размеры соседних ячеек не отличаются более, чем в 2 раза (рисунок 2).

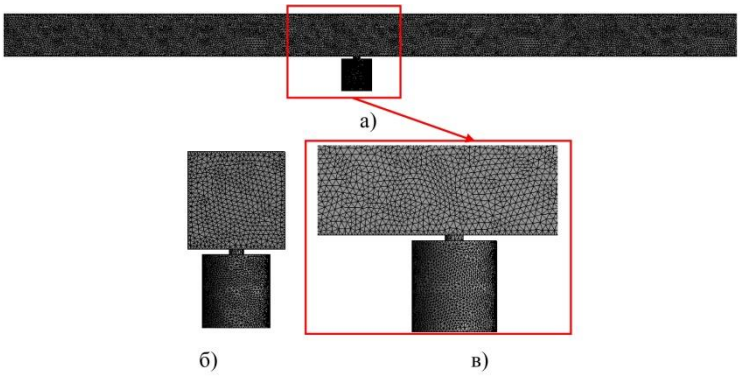


Рисунок 2. Сеточная модель а - вид спереди, б - вид сбоку, в - спереди увеличено.

Проведения численных экспериментов по определению акустических характеристик резонатора осуществляется посредством решения уравнения Гельмгольца:

$$-\nabla \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0}\right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} P = 0, \text{ где } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

Волна на входе в модельный канал: задавалась в виде гармонической волны давления с амплитудой p_0=10000Па. $n \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0}\right) = \frac{i\,\omega}{\rho_0 c} P - \frac{2\,i\,\omega}{\rho_0 c} P_0$ (2)

Волна на выходе описывалась как:

$$n \cdot \left(\frac{\nabla P}{\rho_0}\right) = \frac{i\,\omega}{\rho_0 c} P_0 \quad (3)$$

Жесткая стенка модельного канала описывалась как:

$$n \cdot \left(\frac{\nabla P_0}{\rho_0}\right) = 0 \quad (4)$$

Коэффициент потери акустического давления на выходе из модельного канала определялся как:

$$TL = 10\log\left(\frac{P_{in}}{P_{out}}\right); \quad (5)$$

Где: $P_{in} = \int_{\partial\Omega} \frac{p_0^2}{2pc_s} dA$; $P_{out} = \int_{\partial\Omega} \frac{|p_c^2|}{2pc_s} dA$ (6)

По результатам вычислительных экспериментов были получены зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты На рисунке 3 представлена данная зависимость для базовой модели М.

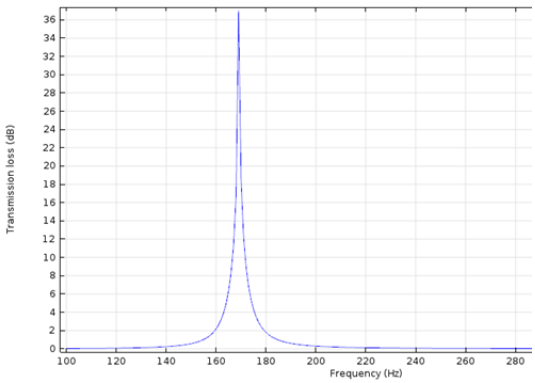


Рисунок 3. Зависимость коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты ν для базовой модели.

Анализ зависимости показал, что резонансной частотой для данного резонатора является частота ν=169Гц, значение коэффициента потери акустического давления (TL) составило 36 децибел.

Рассмотрим поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала. Как видно из рисунка после сжатия внутреннего объёма воздуха, заключённого в ячейке, давлением основной звуковой волны через отверстие в ячейке и преобразовании потенциальной энергии сжатия в кинетическую энергию воздуха в горле ячейки в поперечном каналу направлении в резонансе с колебаниями частиц воздуха основной звуковой волны в канале.

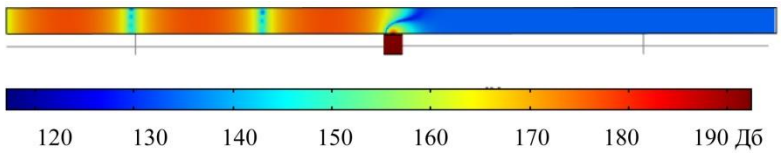


Рисунок 3. Поле распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала.

Далее происходит взаимодействие волны сгенерированной резонатором с основной звуковой волны в канале, с образованием четкой границы наклоненной в сторону распространения основной волны. В результате взаимодействия происходит падение акустического давления основной волны, наблюдается на протяжении всего участка после резонатора.

На рисунке 4 представлены поля распределения акустического давления районе резонатора для значения высоты 100, 150, 200 мм. Из рисунков видно, что максимальный фронт взаимодействия основной и сгенерированной звуковой волны наблюдается при высоте резонатора 150 мм.

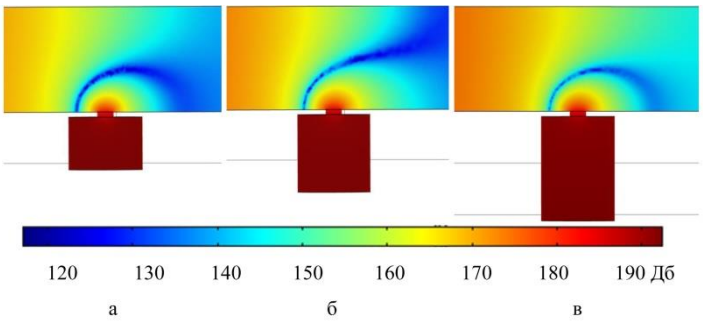
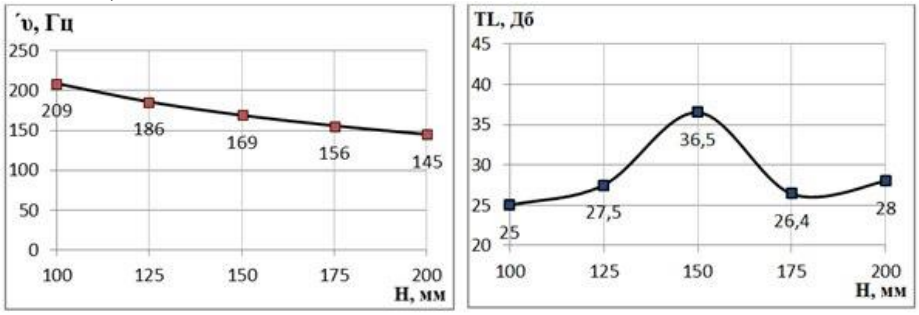


Рисунок 4. Поле распределения акустического давления район резонатора при значении высоты резонатора: а-100мм; б-150мм; в-200мм.

По результатам вычислительных экспериментов были построены зависимости собственной частоты резонатора и коэффициента потери акустического давления от его высоты (рисунок 5 а, б).



а) б)

Рисунок 5. График зависимости высоты цилиндрического резонатра от: а-собственной частоты; б- коэффициента потери акустического давления.

Анализ зависимостей выявил, что при увеличении объема резонатора происходит не линейное снижение собственной частоты резонатора, максимальное значение коэффициента потери акустического давления наблюдается при увеличении высоты до 150 мм, при этом значении наблюдается пик, далее происходит снижение. Кроме того анализ полученных результатов показал, что изменение объема резонатора не влияет на широкополосность.

Минобрнауки России по проекту № 1969 «Акустико-механическое моделирование перспективных звукопоглощающих контуров из полимерных композиционных материалов для авиационных двигателей».

Список литературы

1. *Писарев П.В., Арбузов И.А., Ташкинов А.А., Щенятский Д.В., Кириевский Б.Е., Бульбович Р.В., Модорский В.Я.* Численное моделирование колебательных процессов в соединительном канале модельного насоса // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012.–№6.–С.100-103.

05.23.07

А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова

Поволжский государственный технологический университет,
Институт строительства и архитектуры, кафедра строительных конструкций и водоснабжения, Йошкар-Ола, PozdeevAG@volgatech.net

РАЗМЫВ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ

На основании обобщения теории ламинарной осесимметричной струи на случай турбулентного движения получены зависимости для продольной и радиальной скоростей потока. Приведена MathCAD-программа расчета параметров размыва в нижнем бьефе за водосливной плотиной при переходе турбулентного потока от защищенной части флютбета к незакрепленному размываемому руслу.

Ключевые слова: *гидротехническое сооружение, турбулентный поток, размыв, сопряжение бьефов, донный грунт, воронка размыва, MathCad.*

Работа направлена на разработку автоматизированной методики расчета деформации русла при сопряжении бьефов водосбросного сооружения.

Использован новый феноменологический подход к установлению зависимости между скоростью потока, его динамическим воздействием на донный грунт и глубиной воронки размыва.

Рассмотрим обобщение теории плоской ламинарной струи на случай турбулентного движения. Впервые расчет турбулентной плоской струи был выполнен В. Толмином [1] на основе формулы Прандтля для турбулентного напряжения $\tau = \rho l_p^2 \left|\frac{\partial u}{\partial y}\right| \frac{\partial u}{\partial y}$, где ρ – плотность жидкости; $\frac{\partial u}{\partial y}$ – градиент скорости; l_p – длина пути перемешивания.

Ниже приведено решение, полученное Г. Райхардтом и Г. Гёртлером в изложении Л. Прандтля [1].

Используя дифференциальное уравнение количества движения пограничного слоя плоской затопленной струи, получим $u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial \tau}{\partial y}$ или с учетом определения турбулентного напряжения $u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = \varepsilon\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$.

К этому уравнению следует присоединить уравнение неразрывности. Кажущаяся кинематическая вязкость равна $\varepsilon = \kappa b U$, где U – скорость на оси струи. Обозначив через U_l скорость на оси струи на расстоянии l от начального сечения, а через b_l – ширину струи в этом сечении, получим $U = U_l\left(\frac{x}{l}\right)^{-1/2}$, $b = b_l\frac{x}{l}$.

Следовательно, $\varepsilon = \varepsilon_l\left(\frac{x}{l}\right)^{1/2}$, где $\varepsilon_l = \kappa b_l U_l$.

Введем переменную $\eta = \sigma\frac{y}{x}$, где σ – свободная постоянная. Определим функцию тока ψ в виде $\psi = \sigma^{-1}U_l l^{1/2}x^{1/2}F(\eta)$.

В таком случае $u = U_l\left(\frac{x}{l}\right)^{-1/2}F'$, $v = \sigma^{-1}U_l l^{1/2}x^{-1/2}\left(\eta F' - \frac{1}{2}F\right)$.

В результате для определения функции $F(\eta)$ получим дифференциальное уравнение $\frac{1}{2}F'^2+\frac{1}{2}FF''+\frac{\varepsilon_l}{U_l l}\sigma^2 F'''=0$, с граничными условиями $F=0$ и $F'=1$ при $\eta=0$ и $F'=0$ при $\eta=\infty$.

В выражении для ε_l содержится постоянная κ, поэтому $\sigma=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{U_l l}{\varepsilon_l}}$.

После подстановок в полученное выше дифференциальное уравнение и двойного интегрирования получим $F^2+F'=1$.

Это уравнение, совпадающее с уравнением плоской ламинарной струи, имеет решение $F=th\eta$, поэтому продольная составляющая скорости равна $u=U_s\left(\frac{x}{s}\right)^{-1/2}(1-th^2\eta)$.

Характерную скорость U_l можно выразить через постоянный импульс, отнесенный в единице длины струи, $J=\rho\int_{-\infty}^{+\infty}u^2dy=\frac{4}{3}\rho U_l^2\frac{l}{\sigma}$.

Введя кинематический импульс $J/\rho=K$, получим решение

$$\left.\begin{aligned} u&=\frac{\sqrt{3}}{2}\sqrt{\frac{K\sigma}{x}}(1-th^2\eta),\\ v&=\frac{\sqrt{3}}{4}\sqrt{\frac{K}{x\sigma}}\left[2\eta(1-th^2\eta)-th\eta\right],\\ \eta&=\sigma\frac{y}{x}. \end{aligned}\right\}$$

Для постоянной σ измерения Г. Райхардта [1] дали значение $\sigma=7{,}67$.

Пусть расстояние от источника по оси до некоторого сечения $x=l$, а радиус $y=r$.

В качестве исходных данных при расчете в среде MathCad приняты: плотность воды $\rho:=1000$ кг/м^3; высота начального сечения струи $h_0:=0.599$ м; скорость истечения в начальном сечении $u_0:=7.78$ м/с; длина ядра струи по Г.Н. Абрамовичу $l_0:=4.8\cdot h_0$, $l_0=2.875$ м; расчетная длина струи от начального сечения $l_p:=10$ м; интервал итераций $\varepsilon:=0.001$ м; расстояние от начального сечения $l:=l_0,l_0+\varepsilon..l_p$ м; коэффициент скорости по А.Я. Миловичу $\phi:=5.934$; ускорение свободного падения $g:=9.81$ м/с^2; сцепление частиц грунта по Цытовичу $C:=12000$ Н/м^2; коэффициент влияния структуры грунта $K:=0.035$; коэффициент условий работы агрегатов на растяжение и изгиб $m:=1.6$; коэффициент перегрузки $n:=4$; диаметр отрывающихся частиц при стабилизации размыва $d_k:=0.00052$ м; расчетная плотность частицы $p_f:=3.15\cdot10^3$ кг/м^3; угол наклона струи к поверхности дна $\alpha:=8$ град; бытовая глубина на недеформированном дне $h_b:=26.7$ м; коэффициент влияния диаметра частиц на глубину размыва $k_d:=0.2$; константа турбулентного переноса $\sigma:=7.67$.

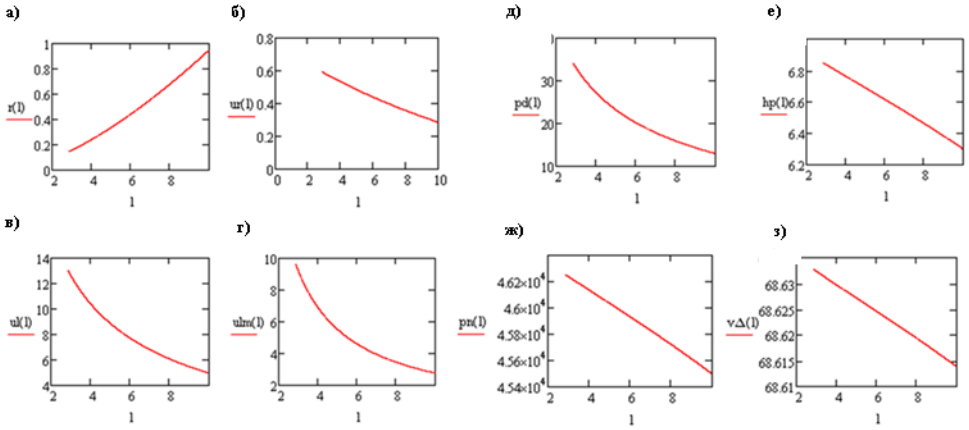


Рис. 1 – Результаты расчета параметров потока и размыва в MathCad

По результатам расчета получены характеристики потока (рис. 1, а-г):

- секундный импульс в начальном сечении $J_0 := \rho \cdot \pi \cdot h_0 \cdot u_0^2$, $J_0 = 1.139 \cdot 10^5$ кг·м/с^2;
- кинематический импульс струи, $K := J_0 / \rho$;
- кинематический коэффициент турбулентной вязкости $\varepsilon_\tau := \sigma^2 \cdot K$, $\varepsilon_\tau = 6.701 \cdot 10^3$ м/с^2;
- текущий радиус струи $r(l) := 0.03 \cdot l^{1.5}$ (рис. 1, а), м;
- масштабная переменная $\eta(l) := \sigma \cdot \frac{r(l)}{l}$;
- радиальная скорость $u_r(l) := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{\frac{K}{\sigma \cdot l}} \cdot \left[2 \cdot \eta(l) \cdot \left(1 - \tanh(\eta(l))^2\right) - \tanh(\eta(l))\right]$ (рис. 1, б), м/с;
- скорость по оси струи $u_l(l) := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot \sigma}{l}} \cdot \left(1 - \tanh(\eta(l))^2\right)$ (рис. 1, в), м/с;
- скорость на оси струи по формуле А.Я. Миловича $u_{lm}(l) := \phi \cdot \frac{u_0 \cdot h_0}{l}$ (рис. 1, г), м/с.

Результаты расчета параметров размыва (рис. 1, д-ж):

- нормативная прочность на разрыв $C_{ny} := K \cdot C$, $C_{ny} = 1.367 \cdot 10^6$ Н/м^2;
- объемный вес воды $\gamma := \rho \cdot g$, $\gamma = 9.81 \cdot 10^3$ Н/м^3;
- объемный вес частиц грунта $\gamma_f := \rho_f \cdot g$, $\gamma_f = 3.09 \cdot 10^4$ Н/м^3;
- давление струи на дно $p_d(l) := \frac{0.0188 \cdot \gamma \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180}\right)}{g} \cdot u_l(l)$ (рис. 1, д), Па;
- кинематическое условие размыва $v_\Delta(l) := u_l(l)$, м/с;
- глубина воронки размыва $h_p(l) := k_d \cdot \left(\frac{8.3 \cdot u_0 \cdot h_0}{v_\Delta(l)} - 7.5 \cdot h_0\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180}\right)}{1 - 0.175 \cdot \cot\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180}\right)} + 0.25 \cdot h_b$

(рис. 1, е), м;

- гидростатическое давление в воронке размыва $p_n(l) := \gamma \cdot \left(h_b + h_p(l)\right) \cdot \tan\left(\frac{\pi \cdot \alpha}{180}\right)$ (рис. 2, ж), Па;
- допускаемые донные скорости в воронке размыва $v_\Delta(l) := \sqrt{\frac{2g \cdot m}{0.3 \cdot \gamma \cdot n} \cdot \left[\left(\gamma_f - \gamma\right) d_k + 1.25 \cdot \left(C_{ny} + p_d(l) + p_n(l)\right)\right]}$ (рис. 1, з), м/с.

На основе обобщения теории ламинарной плоской струи на случай турбулентного движения получены кинематические параметры потока.

Получено решение дифференциального уравнения пограничного слоя в соответствии с рекомендациями Г. Шлихтинга [1].

Расчеты продольной и радиальной скоростей плоской струи и характеристик размыва донного грунта, выполненные в MathCad, показали высокую сходимость с данными методики Ц. Е. Мирцхулавы [2, 3].

Список литературы

1. *Шлихтинг, Г.* Теория пограничного слоя/ Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – 712 с.
2. *Мирцхулава, Ц.Е.* Размыв русел и методика оценки их устойчивости/ Ц.Е. Мирцхулава. – М.: Колос, 1967. – 178 с.
3. *Кузнецова, Ю.А.* Средства инженерно-экологической защиты нижних бьефов гидроузлов: монография/ Ю.А. Кузнецова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2014. – 260 с.

05.02.08

М.В. Пономарёв

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
институт промышленных технологий машиностроения,
кафедра технологии и оборудования машиностроения,
Нижний Новгород, maxx.ponomarev@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГРАНИЧНОЙ МОДЕЛИ ИЗ ОБМЕННОГО ФАЙЛА STEP. ПОИСК СМЕЖНЫХ ГРАНЕЙ

В работе представлены результаты изучения возможности и разработанные механизмы автоматизированного анализа геометрических данных граничной модели из обменного файла STEP. Описан разработанный программный модуль «STEP Analyzer» и принцип действия реализованных в нём алгоритмов поиска смежных граней.

Ключевые слова: *STEP файл, автоматизированный анализ геометрических данных, граничная модель, программный модуль «STEP Analyzer», поиск смежных граней.*

1 Введение

Автоматизация технологической подготовки производства — это один из важнейших шагов на пути повышения производительности машиностроительных производств.

Данная статья подготовлена в рамках исследования, целью которого является автоматизированное создание технологического процесса механической обработки на основе трехмерной модели изделия.

В работе [1] дано описание метода, который послужил основой данного исследования. Его практическая реализация основана на автоматизированном извлечении и последующем анализе информации о трехмерной модели изделия, сохраненной в обменном формате STEP.

Файл STEP обладает рядом важных преимуществ, необходимых для реализации поставленной задачи. Подробнее об особенностях формата STEP, а также языка STEP/Express, на котором реализована структура описания данных в формате, можно прочитать в работах [2] и [3], а также в стандартах серии ГОСТ Р ИСО 10303.

В основе геометрического описания изделия в формате STEP лежит так называемая расширенная граничная модель. Базовым элементом этой модели является расширенная грань. Подробное описание этих понятий дается в стандартах ГОСТ Р ИСО 10303-514-2007 [4] и ГОСТ Р ИСО 10303-511-2006 [5].

Разработанный программный модуль «STEP Analyzer» реализует большой список алгоритмов анализа исходных данных, позволяющих получить информацию об ориентации поверхностей, выпуклости или вогнутости ребер, углах связей между гранями. Также позволяет определить степень совмещенности граней и выявить ряд распространенных неосновных поверхностей.

Подробное описание в этой статье дано для алгоритмов поиска смежных граней. Прочие алгоритмы анализа, реализованные в модуле «STEP Analyzer», будут рассмотрены в последующих статьях.

2 Автоматизированный анализ геометрических данных

Автоматизированный анализ геометрических данных основан на программной обработке того набора геометрической информации о трехмерной граничной модели изделия, извлеченного из файла STEP с помощью разработанного автором программного модуля «STEP Extractor». Принцип работы этого программного модуля описан в работе [3].

2.1 Поиск пар смежных граней

Представление формы расширенной граничной моделью предполагает, что каждая грань изделия соединяется с каждой из смежных с ней граней только по одному общему ребру. На этом принципе основано действие алгоритма поиска смежных граней.

На рисунке 1 приведен фрагмент исходного кода программного модуля «STEP Analyzer» на языке Python, а именно алгоритм поиска пар смежных граней для каждой линии ребра. В целях удобства восприятия из фрагмента удалены служебные комментарии, некоторые идентификаторы и операторы.

```
1  for curve_key in curves:
2      adjacent_faces = []
3      searched_list = []
4      for surf_key in surfaces:
5        if surf_key not in searched_list:
6          for edge in surfaces[surf_key][3]:
7            if edges[edge][1] == curve_key:
8              adjacent_faces.append(surf_key)
9              searched_list.append(surf_key)
10     curves[curve_key].append([adjacent_faces)
```

Рис.1 — Алгоритм определения пар смежных граней в программном модуле «STEP Analyzer»

Алгоритм представляет из себя цикл перебора «for», который в качестве параметров принимает последовательность данных и на каждой итерации возвращает следующий по порядку элемент этой последовательности. Цикл завершается, когда все элементы последовательности будут обработаны. Все строки, смещенные вправо от цикла «for», включая другие циклы «for», команды и условные операторы «if-else», называются телом цикла и выполняются на каждой его итерации. Работа алгоритма начинается с того, что в качестве исходной последовательности принимается список линий ребер («curves»). При каждой итерации цикла «for» на первой строке алгоритм возвращает из списка линий ребер очередной номер линии и сохраняет его в служебную переменную «curve_key». Затем создаются два пустых списка. Первый, «adjacent_faces», будет сохранять номера найденных смежных граней для текущей линии ребра, второй, «searched_list», — номера граней, просмотренных на текущей итерации. Далее, на четвертой строке, запускается под-цикл «for» для перебора списка граней («surfaces»). Алгоритм будет выполнять этот под-цикл, пока не переберет все грани из списка «surfaces». На каждой итерации этого цикла номер текущей грани сохраняется в переменную «surf_key». Затем алгоритм проверяет, отсутствует ли этот номер в списке просмотренных. Если отсутствует, то запускается под-под-цикл, перебирающий ориентированные ребра из списка, хранящегося в записи каждой грани под индексом 3. Внутри этого цикла каждое ориентированное ребро из списка ребер грани проверяется на предмет совпадения номера базовой линии ребра, на которую оно ссылается (индекс 1 в записи ориентированного ребра), с номером текущей линии ребра «curve_key». Совпадение означает, что в списке ребер текущей грани под-цикла на строке 4 найдено ориентированное ребро, ссылающееся на текущую линию ребра цикла на строке 1, а, следовательно, эта грань – первая из пары смежных граней. Её номер записывается в список «adjacent_faces» смежных граней и в список «searched_list» просмотренных граней.

Цикл на строке 6 прекращает работу, после чего цикл на строке 4 совершает следующую итерацию, принимая в качестве текущей следующую по порядку грань из списка «surfaces». Когда все грани из базы будут просмотрены у текущей линии ребра в списке «adjacent_faces» будут храниться два номер смежных граней. Эти номера записываются на строчке 10 в базу данных линий ребер «curves». Цикл поиска смежных граней повторяется для следующей лини ребра из базы.

2.2 Поиск смежных граней для каждой грани

Определив пары смежных граней на предыдущем этапе, можно перейти к решению задачи нахождения списка смежных граней для каждой из граней трехмерной модели.

Алгоритм, решающий эту задачу, представлен на рисунке 2. Это фрагмент исходного кода программного модуля «STEP Analyzer», и, как и в предыдущем случае, имеет ряд сокращений и изменений для удобства восприятия. Цикл поиска также основан на переборе

базы данных линий ребер («curves»). На каждой итерации в переменную «cur_key» сохраняется номер текущей линии ребер.

```
1  for cur_key in curves:
2      sur_1 = curves[cur_key][13][0]
3      sur_2 = curves[cur_key][13][1]
4      surfaces[sur_1][11].append(sur_2)
5      surfaces[sur_2][11].append(sur_1)
```

Рис.2 – Алгоритм поиска списка смежных граней в программном модуле «STEP Analyzer»

Далее создаются две переменные: «sur_1» и «sur_2», в которые сохраняются номера первой и второй смежной грани из списка смежных граней линии ребра соответственно. После чего в базу данных граней «surfaces» для первой грани в ячейку со списком смежных граней добавляется значение из переменной «sur_2, а из переменной «sur_1» в ячейку второй грани. Таким образом грани обмениваются информацией друг о друге, сохраняя в своих записях номера соседей. После перебора всех линий ребер в базе данных граней для каждой записи сформируется список смежных граней.

3 Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что обменный файл STEP может хранить достаточно данных об изделии и имеет строгую, логическую структуру, позволяющую эффективно извлекать и анализировать информацию в автоматическом режиме с целью дальнейшего использования в процессе разработки алгоритма автоматизированного технологического проектирования процессов механической обработки.

Список литературы

1. Автоматизированное создание структуры технологического процесса: монография / И.Н. Фролова [и др.]; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 183 с.

2. *Пономарёв, М.В.* Использование файлов формата STEP в процессе автоматизированного технологического проектирования. Особенности, проблемы, реализация / М.В. Пономарёв // Научно-технический вестник Поволжья. – 2015. – № 1. – С. 127-131.

3. *Крайнов, В.В.* Анализ формата передачи данных STEP / В. В. Крайнов, М. В. Пономарёв, И. Н. Фролова // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. № 5 (102). – 377 с.

4. ГОСТ Р ИСО 10303-514–2007 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 514. Прикладные интерпретированные конструкции. Расширенное граничное представление [Текст]. – Введ. с 20.03.2007. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 23 с.

5. ГОСТ Р ИСО 10303-511–2006 Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 511. Прикладные интерпретированные конструкции. Топологически ограниченная поверхность [Текст]. – Введ. с 27.12.2006. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 24 с.

05.23.02

А.П. Приходько

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, строительный факультет, Новочеркасск, artem.prikhodko@yahoo.com

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ГРУНТОАРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ФОТОМЕТРИИ

В работе рассмотрены вопросы применения грунтоармированных конструкций для усиления оснований. Дано описание экспериментальных исследований разработанного автором нового конструктивного решения грунтоармированного сооружения с применением метода фотометрии.

Ключевые слова: *грунтоармированная конструкций; армоленты; армированный массив; программа на ЭВМ; интерфейс; экспериментальные исследования; аппроксимация; линии тренда; эмпирические зависимости, метод фотометрии.*

В современном строительстве в качестве оснований зданий и подпорных сооружений находят широкое применение технические решения грунтоармированных конструкций. Целью работы автора является разработка технических решений и инженерного метода расчета армированного грунтового основания и проведения экспериментальных исследований с применением композитных материалов.

Автором разработано новое техническое решение грунтоармированного сооружения с лицевой стенкой из отдельных лицевых элементов и технология его возведения [1]. Для внедрения в практику строительства новых грунтоармированных конструкций требуется обоснование их расчетных положений и технологии возведения.

Рассмотрены различные способы определения устойчивости грунтоармированного массива, такие как метод сил Кулона, теория Ренкина, условия Ф. Шлоссера и А. Видаля. На основании этого автором составлен алгоритм, который формализован в программе расчета подбора оптимальных параметров грунтоармированного массива с прямолинейными и наклонными армолентами.

Новизна усовершенствованного авторами программного комплекса на ЭВМ заключается в учете параметров как горизонтальных, так и наклонных армолент. Программа выполняет расчет оптимального угла наклонной армоленты β с учетом технологии возведения, а общая удерживающая сила трения рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{уд} = T_1 + T_2 \ . \quad (1)$$

Если считать, что сила трения, удерживающая армоленту в массиве грунта, определяется по формуле:

$$T_f = 2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h \cdot b \cdot l, \quad (2)$$

то получаем:

$$T_{уд} = 2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h \cdot b_1 \cdot l_1 + 2 \cdot f \cdot \gamma \cdot h \cdot b_2 \cdot l_2 \cdot tg\beta, \quad (3)$$

где f - коэффициент трения между грунтом и материалом ленты; b – ширина армолент; l – длина армирующих лент, м; γ – удельный вес заполнителя, кН/м^3; h – высота слоя армирования, м; β – угол наклонной армоленты, отложенный от вертикали лицевой стенки вниз до армоленты, град [2,3].

Для выполнения экспериментальных исследований были проведено 15 серий предварительных испытаний, выполненных на стенде плоской деформации согласно схеме, приведенной на рисунке 1, позволяющих определить оптимальные параметры элементов лицевой стенки и зоны армирования. Для регистрации перемещений грунтоармированной подпорной стенки модели грунтовой насыпи используются стандартные индикаторы часового типа ИЧ – 10, а также фотометрия.

Заполнителем в лотке служит среднезернистый воздушно-сухой песок с известными характеристиками, с помощью которого моделируется песчаная грунтовая насыпь грунтоармированного основания.

В отличие от проводившихся ранее исследований армированного грунта, в данной работе рассматривается конструкция лицевой стенки из единичных лицевых элементов с разными параметрами армирования по высоте, длине и углу наклона с учетом патента №2444589 [1,4]. На модели в плане передавались статические распределенная и сосредоточенная нагрузки одинарным штампом в пределах 8 – 250 кПа, которые в ряде опытов увеличивались до разрушения модели или до её недопустимых деформаций.

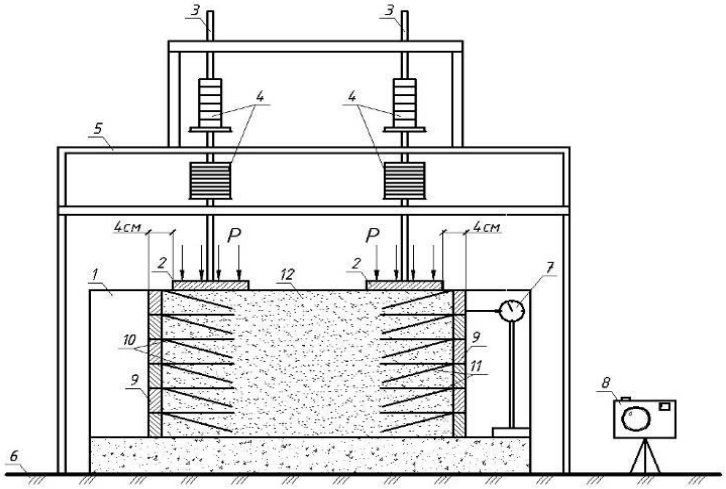


Рис. 1 - Экспериментальная схема проведения испытаний двойных и наклонных лент; 1 – лоток; 2 – штамп; 3 – шток нагружения; 4 – грузы; 5 – силовая рама; 6 – фрезеровочный стол; 7 - индикатор часового типа; 8 – фотоаппаратура; 9 - лицевая стенка с открылками; 10 – прямолинейные армоленты; 11 - наклонные армоленты; 12 – засыпка

В качестве армирующего материала в предварительных опытах использовали кальку толщиной t = 0,03 мм, ширина армолент b = 10 мм. Такой материал был выбран в связи с желанием автора получить картину распределения усилий внутри образца судя по местам обрыва «арматуры», в дальнейшем, на стадии основных испытаний, был применен материал ТК-80р. Высота грунтоармированных конструкции была принята с учетом высоты оснований от 1 до 3 м, а для модели H = 15см и H = 30см соответственно, т.е. $\alpha_м = \alpha_н = 10$.

На рисунке 2 представлена картина распределения усилий внутри моделей судя по местам обрыва армолент.

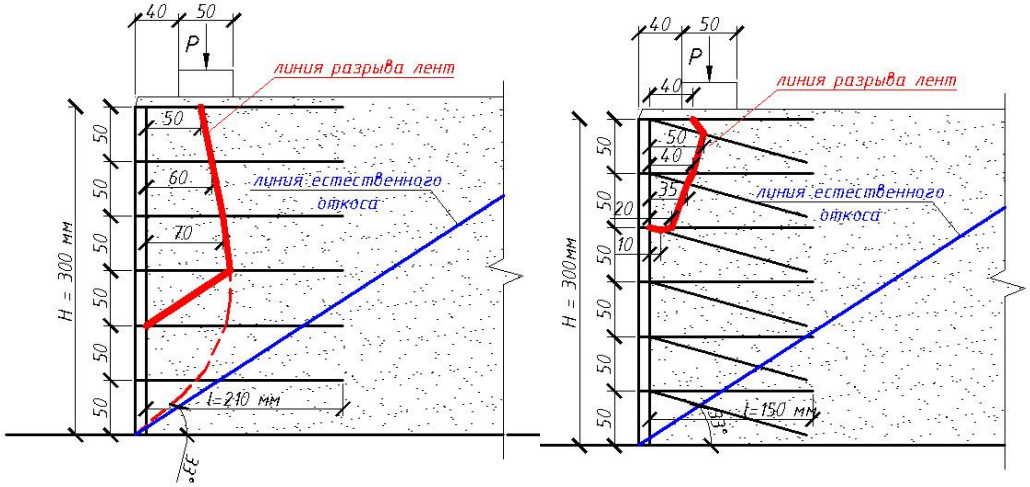


Рис. 2 - Места разрыва армолент моделей грунтоармированного подпорного сооружения с различными параметрами армирования

Для получения наиболее достоверного поведения грунтоармироанных конструкций при воздействии на них внешних нагрузок, были построены графики зависимостей - отношения

прилагаемой нагрузки к критической (максимально прилагаемой) $P/P_{кр}$ на конструкцию к величине отношения отклонения грунтоармированной конструкции к ее высоте ε/H. По полученным графикам построены линии тренда и выведены уравнения эмпирических зависимостей. Автором были определены диапазоны нагрузок при различном поведении грунтоармирвоанных конструкций, описанные графиками зависимостей относительных отклонений лицевой стенки от относительных нагрузок.

Для подтверждения полученных результатов экспериментальных исследований применен метод фотометрии. С помощью фотоаппаратуры фиксировались прогибы $\Delta\varepsilon=f(P)$ горизонтальных и наклонных армолент в грунте от прилагаемых нагрузок. По полученным снимкам были построены схемы прогибов горизонтальных и наклонных армолент, и отмечено, что верхние наклонные ленты имеют прогиб на 9 -10% больше, чем горизонтальные (рис. 3).

а б

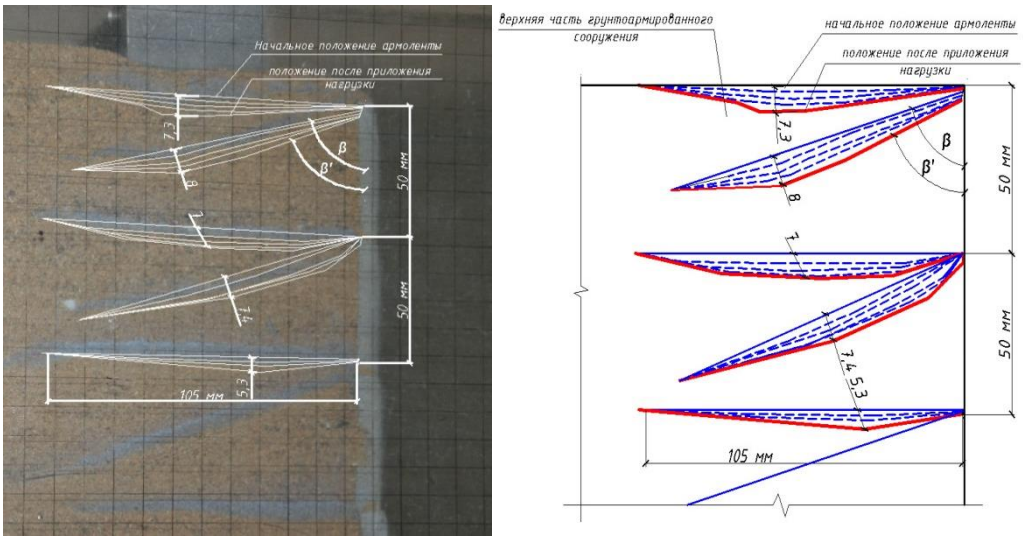


Рис. 3 - *а* - фотография зафиксированных прогибов горизонтальных и наклонных армолент, полученные с помощью метода фотометрии; б – схема зафиксированных прогибов

Проведенные исследования показали, что максимальные растягивающие напряжения в арматуре из композитных материалов при различных примененных параметрах возникают на расстоянии 1/3 высоты от верха грунтоармированной конструкции, а начало выхода из строя первых рядов не ведет к потере устойчивости и несущей способности всей конструкции в целом, т.к. происходит перераспределение усилий на нижерасположенные армоленты.

По результатам экспериментальных исследований получена наиболее достоверная картина поведения грунтоармированных конструкций при воздействии на них внешних нагрузок в диапазоне P = 8…250 кПа.

Выявлено, что наиболее приемлемы подпорные грунтоармированные конструкции оснований при высоте их H=1,5...3 м с лицевыми элементами $S=0{,}25м^2$ и открылками 0,1 м, причем применение наклонных армолент значительно увеличивает устойчивость конструкции в целом.

Список литературы

1. Патент №2444589 «Грунтоармированное сооружение и способ его возведения», заявка №2010131312, опубликована 10марта 2012г.

2. «Расчет грунтоармированного основания» свидетельство гос. регистрации программы для ЭВМ №2010616390, опубл. 24.09.2010г.

3. *Rankine, W.* On the stability of loose earth / W. Rankme II London. Phil.Trans.,1857, 125s.

4. *Приходько А.П.* Обоснование параметров элементов грунтоармированной насыпи с применением композитных (полимерных) материалов / Кашарина Т.П.; Приходько А.П., Пшеничкина В.А., Синяков В.Н., Шубин М.А.; // Вестник ВолгГАСУ. Сер. Стр-во и архит. - 2011. - № 25 (44). - С. 78-83.

05.25.05

Н.С. Сахарова

Костромской Государственный Технологический Университет,
факультет автоматизированных систем и технологий, кафедра информационных технологий и защиты информации, nina_ves@mail.ru

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУППЫ ЗАПРОСОВ К МОДЕЛИ МЕТАДАННЫХ

Рассмотрена алгебраическая система для описания модели метаданных информационной системы. Выделены группы запросов к объектам метамодели, позволяющие анализировать функционал бизнес-процессов информационной системы. Предложена совокупность предикатных формул для описания запросов на выборку компонентов бизнес-процессов информационной системы.

Ключевые слова: *метамодель информационной системы, бизнес-процесс, группы запросов.*

Важнейшей частью жизненного цикла информационно системы (ИС) является процесс ее модификации в соответствии с меняющимися условиями эксплуатации, потребностями пользователей и бизнес-процессов как при создании новой системы, так и при сопровождении существующей. Динамические предметные области требуют постоянного реинжиниринга структуры и модели данных [1, 3].

Предметная область представляет собой некоторую базу знаний (БЗ), описанную в форме конкретных фактов и правил логического вывода над базами данных (БД) и процедурами обработки информации. Одним из способов работы с БЗ является система запросов, написанная на языке предикатов первого порядка. Предметная область ИС представлена уровнем метаданных, что позволяет использовать метамодель для анализа и определения структур модели ИС, требующих модификации [1, 2, 7, 8].

Новый принцип организации структур данных метамодели, позволяющих производить более эффективную модификацию компонентов бизнес-процессов ИС рассмотрен в [4]. В результате исполнения любого бизнес-процесса информационная система осуществляет свое изменение и переходит в новое состояние. Так как бизнес-процесс рассматривается как один из основных компонентов метамодели в качестве источника данных, он же будет являться центральным элементом анализа функционала ИС [5, 6].

В основе анализа функционала бизнес-процессов ИС лежит система запросов к модели метаданных [4], а именно запросов к состоянию алгебраической системы $A = \langle \Theta, \Sigma \rangle$ с основным множеством объектов и процессов Θ и сигнатурой Σ, представляющей систему предикатов первого порядка структурирования данных [7, 8].

Введем две группы запросов к объектам метамодели, позволяющие оценить функциональные возможности бизнес-процессов ИС. Каждая группа состоит из запросов к объектам заданных типов: объекты управления, объекты контроля, объекты-показатели, объекты-справочники [4].

1-я – группа запросов о состоянии всей ИС. Результатом запроса будет множество объектов заданного типа всей ИС (группа GI).

2-я – группа запросов о состоянии определённого бизнес-процесса. Результатом запроса будет множество объектов, участвующих в заданном бизнес-процессе (группа GII).

Выделим две группы формул алгебраической системы: φ и ψ, описывающих запросы к состоянию объектов и процессов ИС.

φ − группа запросов о состоянии всей ИС.

ψ − группа запросов о состоянии отдельного БП.

Зафиксируем некоторое счетное множество объектных переменных $Var = \{x_1, x_2, x_3, ...\}$, предназначенных для обозначения элементов множеств, на которых определены предикаты.

Состоянием (оценкой) алгебраической системы назовем отображение $\sigma : Var \to \Theta$.

Введем формулу индекса *n* алгебраической системы, определяющую множество состояний структур порядка *m* алгебраической системы *A* на состоянии системы σ - $\varphi_n^m(\sigma)$. Индекс формулы задает порядок запроса к информационной системе. В таблице 1 представлены порядки формул и запросов.

Таблица 1– Порядки формул запросов и структур метамодели

Порядок Запроса(n), структуры(m)	Запрос	Структура
0	К совокупности БП	БП – бизнес-процесс
1	К совокупности ОУ	ОУ – объект управления
2	К совокупности П	П – показатель
3	К совокупности ОК	ОК – объект контроля
4	К совокупности СО	СО – справочный объект

Отображение $\sigma : Var \to \Theta$ будет возвращать набор объектных переменных множества Θ, соответствующих критериям формулы. Для описания состояния алгебраической системы, соответствующего определенному процессу, вводится группа формул с уточняющими аргументами $\psi_n^m(bp_i, \sigma)$.

Исключение: формула φ_0^0 выражает множество бизнес-процессов метамодели ИС.

Так как бизнес-процесс представлен двумя компонентами: набором ОУ и набором П, для получения информации о наличии определенного показателя или объекта управления необходимо знать набор заявленных объектов данного БП. Введем унарную операцию $\nabla(bp_i)$, возвращающую компоненты БП bp_i. В таблице 2 приведены формулы группы запросов GII.

Таблица 2– Формулы-запросы к отдельному БП

Формулы алгебраической системы	Описание запроса
$\psi_0^2(bp_i, \sigma(\varphi_0^0)) = \exists x_1 [x_2 \in \nabla(bp_i) \wedge$ $\wedge x_2 \in F \wedge x_1 \in \sigma(\varphi_0^0) \wedge x_1 = bp_i]$	Совокупность показателей процесса bp_i.
$\psi_0^1(bp_i, \sigma(\varphi_0^0)) = \exists x_1 [x_2 \in \nabla(bp_i) \wedge$ $\wedge x_2 \in OM \wedge x_1 \in \sigma(\varphi_0^0) \wedge x_1 = bp_i]$	Совокупность ОУ процесса bp_i.
$\psi_1^3(\sigma(\psi_0^1(bp_i, \sigma(\varphi_0^0)))) = \exists x_1 \exists x_2 \exists x_4 \exists x_5$ $[struct_om(x_1, x_2, x_3, x_4) \wedge x_3 \in OC \wedge$ $\wedge x_1 \in \sigma(\psi_0^1(bp_i, \sigma(\varphi_0^0))) \wedge x_5 = bp_i \wedge$ $\wedge x_5 \in \sigma(\varphi_0^0)]$	Совокупность ОК процесса bp_i.
$\psi_3^4(\sigma(\psi_1^3(\sigma(\psi_0^1(bp_i, \sigma(\varphi_0^0)))))) = \exists x_1 \exists x_2 \exists x_4 \exists x_5$ $[struct_oc(x_1, x_2, x_3, x_4) \wedge$ $\wedge x_3 \in (SD + CD) \wedge x_1 \in \sigma(\psi_1^3(\sigma(\psi_0^1(bp_i, \sigma(\varphi_0^0))))) \wedge$ $\wedge x_5 = bp_i \wedge x_5 \in \sigma(\varphi_0^0)]$	Совокупность СО процесса bp_i.

Аналогично задаются формулы группы GI: $\varphi_0^1(\sigma(\varphi_0^0))$, $\varphi_0^2(\sigma(\varphi_0^0))$, $\varphi_1^3(\sigma(\varphi_0^1(\sigma(\varphi_0^0))))$, $\varphi_1^4(\sigma(\varphi_0^1(\sigma(\varphi_0^0))))$, $\varphi_3^4(\sigma(\varphi_1^3(\sigma(\varphi_0^1(\sigma(\varphi_0^0))))))$. На рисунке 1 показан способ поиска объектов всей системы/отдельного *l*-ого процесса с использованием предикатных конструкций.

Сопровождение ИС ставит перед проектировщиком задачу об изменении процессов модели с целью получения информации нового качества. Чаще всего требуется расширить имеющийся набор сущностей или изменить их функциональные возможности. В случае многокомпонентной модели естественным решением является запрос к системе на выборку имеющихся объектов и структур изменяемого процесса [2, 3]. Запросом задается обращение к предикатам, описывающим структуры процессов/объектов, и возвращаются только те объектные переменные, которые использовались при описании структур (аргументы

истинных предикатов). Полученное множество объектов пользователь (проектировщик) может оценить на соответствие изменившимся целям и задачам управления и сделать вывод о наличии в системе объекта, позволяющего расширить функционал процесса. Если характеристики найденного объекта не удовлетворяют поставленным задачам, создается новая версия объекта. Если структуры нет среди объектов системы, принимается решение о создании нового объекта ИС и связывания его с имеющимися.

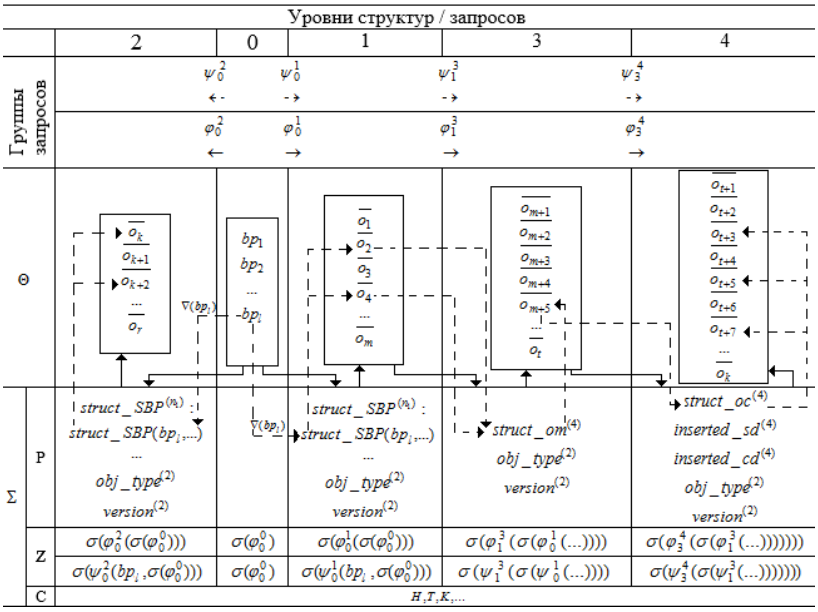


Рис 1. – Схема формул-запросов алгебраической системы
(P – множество предикатов, Z – множество формул, C – множество констант)

Выводы

Бизнес-процесс рассмотрен как основной компонент метамодели ИС в качестве источника данных, исследование которого позволяет проводить анализ функционала всей ИС. Предложены две группы запросов к объектам метамодели, позволяющие оценить функциональные возможности бизнес-процессов ИС.

Список литературы

1. *Осипова В.В., Чудинов И.Л.* Формализованный подход к проектированию концептуальной информационной модели предметной области. // Международный журнал экспериментального образования, 2012. №6. С. 106-107.
2. *Рогозов Ю.И., Свиридов А.С.* Концепция применения матадизайна и метамоделирования для разработки ИС.//Известия Южного федерального университета,2012.№1(126).С.147-152.
3. *Никольский С.Н., Сурженко И.Ф.* Автоматизация информационных систем и метамоделирование.//Известия Южного федерального университета,2014.№7(156).С.187-195.
4. *Веселова Н.С., Шведенко В.Н.* Моделирование информационных ресурсов предприятия при процессной организации системы управления. // Международный журнал «Программные продукты и системы», 2014. №4(108). С. 260-264.
5. *Шведенко В.Н.* Модели бизнес-процессов в объектно-функциональной системе управления предприятием. // Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Кострома, 2006.
6. *Fischer G. and Giaccardi E.* Meta Design: A framework for the future of end user development. End User Development: Empowering People to flexibly Employ Advanced Information and Communication Technology. H. Lieberman, F. Paterno and V. Wulf // Springer. – 2007. – № 9. – P. 427-457.
7. *Аляев Ю.А., Тюрин С.Ф.* Дискретная математика и математическая логика. // М.: Финансы и статистика, 2006. – 368 с.
8. *Долженков А., Тимофеев Д.* Семантический инструмент построения баз данных. // Открытые системы. СУБД. 2006. № 1. С. 36-41.

05.19.05

Т.А. Смирнова, Ю.С. Бутько, С.Ю. Киселев, Н.В. Княгичева

Московский государственный университет дизайна и технологии, Технологический институт легкой промышленности, кафедра художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи,
Москва, tamara-s@list.ru, bu0189@gmail.com, nplmo@rambler.ru, knyagicheva_nadia@mail.ru

АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕТИПИЧНОЙ СТОПЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ФОРМЫ ОБУВИ ДЛЯ КАТАНИЯ НА РОЛИКОВЫХ КОНЬКАХ

В работе представлены результаты антропометрических исследований, определены параметры среднетипичной стопы для обеспечения рационального, научно-обоснованного внутриобувного пространства обуви для катания на роликовых коньках для молодых женщин в возрасте от 16 до 24 лет.

Ключевые слова: *роликовые коньки, антропометрические исследования, среднетипичная стопа, колодка, повышение комфорта.*

При проектировании спортивной обуви необходимо учитывать комплекс требований и ограничений. Актуальной задачей является обеспечение рационального, научно-обоснованного внутриобувного пространства обуви для катания на роликовых коньках для молодых женщин в возрасте от 16 до 24 лет.

Кафедрой художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи МГУДТ за последние годы были выполнены антропометрические исследования стоп, соответствующих различным половозрастным группам обуви [2, 3]. Для получения новых, объективных данных о форме и размерах стоп молодых женщин были проведены антропометрические исследования девушек в возрасте от 16 до 24 лет. Исходные данные были получены в виде плантограмм и анкет, общее количество исследуемых свыше 400.

Измерения проводились в положении равномерной опоры на обе стопы. С правой стопы снимали плантограмму, визуально определяли наличие патологий и деформаций. Измерение обхватов проводилось с помощью гибкой миллиметровой ленты. Точные линейные размеры по длине и ширине определялись на плантограмме [1]. Полученные данные были обработаны методом вариационной статистики с использованием программы MS Excel. Средние значения размерных признаков приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Средние значения размерных признаков

Размерные признаки	Среднее значение, мм
Длина стопы	249,6
Обхват стопы в середине пучков	224,2
Обхват стопы по прямому взъему	227,2
Обхват стопы "пятка-сгиб"	310,3

Для определения параметров среденетипичной стопы по данным антропометрических исследований были установлены регрессионные зависимости (таблица 2), связывающие основные размерные признаки стопы с ее длиной. Также были построены графики, отражающие полученные зависимости (рис. 1).

Рис. 1 – График зависимости ширины стопы по габариту в сечении 0,68 Д от ее длины

Таблица 2 – Уравнения регрессионных зависимостей основных размерных признаков от длины стопы

Параметр стопы	Уравнение регрессии
Обхват стопы в середине пучков	y=0,48x+107,72
Обхват стопы по прямому взъёму	y=0,54x+105,17
Обхват стопы “Пятка-сгиб»	y=0,8811+91,757
Обхват голени в наиболее широком месте	y=0,6221x+193,97
Ширина по габариту в сечении 0,18Д	y=0,1799x+19,832
Ширина по отпечатку в сечении 0,18Д	y=0,1116x+18,701
Ширина по габариту в сечении 0,68Д	y=0,2131x+39,826
Ширина по отпечатку в сечении 0,68Д	y=0,1643x+35,696

По полученным уравнениям регрессии для найденного значения средней длины стопы для выбранной возрастной группы женщин нами были рассчитаны параметры средне-средней стопы, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры средне-средней стопы по основным размерным признакам

Размерные признаки	Параметры средне-средней стопы, мм
Длина стопы	249,6
Обхват стопы в середине пучков	227,5
Обхват стопы по прямому взъему	230,9
Обхват стопы "пятка-сгиб"	311,7
Ширина по габариту в сечении 0,18Д	65,0
Ширина по отпечатку в сечении 0,18Д	46,5
Ширина по габариту в сечении 0,68Д	93,0
Ширина по отпечатку в сечении 0,68Д	77,0

В ходе статистической обработки были построены экспериментальные и теоретические кривые распределения стоп по длине и основным обхватным параметрам. Как видно из графиков (рис. 2 – *а, б, в*) распределение стоп по размерным признакам близко к нормальному.

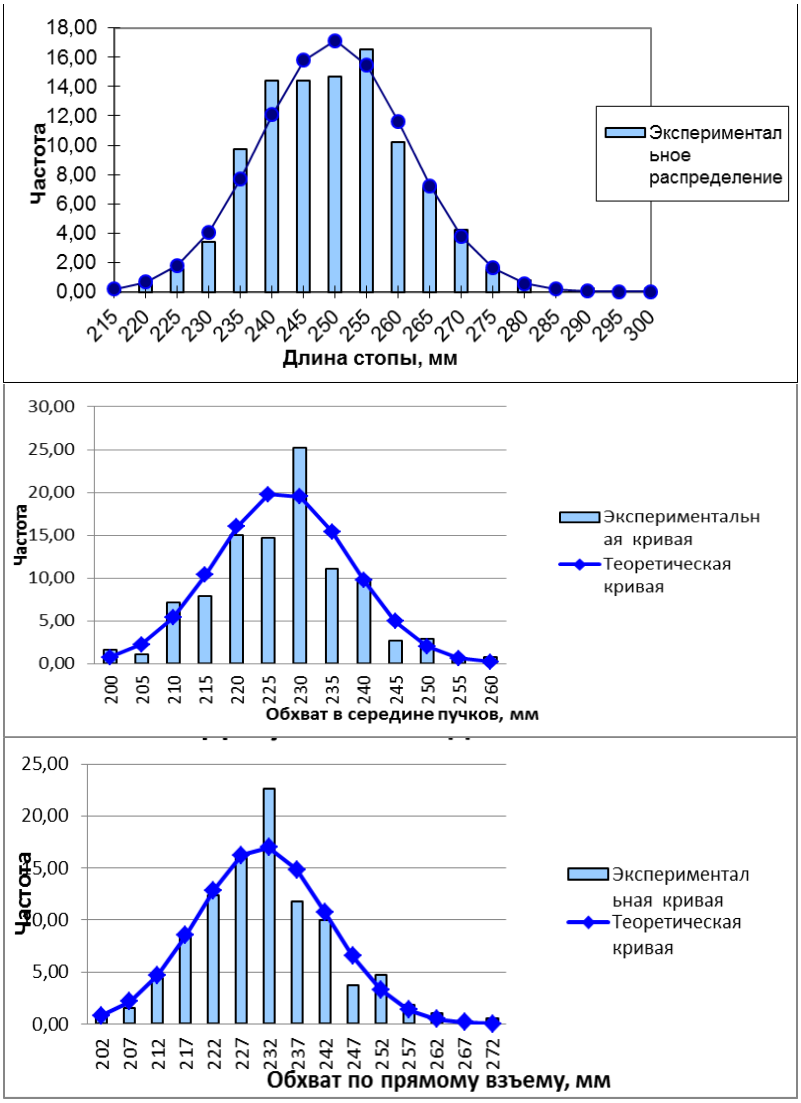


Рис. 2 – Графики распределения стоп: *а* – по длине; *б* – по обхватам в середине пучков; *в* – по обхватам по прямому взъему

На основе анализа установленного характера распределения стоп по длине для выбранной возрастной группы предложен следующий размерный ряд: 225, 230, 235, 240, 245, 250, 255, 260, 265, 270, 275.

Выполненное исследование в направлении совершенствования внутриобувного пространства ботинок для катания на роликовых коньках призвано повысить уровень комфорта, обеспечиваемый при катании, снизить риск травмирования стоп.

Список литературы

1. *Барановская И.А., Синева О.В.* Методы и средства получения антропометрической информации/– М.: ИИЦ МГУДТ, 2005.

2. *Киселева М.В., Киселев С.Ю., Фукин В.А., Черкезов В.А., Целых Д.В.* Антропометрические исследования стоп детей школьного возраста: / Кожевенно-обувная промышленность // – 2009. - №3 – с. 38 - 40.

3. *Киселева М.В., Киселев С.Ю., Фукин В.А., Черкезов В.А., Целых Д.В.* Антропометрические исследования стоп детей дошкольного возраста: / Кожевенно-обувная промышленность // – 2011. – №2 – с. 35 - 36.

4. *Смирнова Т.А., Киселев С.Ю., Бутько Ю.С.* Определение параметров среднетипичной стопы и проектирование колодки для ботинок роликовых коньков[Текст]:// сборник научных статей и воспоминаний «Памяти В.А. Фукина посвящается»/ часть 1/М.: ФГБОУ ВПО «МГУДТ» – 2014. 216с., Библиогр.: 148 – 153с.

05.11.16

В.А. Соловьев, М.Н. Морозова

Пензенский государственный университет, факультет приборостроения, информационных технологий и электроники, кафедра «Приборостроение»

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОЛОРИМЕТРА, ПОСТРОЕННОГО НА ПРИНЦИПАХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В статье рассматривается метод обучения измерительной системы интегрального колориметра, построенного на принципах искусственных нейронных сетей, используемый как на стадии проектирования, так и в процессе производства и эксплуатации прибора. Так же приведены структуры искусственной нейронной сети, используемые для определения конструктивных параметров измерительной системы прибора и для ее обучения на этапах производства и эксплуатации.

Ключевые слова: *колориметр, искусственная нейронная сеть, синаптические коэффициенты, обучение.*

Погрешность измерения координат цвета *X, Y, Z* интегральными колориметрами определяется, в основном, точностью воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов под функции сложения цветов стандартного наблюдателя.

Рассматривая идеологию построения интегральных колориметров с позиций искусственных нейронных сетей можно существенно уменьшить отклонения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов от функций сложения цветов стандартного наблюдателя.

Нейронная сеть колориметра, рисунок 1, представляет собой совокупность однослойной (измерительные каналы Y и Z) и двухслойной (измерительный канал X) сетей. Различия в структуре каналов объясняется особенностями спектральных характеристик измерительных каналов прибора. Нейроны связаны с множеством фотоприемников j=1….m, синаптическими связями $\omega_{xмj}$, $\omega_{xбj}$, ω_{yj}, ω_{zj}. Перед многоэлементными фотоприемниками установлены светофильтры с коэффициентами пропускания $T_{Xдj}(\lambda_i)$, $T_{Xij}(\lambda_i)$, $T_{Yj}(\lambda_i)$, $T_{Zj}(\lambda_i)$. В предлагаемой структуре вклад в координаты цвета X, Y, Z дает не один фотоприемник, а множество, с необходимыми величинами синаптических связей [1].

Спектральные чувствительности каждой пары светофильтр-фотоприемник отличаются друг от друга, поскольку каждый светофильтр имеет индивидуальную спектральную характеристику. При этом результирующая спектральная чувствительность каналов X, Y, Z, в который входят m-фотоприемников, будет определяться не только суммой ординат спектральных чувствительностей на соответствующих длинах волн, но и величинами синаптических коэффициентов.

Исходя из приведенной структуры связей нейроколориметра, координаты цвета будут определяться выражениями:

$$X = \omega_{x1}\left[\sum_{j=1}^{m}\omega_{X_i j}\left[\sum_{i=1}^{n}K_{X_i j}\tau(\lambda_i)\varphi_p(\lambda_i)S_{X_i j}(\lambda_i)T_{X_i j}(\lambda_i)\Delta\lambda\right]\right] + \omega_{x2}\left[\sum_{j=1}^{m}\omega_{X_д j}\left[\sum_{i=1}^{n}K_{X_д j}\tau(\lambda_i)\varphi_p(\lambda_i)S_{X_д j}(\lambda_i)T_{X_д j}(\lambda_i)\Delta\lambda\right]\right];$$

$$Y = \sum_{j=1}^{m}\omega_{Yj}\left[\sum_{i=1}^{n}K_{Yj}\tau(\lambda_i)\varphi_p(\lambda_i)S_{Yj}(\lambda_i)T_{Yj}(\lambda_i)\Delta\lambda\right]; \qquad (1)$$

$$Z = \sum_{j=1}^{m}\omega_{Zj}\left[\sum_{i=1}^{n}K_{Zj}\tau(\lambda_i)\varphi_p(\lambda_i)S_{Zj}(\lambda_i)T_{Zj}(\lambda_i)\Delta\lambda\right].$$

Как следует из соотношений (1), синаптические коэффициенты $\omega_{xмj}$, $\omega_{xбj}$, ω_{yj}, ω_{zj} дают дополнительные возможности в повышении точности воспроизведения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов X, Y, Z под функции сложения цветов стандартного наблюдателя, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации прибора.

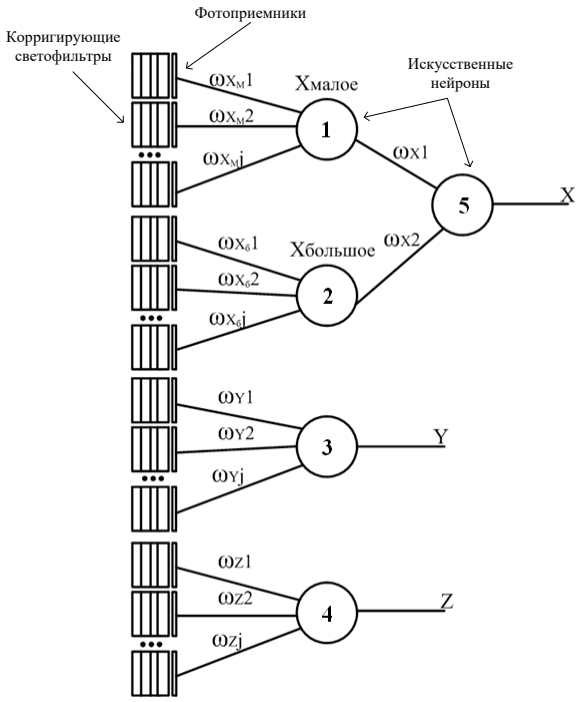


Рисунок 1 - Структурная схема нейроколориметра

Задача проектирования измерительной системы нейроколориметра является многопараметрической оптимизацией, в процессе решения которой определяют параметры корригирующих светофильтров и величины синаптических связей. Оптимизация осуществляется с использованием целевой функции и оптимизационного алгоритма [2]. Целевая функция формализует требования, предъявляемые к нейроколориметру, а оптимизационный алгоритм реализует поиск минимума целевой функции.\

$$\begin{aligned} \grave{A}_X &= \left[(A_{\tilde{O}\grave{i}\grave{a}\ddot{e}\ddot{i}\grave{a}}\,\omega_{\grave{i}} + A_{\tilde{O}\acute{a}\grave{i}\ddot{e}\ddot{u}\theta\ddot{i}\grave{a}}\,\omega_{\acute{a}}) - \varphi(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)\right]^2 \to \min; \\ A_Y &= \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta\lambda\sum_{j=1}^{m}K_{Yj}\varphi_p(\lambda_i)S_{\partial}(\lambda_i)T_{Yj}(\lambda_i)\omega_{yj} - \varphi(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)\right]^2 \to \min; \\ A_Z &= \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta\lambda\sum_{j=1}^{m}K_{Zj}\varphi_p(\lambda_i)S_{\partial}(\lambda_i)T_{Zj}(\lambda_i)\omega_{zj} - \varphi(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)\right]^2 \to \min, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $A_{X_{i\grave{a}\ddot{e}\ddot{i}\grave{a}}} = \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta\lambda\sum_{j=1}^{m}K_{X_i\,j}\varphi_p(\lambda_i)S_{\partial}(\lambda_i)T_{X_i\,j}(\lambda_i)\omega_{X_i\,j} - \varphi(\lambda_i)\overline{x_i}(\lambda_i)\right]^2 \to \min;$

$$A_{X_{\acute{a}\ddot{i}\ddot{e}\ddot{u}\theta\ddot{i}\grave{a}}} = \sum_{i=1}^{n}\left[\Delta\lambda\sum_{j=1}^{m}K_{X_{\acute{a}}j}\varphi_p(\lambda_i)S_{\partial}(\lambda_i)T_{X_{\acute{a}}j}(\lambda_i)\omega_{X_{\acute{a}}j} - \varphi(\lambda_i)\overline{x_{\acute{a}}}(\lambda_i)\right]^2 \to \min.$$

Для приведенной на рисунке 2 структуры искусственной нейронной сети: $K_{Yj}\varphi_p(\lambda_i)S_p(\lambda_i)T_{Yj}(\lambda_i) = E_{Y_j}(\lambda_i)$, $k_{\sum j,i} = \left[\sum_{j=1}^{m}E_{Y_j}(\lambda_i) - \varphi(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)\right]^2$, $A_Y = \sum_{i=360}^{n}k_{\sum j,i}$.

Функции активации нейронов при проектировании прибора устанавливают допустимые отклонения относительной спектральной чувствительности измерительных каналов нейроколориметра от функций сложения цветов стандартного наблюдателя. Таким образом, конструктивные параметры корректирующих светофильтров и значения синаптических коэффициентов считаются установленными, когда нейрон активирован, а функции активации

$$T_Y = e^{-A_Y\beta\varepsilon}\ , \qquad (3)$$

имеют значения в диапазоне [0,999; 1] (рисунок 2), где β - коэффициент, учитывающий наклон функции активации; ε = 0,001 - погрешность измерения напряжения с выхода j-ого фотоприемника, определяемая разрядностью АЦП. Аналогично определяются функции активации T_X, T_Z.

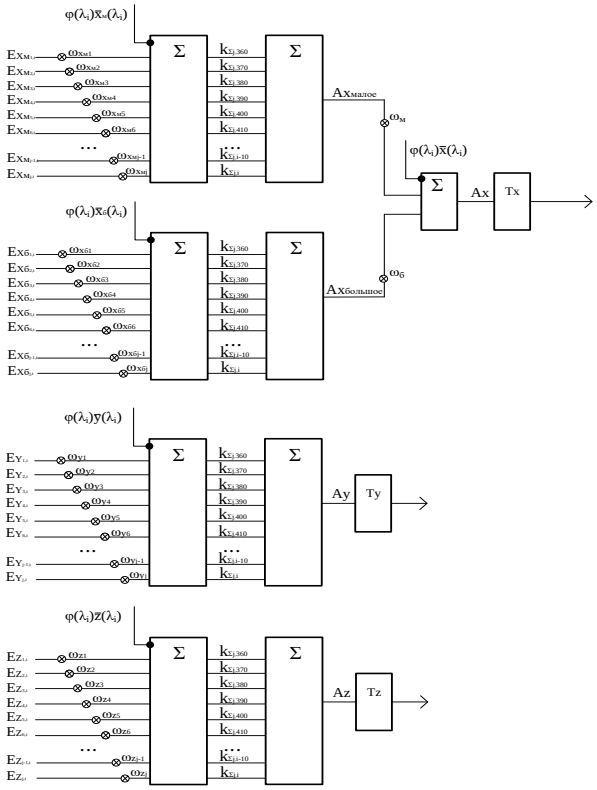


Рисунок 2 - Структура искусственной нейронной сети при определении параметров корректирующих светофильтров

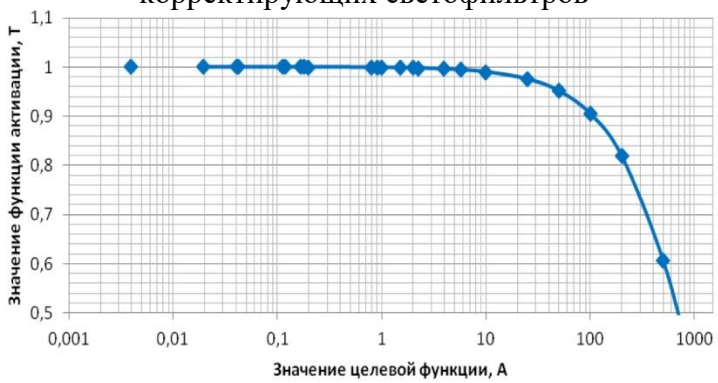


Рисунок 3 – График функции активации нейрона

Целевая функция получена на основе структуры искусственной нейронной сети, отвечающей задаче измерения координат цвета [3], приведенной на рисунке 1. Необходимо найти оптимальные значения синаптических связей, а также толщины и типы цветных стекол для корригирующих светофильтров, используя справочные данные для источника и приемника излучения, а также на спектральных коэффициентах поглощения цветных стекол.

Решение оптимизационной задачи в теории нейронных сетей называют обучением [2], и от того, насколько качественно будет выполнено обучение, зависит способность сети решать поставленные перед ней проблемы во время эксплуатации. Существуют детерминистские и стохастические алгоритмы, предусматривающие обучение с учителем или без него. На этапе проектирования, роль учителя выполняют меры с расчетными спектральными коэффициентами пропускания и координатами цвета.

Оценка обучаемости измерительной системы колориметра на стадии проектирования производилась по величинам погрешностей координат цвета виртуальных образцов (образцы первой группы), вычисленных с помощью математической модели колориметра. В качестве этих образцов использовались цветные стекла толщиной 5 мм, спектральные коэффициенты пропускания которых приведена в «Каталоге цветного стекла» [4]. Вычисленные координаты цвета образцов первой группы для стандартных источников излучения А и С приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Расчетные значения координат цвета образцов первой группы для стандартных источников света А и С

Образцы цвета	Источник излучения А			Источник излучения С		
	X	Y	Z	X	Y	Z
белый	109,814	99,730	35,548	98,163	100,457	117,830
СС1	16,211	20,355	28,030	26,846	26,136	96,186
СС5	2,353	0,562	13,092	9,188	1,585	49,127
СС8	1,970	0,831	11,185	7,517	2,020	40,962
СЗС5	38,532	46,786	25,109	43,056	52,826	83,301
СЗС8	6,126	12,264	24,226	16,357	18,935	80,872
СЗС17	48,412	57,304	31,741	53,642	64,606	105,277
СЗС22	9,148	20,619	32,158	23,049	30,617	107,448
СЗС23	50,219	64,645	34,902	58,174	73,848	115,645
ЗС1	2,335	6,503	0,572	2,590	7,999	1,062
ЗС8	42,380	57,264	9,246	38,362	62,983	23,133
ЗС10	5,122	8,978	0,156	5,161	9,854	0,225
ЗС11	1,487	5,142	0,689	1,754	6,602	1,357
ОС5	26,619	16,173	0,055	17,920	12,450	0,098
ЖЗС1	2,588	5,431	0,176	2,699	6,236	0,268
ЖЗС9	18,020	27,297	1,806	16,456	30,018	3,632
ЖС3	102,477	95,442	22,090	85,020	95,526	66,111
ЖС17	102,399	93,527	4,142	76,858	89,801	7,903
КС10	48,729	22,075	0,000	29,729	13,863	0,000

Погрешности координат цвета при оценке обучаемости измерительной системы колориметра вычислялись по формулам:

$$\Delta X = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Xj} \left[\sum_{i=1}^{n} K_{Xj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Xj}(\lambda_i) T_{Xj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \varphi(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda;$$
$$\Delta Y = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Yj} \left[\sum_{i=1}^{n} K_{Yj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Yj}(\lambda_i) T_{Yj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \varphi(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda; \quad (4)$$
$$\Delta Z = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Zj} \left[\sum_{i=1}^{n} K_{Zj} \tau(\lambda_i) \varphi_p(\lambda_i) S_{Zj}(\lambda_i) T_{Zj}(\lambda_i) \Delta\lambda \right] - \varphi(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda$$

Значения вычисленных погрешностей приведены в таблицах 2.

Следующей задачей является обучение измерительной системы нейроколориметра на ограниченном количестве мер цвета при его производстве и переобучение в процессе эксплуатации с тем, чтобы погрешность измерения координат цвета была допустимой.

Обучение при производстве основывается на реальной спектральной чувствительности конкретного приемника излучения, спектральной плотности потока излучения источника и найденных параметрах корректирующих светофильтров, установленных в колориметре.

Таблица 2 - Погрешность координат цвета, вычисленная на основе зависимостей для стандартных источников А и С

Образцы цвета	Источник излучения А			Источник излучения С		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
белый	-0,014	-0,279	0,001	0,122	0,457	-0,273
СС1	-0,022	-0,013	0,083	-0,003	0,121	-0,298
СС5	-0,025	0,033	0,074	-0,025	0,007	-0,230
СС8	-0,010	0,024	0,058	-0,017	0,011	-0,180
СЗС5	-0,047	-0,129	0,022	0,014	0,174	-0,185
СЗС8	-0,009	0,012	0,059	0,026	0,115	-0,204
СЗС17	-0,054	-0,155	0,031	0,025	0,229	-0,241
СЗС22	-0,041	-0,030	0,078	0,032	0,147	-0,249
СЗС23	-0,071	-0,186	0,029	0,008	0,222	-0,260

ЗС1	-0,024	-0,048	-0,011	0,010	0,011	0,023
ЗС8	-0,034	-0,215	-0,093	0,059	0,180	0,134
ЗС10	-0,008	-0,059	-0,012	-0,004	-0,005	0,001
ЗС11	-0,021	-0,038	-0,010	0,011	0,014	0,029
ОС5	0,031	-0,048	-0,015	0,054	0,104	-0,001
ЖЗС1	-0,013	-0,039	-0,008	0,002	0,001	0,004
ЖЗС9	-0,035	-0,148	-0,043	0,015	0,041	0,065
ЖС3	0,019	-0,275	-0,094	0,177	0,464	-0,028
ЖС17	0,005	-0,363	-0,129	0,141	0,354	0,232
КС10	0,046	-0,004	-0,011	0,119	0,206	-0,007

Необходимость переобучения нейроколориметра в процессе эксплуатации обуславливается тем, что спектральная чувствительность приемника излучения и спектральная плотность потока излучения источника могут меняться. При реализации алгоритма обучения в обучаемый прибор устанавливаются последовательно эталонные меры цвета $X_{Эn}$, $Y_{Эn}$, $Z_{Эn}$ и измеряются при этом сигналы U_{Jn} с каждого фотоприемника, которые соответствуют следующему выражению

$$\sum_{i=1}^{n} K_j \varphi_p(\lambda_i) S_j(\lambda_i) T_j(\lambda_i) \tau(\lambda_i) \Delta\lambda = U_j \qquad (3)$$

Тогда можно записать:

$$X = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Xj} U_j \;, \quad Y = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Yj} U_j \;, \quad Z = \sum_{j=1}^{m} \omega_{Zj} U_j \,. \qquad (4)$$

Принимая во внимание, что при обучении измеряются N мер цвета с известными координатами цвета, выражение (5) перепишем в виде:

$$X_{Эn} \approx \sum_{j=1}^{m} \omega_{Xj} U_{jn}, \quad Y_{Эn} \approx \sum_{j=1}^{m} \omega_{Yj} U_{jn}, \quad Z_{Эn} \approx \sum_{j=1}^{m} \omega_{Zj} U_{jn}. \qquad (5)$$

Эти соотношения выполняются лишь приближенно, а степень приближения и будет определять способность колориметра к обучению. Обучение колориметра заключается в нахождении коэффициентов синаптических связей ω_{xj}, ω_{yj}, ω_{zj}, которые должны удовлетворять, с заданной точностью, всем мерам цвета $X_{Эn}$, $Y_{Эn}$, $Z_{Эn}$.

В соответствии с методом обратного распространения ошибки и с учетом соотношения (5), запишем:

$$\begin{aligned} &\sum_{n=1}^{N} [X_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{XJ}(U_{Jn})]^2 \to \min; \\ &\sum_{n=1}^{N} [Y_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{YJ}(U_{Jn})]^2 \to \min; \\ &\sum_{n=1}^{N} [Z_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{ZJ}(U_{Jn})]^2 \to \min \end{aligned} \qquad (6)$$

Используя соотношения (6) промоделирован режим обучения на расчетных значениях координат цвета образцов первой группы. Для этого рассчитывались величины сигналов на выходе фотоприемников U_J, затем, используя алгоритм обратного распространения ошибки и целевые функции (6), вычислялись синаптические коэффициенты, соответствующих источникам излучения А и С. Отклонения относительной спектральной чувствительности каналов измерения от функций сложения цветов стандартного наблюдателя с учетом относительной спектральной плотности потока излучения источников всех типов, не превысили 0,2 %.

Для оценки обучаемости нейроколориметра выбраны образцы цвета из цветных стекол СС17, СЗС25, СЗС27, ЖЗС5, ЖС4, ЖС12, ОС12, ОС19, не участвующие при обучении в процессе проектирования, значения координат цвета которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения координат цвета образцов второй группы для стандартных источников излучения А и С

Образцы цвета	Для источника А			Для источника С		
	X	Y	Z	X	Y	Z
СС17	23,859	26,256	19,808	29,118	29,361	70,303
СЗС25	38,579	46,914	25,087	43,042	52,652	83,486
СЗС27	87,065	84,644	31,885	81,143	86,670	105,810
ЖЗС5	64,905	67,197	7,383	52,364	67,368	18,543
ЖС4	103,579	94,078	27,299	88,532	93,163	87,130
ЖС12	105,736	97,660	19,284	85,003	96,171	54,154
ОС12	93,718	65,065	0,131	67,203	52,452	0,128
ОС19	101,156	90,940	22,198	83,578	89,176	68,323

Проверка результатов обучения моделировалась на образцах цвета второй группы для источников излучения типа А и С по величине погрешности (таблица 4) с использованием вычисленных значений синаптических коэффициентов в ходе обучения по формулам:

$$\Delta X = X_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{XJ}(U_{Jn}); \quad \Delta Y = Y_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{YJ}(U_{Jn}); \quad \Delta Z = Z_{Эn} - \sum_{j=1}^{m} \omega_{ZJ}(U_{Jn}) \qquad (7)$$

Таблица 4 - Погрешности координат цвета, вычисленные на основе зависимостей (7) для образцов второй группы и стандартных источников излучения А и С

Образцы цвета	Источник излучения С			Источник излучения А		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
СС9	-0,283	-0,011	-0,048	0,128	0,009	0,214
СС17	-0,354	-0,011	0,013	0,152	-0,015	0,013
СЗС25	-0,409	0,041	0,023	0,150	0,129	0,152
СЗС27	-0,313	-0,030	0,049	0,076	-0,010	-0,045
ЖЗС5	-0,389	0,014	-0,122	0,199	0,030	0,086
ЖС4	-0,558	-0,030	0,001	0,194	0,085	-0,230
ЖС12	-0,584	0,009	0,057	-0,052	-0,399	0,573
ОС12	-0,392	0,065	0,246	0,156	-0,299	-0,159
ОС19	-0,283	-0,011	-0,048	0,128	0,009	0,214

Как видно из таблицы 4, достаточно большие изменения спектральных характеристик источника от распределения типа С до А, могут быть компенсированы изменением синаптических коэффициентов при переобучении, практически без увеличения погрешности измерения.

Таким образом, задача проектирования измерительной системы колориметра, построенного на принципах искусственных нейронных сетей, можно считать задачу решенной, если возможные изменения компенсируются только изменением синаптических коэффициентов, не меняя параметров корректирующих светофильтров.

Список литературы

1. *В.А. Соловьев, М.Н. Морозова.* Искусственные нейронные сети в цветовых измерениях// Измерительная техника.- 2012.- № 8- С. 43-48.

2. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс, 2-ое издание.: перев. С англ.- М.: Издательский дом «Вильмс», 2006.-1104 с

3. Патент № 85228 Российская Федерация. Нейроколориметр/ Белаш А. А., Соловьев В.А., Урнев И.В., Щербаков М.А. Опубл.27.07.2009 Бюл. №21.

4. Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог. Под ред. Г.Т. Петровского, Москва, 1990.

05.02.05

А.В. Степенькин, И.В. Шинаков к.т.н., А.В. Жданов к.т.н.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, zhdanov@vlsu.ru

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛАСТИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РВМ

В статье приводятся результаты конечно-элементный анализа эластичного элемента роликовинтового механизма. Эластичные элементы, которые предназначены для выборки зазоров, перераспределения нагрузки по виткам резьбы, уменьшения проскальзывания между резьбовыми элементами, повышения жесткости и кинематической точности.

Ключевые слова: *роликовинтовой механизм (РВМ), эластичный элемент, конечно-элементный анализ.*

Планетарные роликовинтовые механизмы (РВМ) отличаются многообразием схем и типом передач, которые используются для различных применений и задач [1, 2]. Ряд конструкций РВМ имеет эластичные элементы, которые предназначены для выборки зазоров [2, 3], перераспределения нагрузки по виткам резьбы [4], уменьшения проскальзывания между резьбовыми элементами, повышения жесткости и кинематической точности. В работах [4, 6] даются аналитические решения для упругих и резьбовых элементов, однако для ряда конструкций эластичных элементов необходимо использовать численные решения.

Основными особенностями РВМ с упругими элементами [5] можно выделить то, что устройство снабжено гайкой, имеющей конусную наружную поверхность, предназначенную для взаимодействия с конусной внутренней поверхностью корпуса, две торцовые поверхности, на одной из которых выполнен паз для взаимодействия с выступом на торцовой поверхности одной из крышек, внутреннюю резьбовую поверхность, разрез, выполненный на образующей конусной поверхности по винтовой линии, обеспечивающий уменьшение среднего диаметра резьбы вследствие взаимодействия с поверхностями корпуса и крышек (рис.1).

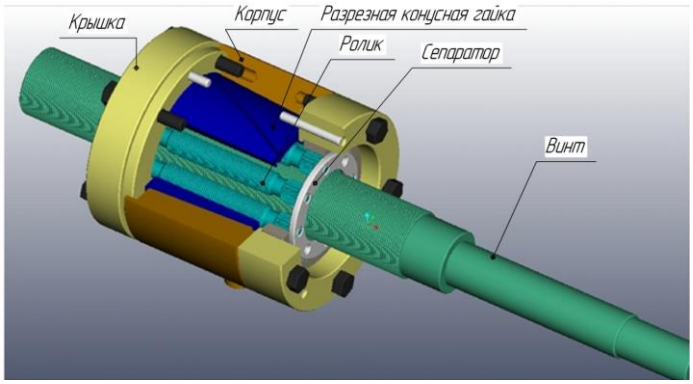
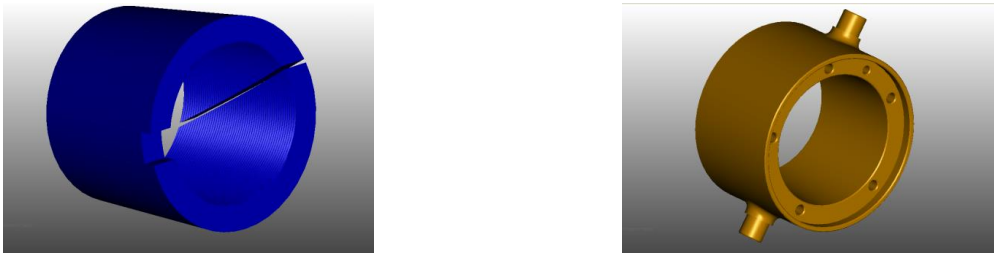


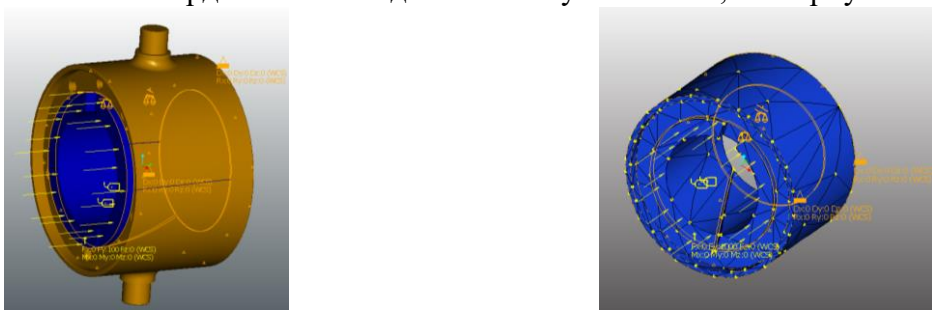
Рис. 1 РВМ с разрезной конусной гайкой

Конусная гайка выполняет в РВМ ряд важнейших функций: устранение осевых и радиальных зазоров, что обеспечит высокие осевую жёсткость и кинематическую точность за счёт увеличения точек контакта между резьбовыми поверхностями винта, роликов и гайки, улучшение фрикционной стабильности кинематической передаточной функции посредством увеличения приведённого коэффициента трения и уменьшения проскальзывания между винтом и роликами. При этом предлагаемая конструкция конусной гайки должна упростить технологический процесс изготовления РВМ в целом. Конечно-элементный анализ проводился на твердотельных моделях конусной гайки и корпуса (рис.2, 3). Модели построены с использованием программного комплекса Pro/Engineer WF5. Граничными условиями для решения данной задачи будут являться закрепления корпуса РВМ от перемещений и поворотов. Нагрузку приложим к торцевой поверхности гайки, где расположен вырез для предотвращения проворачивания. Для выявления наиболее оптимальной конструкции конусной гайки наклон разреза и угол конуса будут изменяться.



а) *б)*

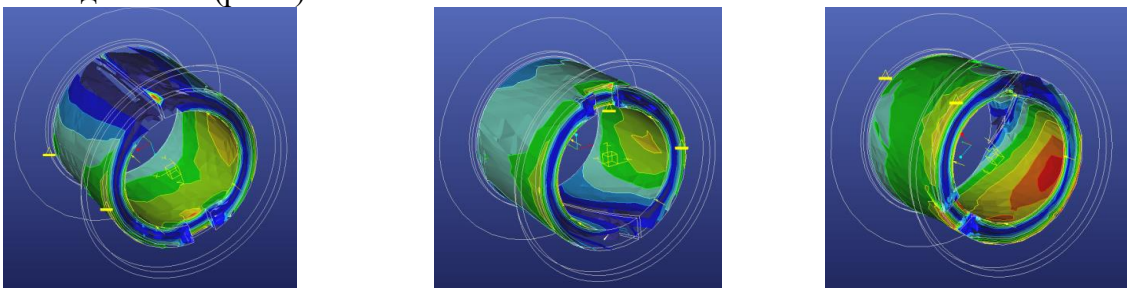
Рис. 2 Твердотельные модели: а - конусная гайка, б - корпус



а) *б)*

Рис. 3 Наложение граничных условий: а – назначение закреплений и внешних сил, б – аппроксимирующая сетка

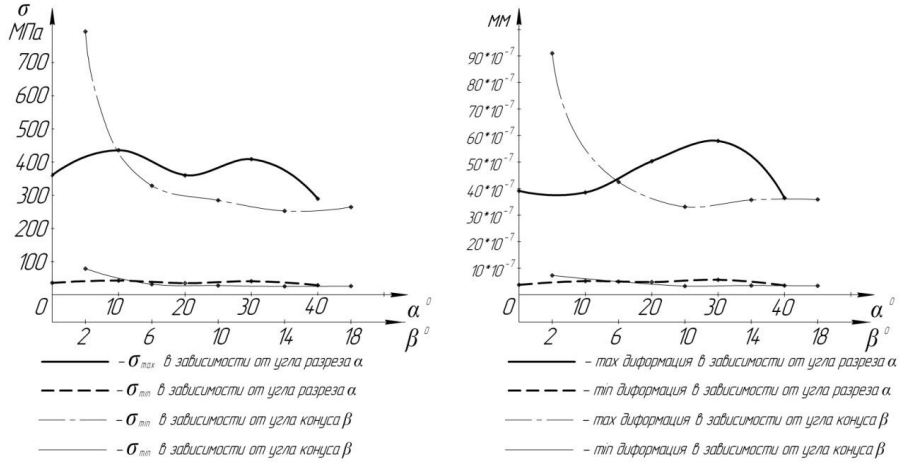
Выходными данными будут значения перемещений, напряжений, деформаций, и контактного давления (рис.4).



а) σ_{max} 361.3 МПа, σ_{min} 36.18 МПа *б) σ_{max} 360.1 МПа, $_{min}$ 35.17 МПа* *в) σ_{max} 289.8 МПа, σ_{min} 29 МПа*

Рис. 4 Распределение напряжений в зависимости от угла разреза: а – угол 0^0, б – угол 20^0, в – угол 40^0

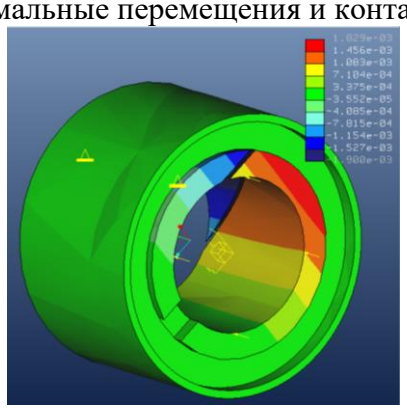
На основе полученных данных построим графики зависимости максимальных и минимальных значений напряжений и деформаций в зависимости от изменения углов разреза и конуса (рис.5).



а) б)

Рис. 5. Графики зависимости: а) σ_{max}, σ_{min} от углов разреза и конуса гайки; б) max и min деформаций от углов разреза и конуса гайки

После того, как определили оптимальные углы разреза и конуса, необходимо проверить максимальные перемещения и контактное давление (рис.6).


а)

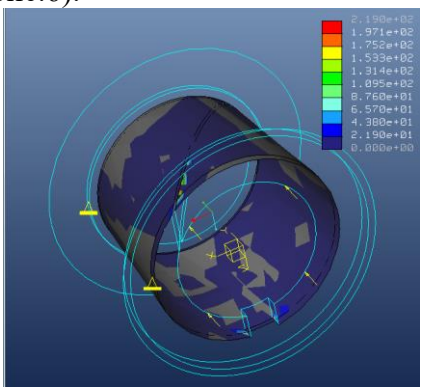

б)

Рис. 6 Распределение перемещений и контактного давления:
а – максимальные перемещения в радиальном направлении; б – контактное давление

По полученным данным видно как изменяется напряжение и деформация гайки и корпуса при разном угле разреза конусной гайки. Наиболее подходящим углом разреза конусной гайки является 40^0, так как возникают наименьшие значения напряжений и деформаций. Из расчетов следует, что набольшее значение напряжения и деформации при различном угле разреза возникают в углах паза и имеют точечных характер. Напряжения, возникающие на конусной поверхности, в целом одинаковые и их значения не превышают 275 МПа. С увеличением угла конуса максимальные величины напряжений и смещаются в сторону более толстого края гайки и ее величины уменьшаются с 794 МПа при конусе 2^0 до 253МПа при 14^0. Аналогично напряжению деформации изменяются от $9.102 \cdot 10^{-6}$ мм до $3.305 \cdot 10^{-6}$ мм. По полученным данным оптимальным выбираем угол в 10^0, так как напряжения 285 МПа и деформации $3.317 \cdot 10^{-6}$ мм не являются критичными, а дальнейшие увеличение конуса ведет к утончению стенки гайки, что впоследствии скажется на усложнении изготовления детали.

Контактное давление распределено равномерно по всей конусной поверхности, величины давления не велики (от 21 МПа до 65 МПа) что говорит о правильно сбалансированном контакте гайки и корпуса. Наибольшее значение давление имеет у края разреза гайки (219 МПа), и то пятно контакта очень мало, и сильного воздействия на механизм в целом не оказывает. В результате проведенного конечно-элементного анализа основных элементов прецизионного устройства для преобразования вращательного движения в поступательное была выбрана наиболее оптимальная конструкция устройства: угол разреза гайки 40^0, конус 10^0. В последствии это позволит улучшить фрикционную стабильность кинематической передаточной функции посредством увеличения приведённого коэффициента трения и уменьшения проскальзывания между винтом и роликами.

Список литературы

1. *Morozov V.V.* New aspects of the planetary roller-screw mechanism classification [Text] / V.V. Morozov, A.V. Zhdanov // WIT Transactions on Engineering Sciences (Mechanical and Electrical Engineering), 2014, Vol. 96, pp. 951-957 ISSN 1743-3533 (on-line) doi:10.2495/AMEE140351
2. *Морозов В.В.* РВМ. Кинематические характеристики.. (монография) / ВлГУ – Владимир, 2005. – 78 стр - ISBN 5-89368-634-9
3. *Tselishchev, A.S., Zharov, I.S.* Elastic elements in roller-screw mechanisms// Russian Engineering Research, v.28, No.11, pp.1040-1043, 2008
4. *Жданов А.В.* Теоретические исследование распределения нагрузки по виткам резьбы РВМ / А.В. Жданов, А.В. Степенькин, А.З. Шаламберидзе// НТВП. №2, 2011г. – Казань. С.87-90. ISSN 2079-5920.
5. Patent 144114 /A device for converting rotational motion into linear///Zhdanov A.V., Shtych D.V., Stepenkin A.V.

05.13.17

Д.А. Страбыкин д.т.н., Д.В. Вожегов, А.И. Симонов

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», факультет автоматики и вычислительной техники, кафедра электронных вычислительных машин, Киров, strabykin@mail.ru, vodimitriy@gmail.com, asimonov215@gmail.com

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ АБДУКТИВНОГО ВЫВОДА[1]

В работе даётся содержательная постановка задачи прогнозирования развития ситуаций. Приводится описание задачи прогнозирования развития ситуаций как задачи логического вывода. Предлагается система прогнозирования на основе абдуктивного вывода.

Ключевые слова: *интеллектуальная система, логическое прогнозирование, абдуктивный вывод.*

Важной практической задачей является создание систем прогнозирования, обеспечивающих автоматическое составление и коррекцию оперативного прогноза развития ситуации для лица, принимающего последовательность решений в ограниченное время в быстро меняющихся условиях. Обычно области применения таких систем прогнозирования связаны с быстро протекающими процессами, требующими экстренного вмешательства человека при возникновении не запланированных (аварийных) ситуаций.

В системах прогнозирования применяются различные виды математических методов: статистические, алгебраические, логические, на опорных векторах, нейросетевые и другие. Представляют интерес системы прогнозирования, основанные на моделировании рассуждений, в частности, логическом выводе на знаниях [1].

Логическое прогнозирование развития ситуаций. Для содержательной постановки задачи логического прогнозирования развития ситуаций введём ряд основных понятий [2].

Событие в предметной области характеризуется множеством простейших утверждений – фактов, зафиксированных в определенный момент времени. Наступление события происходит в тех случаях, когда определенные подмножества этих фактов становятся истинными. В простейшем случае событие может представляться один фактом.

Ситуация в предметной области характеризуется совокупностью событий и отношений между ними. Ситуация складывается тогда, когда наступают характеризующие её события и устанавливаются необходимые отношения между ними. В простейшем случае ситуация может представляться одним событием.

Фаза развития (состояние) ситуации представляется подмножеством событий и отношений, описывающих ситуацию. Ситуация входит в некоторую фазу, как только наступают характеризующие её события и устанавливаются необходимые отношения между ними.

Пространство развития ситуации – это множество фаз (состояний), через которые может проходить развитие ситуации.

Траектория развития ситуации – последовательность фаз (состояний), через которые проходит развитие ситуации.

Предсказание траектории развития ситуации – определение для ситуации, находящейся в текущей фазе (состоянии), одной или нескольких фаз (состояний), в которые перейдет ситуация в последующие моменты времени.

Введённые понятия позволяют сформулировать основную задачу прогнозирования развития ситуаций как задачу предсказания траектории (траекторий) развития ситуации.

В системах прогнозирования на основе логического вывода ситуация описывается

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-01-02818 а)

средствами формальной системы (исчисления высказываний или исчисления предикатов), а ее развитие прогнозируется с помощью дедуктивного или абдуктивного вывода [3].

Дедуктивный вывод, при проведении которого новые утверждения являются следствиями из уже имеющихся утверждений, хотя и имеет ограниченную область применения, но надежен при условии истинности посылок. В простейшем случае дедуктивный вывод состоит в установлении факта логического следования из посылок заданного заключения. Дедуктивный вывод может завершиться неудачно, когда заключение не является следствием исходных посылок. При этом прогнозирование с помощью дедуктивного вывода также завершается неудачно. Это может объясняться неполнотой информации, использованной при описании ситуации, что проявляется в отсутствии в посылках недостающих фактов и/или правил.

В тех случаях, когда дедуктивный вывод завершается неудачно, возможно продолжение прогноза с помощью абдуктивного вывода [4]. Абдукция позволяет находить недостающие в описании ситуации факты и правила, добавление которых к исходному описанию делает дедуктивный вывод успешным [2]. Логическое прогнозирование на основе абдукции позволяет строить прогнозы, когда дедукция не применима.

Прогнозирование на основе абдуктивного вывода. Рассмотрим прогнозирование на примере задачи диагностики автомобиля [5, с. 283]. Зададим предметную область следующим набором событий: 1) ТД – Топливо поступает в двигатель; 2) ДВ – Двигатель вращается; 3) ФГ – Фары горят; 4) ТБ – Топливо есть в баке; 5) ТФ – Топливо поступает в топливный фильтр; 6) ТИ – Топливо поступает в инжектор; 7) ПСЗ – Проблема в свечах зажигания; 8) ПАП – Проблема в аккумуляторе и проводке; 9) ПСТ – Проблема в стартере. Каждому событию соответствует факт, который принимает значение «ИСТИНА», как только становится известно о наступлении соответствующего ему события.

Отношения, определяемые на множестве событий предметной области, могут быть представлены базой знаний: 10) ТД&ДВ→ПСЗ; 11) ⌝ДВ&⌝ФГ→ПАП; 12) ⌝ДВ&ФГ→ПСТ; 13) ТБ&ТФ→ТИ. Начальная фаза F_1 ситуации, развитие которой прогнозируется, задана множеством событий: ТФ, ТБ, ДВ. Конечная фаза развития ситуации задана событием ПСЗ.

Задача дедуктивного вывода, соответствующая задаче прогнозирования, формулируется следующим образом: установить, является ли логическим следствием фактов ТБ, ТФ, ДВ и посылок 10-13 заключение ПСЗ. Если дедуктивный вывод завершается неудачно, то решается задача абдуктивного вывода, в процессе которого определяются дополнительные посылки, обеспечивающие успешный дедуктивный вывод заключения.

В примере дедуктивный вывод завершается неудачно, а абдуктивный – успешно [2]. При этом вычисляется дополнительная посылка: 14) ТИ→ТД, необходимая для успешного дедуктивного вывода заключения ПСЗ. Схема успешного логического вывода заключения ПСЗ приведена на рис. 1.

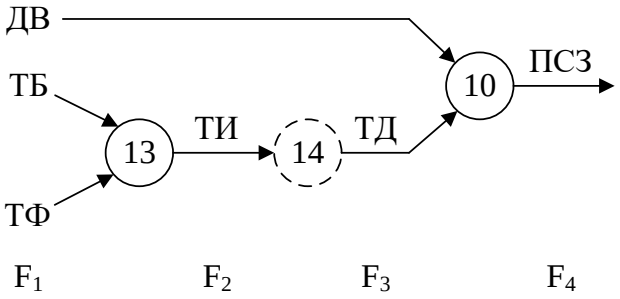


Рис. 1 – Схема логического вывода заключения ПСЗ

По схеме логического вывода для множества фактов ДВ, ТБ, ТФ определяются прогнозируемые утверждения (состояния), которые ожидаются на следующем шаге (фазе) (таблица, строка 1).

Таблица – Прогноз и его уточнение по шагам

Фаза	Поступившие факты	Прогноз на следующий шаг	Долгосрочный прогноз
F_1	ТФ, ТБ, ДВ	ТИ	ТФ,ТБ,ДВ→ТИ→ТД→ПСЗ
F_2	ТИ	ТД	ТИ→ТД→ПСЗ
F_3	ТД	ПСЗ	ТД→ПСЗ
F_4	ПСЗ	–	–

Функциональная структура интеллектуальной системы. На основе абдуктивного вывода возможно построение интеллектуальной системы логического прогнозирования развития ситуаций. Источником событий (новых фактов) для системы прогнозирования в общем случае является некоторый объект наблюдения, а результаты прогнозирования поведения (развития) этого объекта поступают пользователю.

Интеллектуальная система логического прогнозирования состоит из шести основных блоков: динамической базы знаний; реальных ситуаций; логического вывода; прогнозирования; управления прогнозированием; интерфейса пользователя (рис. 2).

Динамическая база знаний содержит правила поведения объекта наблюдения, факты, характеризующие особенности предметной области и внешней среды, и поступившие от объекта новые факты, характеризующие произошедшие события. Кроме того, блок содержит описание целей (ситуаций, состояний), достижение которых необходимо спрогнозировать. Предполагается, что в процессе работы системы цели могут меняться, однако это происходит значительно реже возникновения новых фактов (событий). Возможно также (в случае успешного абдуктивного вывода) пополнение частей базы знаний, содержащих правила и факты. К базе знаний (включая набор фактов и набор правил) предъявляется требование непротиворечивости.

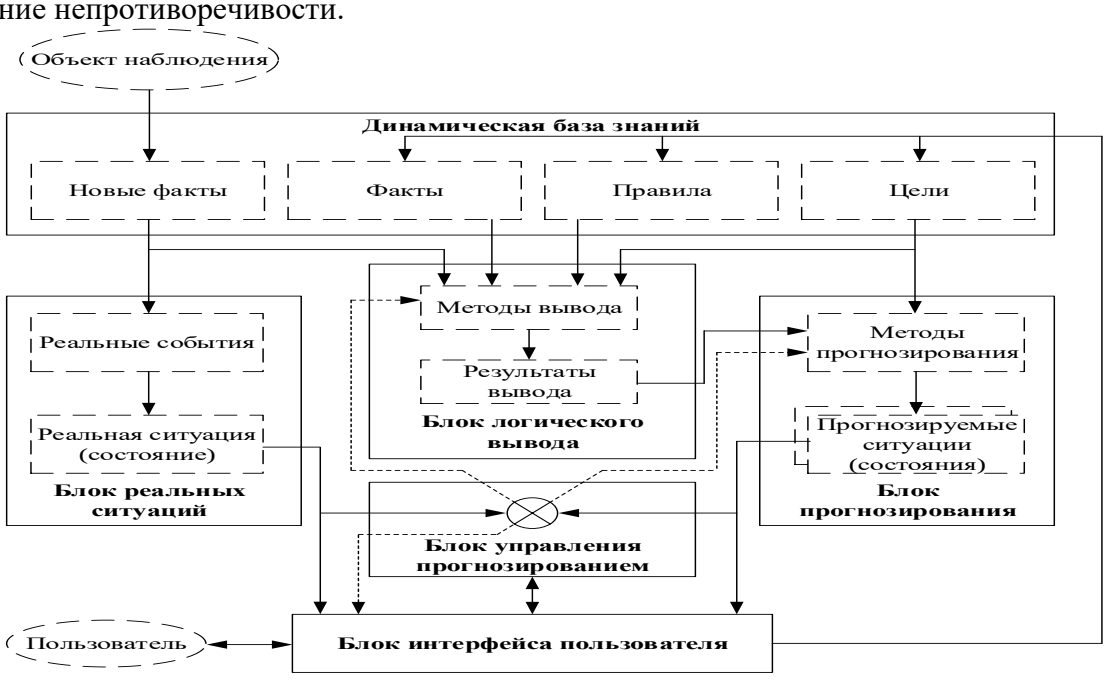


Рис. 2 – Функциональная структура интеллектуальной системы прогнозирования

В *блоке прогнозирования* в зависимости от вида запроса на прогнозирование развития ситуации (от начальной до конечной фазы, перехода в заданную фазу, развития из заданной фазы) инициируется выполнение в блоке логического вывода соответствующего вывода (заключения, предшествующих заключению утверждений, следствий). В процессе прогнозирования результаты логического вывода преобразуются в блоке прогнозирования в описание прогнозируемых фаз развития ситуаций. Для краткосрочного прогнозирования формируется описание фаз развития ситуации, которые могут сложиться на следующем шаге. Для долгосрочного прогнозирования формируется множество описаний траекторий развития ситуации, ведущих к цели прогнозирования (или исходящих из заданной фазы).

В *блоке логического вывода* на основании поступивших новых фактов с использованием имеющихся правил производится дедуктивный или абдуктивный логический вывод заданного вида. При успешном дедуктивном выводе формируется описание схемы логического вывода. Иначе, при неуспешном дедуктивном выводе, выполняется абдуктивный вывод, который определяет новые факты и правила необходимые для вывода заключения (предшествующих заключению утверждений или следствий). Полученные новые факты и правила не должны противоречить существующим фактам и правилам в динамической базе знаний. При успешном (непротиворечивом) абдуктивном выводе формируется описание схемы логического вывода. Сформированная схема логического вывода выступает в качестве схемы прогнозирования. В полученной схеме выделяются ветви логического вывода, описывающие различные траектории развития ситуации. Результаты логического вывода используются в блоке прогнозирования.

Блок реальных ситуаций обеспечивает на каждом шаге работы системы логического прогнозирования на основании поступивших от объекта наблюдения фактов определение (вычисление) реально наступивших событий, с использованием которых вычисляется реальная складывающаяся ситуация (фаза развития ситуации).

В *блоке управления прогнозированием* описание реальной ситуации сравнивается с описанием ситуации, которая должна была сложиться по предшествующему прогнозу системы. В результате сравнения этих ситуаций блок управления прогнозированием выдает соответствующие сообщения в блок интерфейса пользователя и блок прогнозирования. Если прогноз предыдущего шага не был успешным (реально сложившаяся ситуация отличается от той, что ранее прогнозировалась), то прогноз текущего шага аннулируется. На следующем шаге, на основании новых поступивших фактов с использованием имеющихся правил производится дедуктивный вывод (а, при необходимости, абдуктивный) и строится новая схема логического прогнозирования. Эта схема затем используется для формирования описания ситуации, которая сложится на следующем шаге, и построения долгосрочного прогноза. Если прогноз предыдущего шага был успешным, то логический вывод с формированием новой схемы логического прогнозирования не производится; для формирования описания ситуации, которая сложится на следующем шаге, используется полученная при предыдущем логическом выводе схема логического прогнозирования.

Таким образом, на каждом шаге блок управления прогнозированием через блок интерфейса пользователя выдает пользователю сообщение о совпадении (не совпадении) ранее спрогнозированной ситуации и реально сложившейся, а также описание прогнозируемой ситуации, которая ожидается на следующем шаге. Кроме того, пользователю предоставляется долгосрочный прогноз.

Разработана функциональная структура интеллектуальной системы логического прогнозирования, позволяющая ускорить процесс прогнозирования за счёт применения технологий параллельного программирования, а также реализации специализированных процессоров с использованием технологий ПЛИС, ASIC и других.

Список литературы

1. *Витяев, Е.Е.* Предсказание как вычисление // Философские науки. – 2007. – №1 (32). – С. 81–101.
2. *Страбыкин, Д.А.* Метод логического прогнозирования развития ситуаций на основе абдуктивного вывода / Д.А. Страбыкин // Изв. РАН. ТиСУ. – 2013. – № 5. – С. 87–92.
3. *Вагин, В.Н.* Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах, 2-е изд., испр. и доп. / В.Н. Вагин, Е.Ю. Головина, А.А. Загорянская, Д.А. Поспелов – М.: Физматлит, 2008. – 712 с.
4. *Вагин, В.Н.* Методы абдуктивного вывода в задачах планирования работы в сложных объектах / В.Н Вагин, К.Ю. Хотимчук // Изв. РАН. ТиСУ. – 2010. – № 5. – С. 95–113.
5. *Люгер, Джордж, Ф.* Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.

05.13.18

Н.А. Труфанов, Л.Р. Шаяхметова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики, кафедра вычислительной математики и механики, Пермь, vmm@pstu.ru

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКА

В работе представлены результаты компьютерного анализа нестационарных трехмерных сопряженных гидродинамических и тепловых процессов при заливке и кристаллизации слитка с учетом естественной конвекции в процессе охлаждения. На основе численного моделирования изучена эволюция температурных полей в процессе кристаллизации слитка, представлено удовлетворительное подтверждение их значений путем сравнения экспериментально измеренных температур на наружной поверхности формы с расчетными значениями.

Ключевые слова: *численное моделирование, стальной слиток, сифонная заливка, кристаллизация, конвекция расплава*.

Введение

Изготовление высококачественных металлических слитков без дефектов структуры является главной целью металлургического производства. Хорошо известно, что структура литого изделия во многом зависит от характера протекания процесса затвердевания, когда закладываются основные физико-химические свойства отливки [1]. Формирование макроструктуры слитка определяется, в первую очередь, технологическими режимами заливки и охлаждения расплава в форме, а также конструктивными особенностями изделия (конусность слитка, отношение высоты слитка к его диаметру). Большинство реальных прикладных задач невозможно решить аналитически, без привлечения современной вычислительной техники и численных методов, а проведение экспериментов трудозатратно и дорогостояще. Поэтому именно компьютерное моделирование становится эффективным способом контроля технологии и управления литейными процессами.

Численному моделированию затвердевания слитков посвящен ряд работ [2-8]. В работе [2] в двумерной постановке решена задача кристаллизации бинарного сплава, затвердевающего в цилиндрической металлической форме. Для переходной твердожидкой зоны в интервале температур фазового перехода использована равновесная модель. Конвективным потоком расплавленного металла в данной модели пренебрегли. В статьях[7,8] представлены результаты оптимизации конструкции изложницы при изготовлении массивного слитка. В [9] использовалась трехмерная модель крупного слитка массой 142т. Отмечено влияние свободной конвекции на температурные поля в расплаве и качество литой структуры.

Однако, несмотря на совершенствование компьютерных моделей сталелитейных процессов, важным моментом является их верификация. Наиболее доступным способом для подтверждения корректности компьютерных моделей, является сравнение температурных полей в процессе заливки и затвердевания слитка.

Концептуальная модель и исходные данные.

Объектом моделирования является слиток массой 10 тонн, который отливают из конструкционной стали в форму из серого чугуна. Температура окружающей среды 20^0C, форма предварительно разогрета до 50^0C. Температура заливки составляет 1585^0C. Полное время заливки составляет 9 минут 30 секунд.

В рассматриваемом сталеплавильном производстве жидкую сталь из ковша разливают в изложницы. Разливка производится сифонным способом, что позволяет одновременно заполнять металлическим расплавом 2 изложницы. Для экономии вычислительных ресурсов рассматривается половина всей системы: одна изложница со слитком и половина литниковой системы (рис.1).

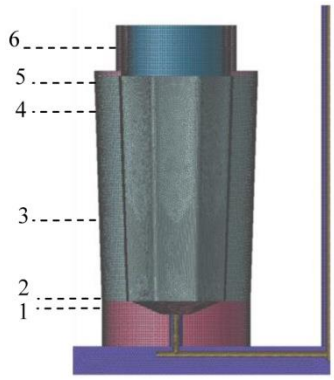


Рис. 1 - Конечно-элементная модель расчетной области и расположение контрольных точек для экспериментального измерения температуры на поверхности формы

Геометрические характеристики слитка: отношение высоты к диаметру 3.4; конусность слитка на одну сторону 7%; характерные размеры слитка: нижний диаметр 760 мм, верхний диаметр 890 мм, высота слитка с прибыльной частью 1980 мм.

Численная модель процессов, протекающих при заливке и кристаллизации слитка построена в конечноэлементной среде ProCast. Моделирование заливки производили, задавая источник массы с заданным массовым расходом на поверхности центровой литниковой системы. Сначала смоделирован гидродинамический режим заполнения формы с учетом турбулентности: циркуляция жидкого металла и температурное поле на форме и слитке на момент окончания заливки; затем проведен анализ условий теплообмена при дальнейшем охлаждении слитка в форме с учетом естественной конвекции расплава.

Модели строятся в следующих предположениях:

- Использована стандартная κ–ε модель турбулентности;
- Используется гравитационная модель течения со свободной поверхностью;
- Система находится в поле силы тяжести и никакие другие внешние силы на нее не действуют;
- Кристаллизация описывается в рамках равновесной теории двухфазной зоны, сплав бинарный, сегрегация не рассматривается;
- Выделение тепла при твердофазных изменениях не учитывается, а учитывается только выделение скрытой теплоты при переходе из жидкой в твердую фазу;
- Тепловой контакт «поддон-форма», «форма-прибыльная наставка» идеальный.

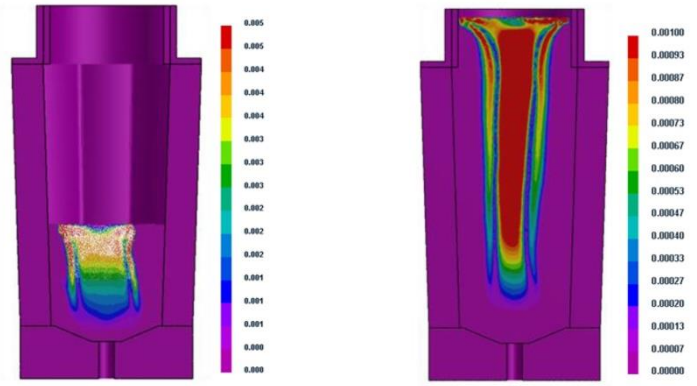
Охлаждение на границе «форма-окружающая среда» задавалось через комбинацию конвективного и лучистого теплообмена. На границах «отливка-форма», «отливка-вкладыш», при жидкой фазе отливки задается ковективный теплообмен, при переходе из жидкой фазы отливки в твердую на указанных границах задается кондуктивный теплообмен. На границе «вкладыш-форма» - задавается кондукттивный теплообмен.

Свойства материала отливки рассчитаны по химическому составу с применением модуля Thermodynamic Database, свойства формы и теплоизоляционного вкладыша взяты из встроенной базы данных.

Результаты моделирования представлены на рисунках 2 и 3. На рис.2а приведено поле скоростей в процессе заливки расплава. Видно, что распределение несимметрично, в следствии того, что в модели учтена не только изложница, но и литниковая система, из которой расплав поступает в изложницу с нарушением симметрии. Указанное явление приводит к тому, что фронт кристаллизации также реализуется несимментрично. На рис.2б представлено поле скоростей в процессе охлаждения слитка, видно конвективное движение в жидком ядре слитка относительно твердой фазы.

Тепловые поля формы и слитка в момент завершения заливки приведены на рис. 3. Опасно перегретых зон на форме в течение заливки не обнаружено. Отмечен сильный разогрев теплоизоляционного вкладыша, что безусловно является положительным фактором, поскольку препятствует теплоотводу через прибыльную часть. Толщина твердой корочки металла, образовавшейся на стенках изложницы к моменту окончания заливки, составляет 5-

10 см (рис. 3б). Отметим ее отсутствие в прибыльной части слитка. Это можно объяснить во-первых, уменьшением теплоотвода от расплава из-за низкой теплопроводности материала вкладыша, во-вторых, непосредственно самими условиями сифонной заливки, когда расплавленный металл заполняет тело слитка, и только потом прибыльную часть.

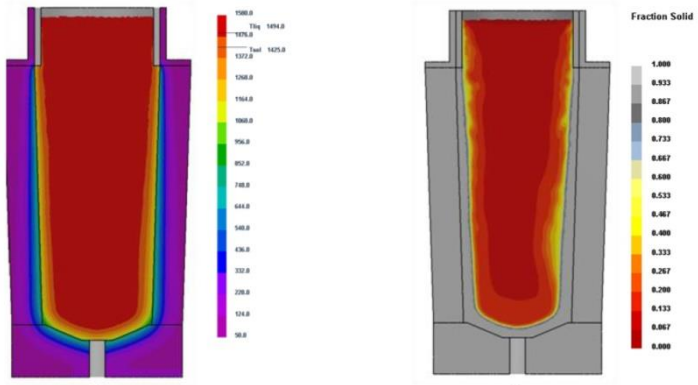


а б

Рис. 2 - Поля скоростей в [м/с]

а– в процессе заливки расплава, б– в процессе охлаждения слитка

Проведение на ПК данного расчета, в выполнении которого было задействовано 8,5 млн. элементов, заняло около 160 часов.



а б

Рис. 3 - Результаты расчета заливки:

а– тепловое поле [°С] к моменту окончания заливки (570 с),

б– доля твердой фазы [%], выделившаяся к моменту окончания заливки

Экспериментальное исследование температурных полей.

Были проведены экспериментальные замеры температур на внешней поверхности изложницы в процессе разливки стали и при последующей выдержке слитка в изложнице в условиях металлургического производства ЗАО МЗ «Камасталь».

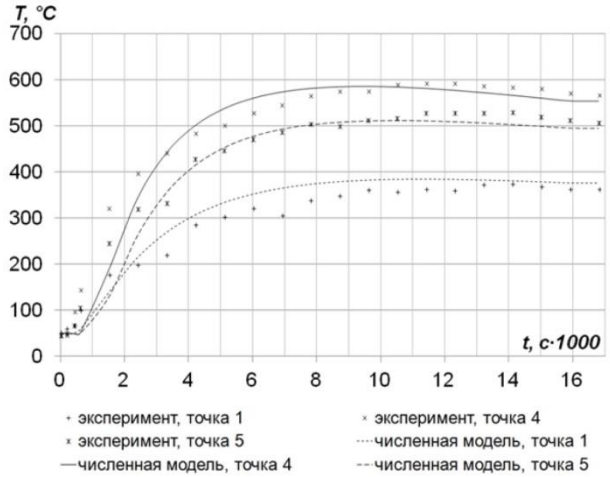


Рис. 4 - Сравнение температур, полученных численно и экспериментально замеренных, в контрольных точках на наружной поверхности формы

Измерения в точках 1-6, указанных на рис.3, производились с интервалом 1 мин. при разливке стали, и с интервалом 15 минут после заполнения тела слитка и прибыльной части. Замеры осуществлялись оптическим пирометром «Питон 102». На рис.4 представлены результаты экспериментального измерения и численного решения задачи в трех различных точках. Из сравнительного анализа, можно сделать вывод о том, что предложенная математическая модель в достаточной мере отражает процессы, проходящие в процессе разливки и кристаллизации крупногабаритного слитка. Расхождение значений температур на этапе разливки, можно объяснить как наличием технологических зазоров в изложнице, которые не учитываются в модели, так и неравномерным фактическим распределением начальной температуры по толщине стенок изложницы, в то время как в численных расчетах начальная температура принималась постоянной.

Фактическое время полной кристаллизации слитка практически совпадает с расчетным значением, что говорит о корректности предложенного подхода для моделирования разливки и кристаллизации крупногабаритных слитков.

Выводы

Компьютерное моделирование позволяет с достаточно высокой точностью описать процесс заливки и затвердевания расплава стали в форму, что подтверждается удовлетворительным соответствием температур поверхности изложницы, полученных в результате численного анализа, с данными, полученными при экспериментальном измерении температур в реальном производственном процессе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. *Цаплин А.И.* Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1995. – 238 с.
2. *Chernogorova T.P., Vabishchevich P.N.* Numerical investigation of solidification processes of cylindrical ingots in a metal mould at variable technological circumstances. // Int. J. of Heat and Mass Transfer, №42, 1999.
3. *Gu J.P., Beckermann C.* Simulation on convection and macrosegregation in a large steel ingot. // Metal Mater Trans A, 1999.
4. *Combeau H., Kumar A., Zaloznik M.* Modelingof equiaxed grain evolution and macrosegregations development in steel ingots. //Trans IIM, Vol 62, pp. 285-290, 2009.
5. *Combeau H., Zaloznik M., Hans P., Richy P.-E.* Prediction of macrosegregation in steel ingots: influence of the motion and the morphology of equiaxed grains. // Metal Mater Trans B, Vol 40, pp. 289-304, 2009.
6. *Ahmad N., Combeau H., Desbiolles J.-L., Jalanti T., Lesoult G., Rappaz J., Rappa M., Stomp C.* Numerical Simulation of macrosegregation: a comparison between finite volume method and finite element method predictions and a confrontation with experiments. // Metal Mater Trans A, Vol 29, pp. 617-630, 1998.
7. *Balcar M., Zelezny R., Sochor L., Fila P., Martinek L.* The development of a chill mould for tool steels using numerical modeling. // Mater Technol, 2008.
8. *Kermanpur A., Eskandari M., Purmohamad H., Soltani M.A., Shateri R.* Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. // Materials and Design, 31, 2010.
9. *Бройтман О.А., Монастырский А.В., Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Макарычева Е.В., Сараев Д.Ю.* Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков. // Литейщик России, №10, 2011.

05.23.20

О.П. Уварова

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
факультет архитектуры и градостроительства,
кафедра ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства,
Нижний Новгород, uvarova.ola@gmail.com

ДЕЯТЕЛЬНОЕ СОУЧАСТИЕ В АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОМ ФОРМИРОВАНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В СТРУКТУРЕ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ

В ситуации преобладания в жилой застройке современного российского города массовой архитектуры середины прошлого века с присущими ей негативными характеристиками открытые пространства несут в себе наибольший потенциал для улучшения качеств среды. В статье рассматривается специфика соучастного формирования открытых городских пространств в структуре сложившейся жилой застройки, вводится понятие деятельного соучастия, очерчиваются его особенности и положение в теории архитектуры, предлагаются рекомендации по совершенствованию этого явления, дающие возможность в дальнейшем разработать оптимальные программы развития городской среды с участием обитателей в диалоге с профессионалами и властями.

Ключевые слова: *соучастие, партиципация, архитектура соучастия, демократическая архитектура, открытые городские пространства.*

В архитектуре различают «большую проектную» и «народную» традиции, которые испокон веков сосуществуют в городской среде. В доиндустриальные времена доминировала народная архитектура, обитатель среды был одновременно и ее создателем. В индустриальный период формируется так называемая институциональная архитектура, когда функции создания среды передаются в руки специальных профессиональных и общественных организаций [1]. Человек становится потребителем архитектурного продукта, его влияние на среду уменьшается. В середине XX века возникает множество примеров неудовлетворенности результатами патерналистического архитектурного проектирования, что к 60-70-м годам приводит к формированию концепции соучастия, подразумевающей «привлечение жителей к процессу проектирования для выявления истинных потребностей и проблем людей» [2]. Несмотря на бесспорную актуальность и многочисленные научные труды, в современной отечественной проектной практике соучастие еще не получило такого широкого распространения, которое способно было бы кардинально повлиять на городскую среду, при этом требования обитателей к качеству среды постоянно растут.

В настоящее время доминирования в городах массовой жилой застройки прошлого столетия [3] с ее безликостью и однородностью, потенциал улучшения характеристик городской среды несут в себе открытые, внеархитектурные пространства. В. А. Нефедов относит кварталы жилой застройки к элементам городской среды, где сложились наиболее острые проблемные ситуации, обусловленные деградированностью, запущенностью, функциональной нерасчлененностью пространств, их несомасштабностью человеку, тотальной экспансией автотранспорта. Администрация не справляется с задачами их реконструкции: производится точечный ремонт покрытий, установка типовых детских площадок, хозяйственных и спортивных сооружений в соответствии с нормативными показателями, но комплексного решения проблем и озеленения не происходит [4]. В то же время практически в каждой жилой группе наблюдаются преобразования открытых пространств силами обитателей среды. Это элементы «народной традиции» в современном городе, которые несут большой потенциал для улучшения качеств среды.

Такое преобразование пространства обитателями близко к понятию самодеятельной архитектуры или самостроя, так как основано не на профессиональных или научных знаниях,

а на культуре и опирается на обывательское восприятие мира, но по большому счету оно таковым не является, поскольку обитатели в рассматриваемом случае творят в уже сформированной архитектурной среде, где не происходит изменения архитектурного и планировочного каркаса, созданного профессионалом в рамках институциональной архитектуры. Очевидно, что в данном случае речь идет об одной из разновидностей соучастия, имеющей место в структуре сложившейся застройки на этапе обитания. При этом в отличие от классического понимания соучастия, когда жители привлекаются к процессу принятия решений при проектировании [5], в данном случае мы имеем дело с непосредственным физическим воздействием обитателя на среду. Этот феномен мы предлагаем называть **деятельным соучастием**. Такая форма соучастия близка идеям Г. Хертцбергера, выдвинувшего концепцию аппроприации, исходящую «из согласования функций архитектора и обитателя: создания базового архитектурного решения одним и осуществления самодеятельности в очерченных этим решением рамках другим» [6].

Если распространить предложенную К.В. Кияненко систему разновидностей соучаствующего проектного процесса с архитектурных объемов на внеархитектурное пространство, деятельное соучастие в разных случаях может быть отнесено к ассистируемому самострою, ядровому жилищу, самодеятельной проеткно-строительной комбинаторике и включенному проектированию [6].

Особенностью деятельного соучастия является локальный масштаб производимых преобразований — речь идет здесь о внеархитектурных пространствах, соизмеримых с человеком — они наиболее близки к повседневной деятельности обитателя, его пониманию города, являются частью его вернакулярного района, определяют территориальную идентичность и локальный патриотизм [7]. В соответствии с областью применения понятия деятельное соучастие, относящейся к открытым городским пространствам локального масштаба, необходимо отметить важную роль в этом феномене ландшафтного дизайна, объектом которого, согласно определению А. В. Сычевой, так же являются «пространства, соизмеримые с человеком, его повседневной деятельностью» [8].

Существует мнение, что самодеятельная архитектура создает строительный продукт низкого качества [1]. Это отчасти справедливо и для деятельного соучастия. Действительно, в случае, когда архитектор участвует в процессе формирования среды только на этапе создания архитектурного каркаса, за неимением необходимых знаний и опыта, финансовых средств и материальных ресурсов, плоды деятельного соучастия могут быть не оптимальны, не эстетичны и не экологичны. Но даже если некоторая часть преобразований неудачна, в целом достигаются такие положительные эффекты, как возвращение городской среде сомасштабности с человеком, функциональная оптимизация среды, увеличение биологического разнообразия и экологической устойчивости среды, изменение ее эстетических качеств, формирование узнаваемых элементов и «духа места», сплочение территориальных сообществ, снижение средового вандализма и др.

Несмотря на то, что положительных последствий деятельного соучастия в жилой среде много, нельзя все же не учитывать факт, что обитатели не являются носителями профессиональных знаний, а это зачастую приводит к неблагоприятным последствиям. Применительно к ландшафтному дизайну в жилой городской среде это: неправильное размещение зеленых насаждений (не учитывается расположение коммуникаций, влияние растений на инсоляцию помещений, противопожарные нормы, нормы транспортной видимости, техника безопасности, агротехника и особенности работы с растениями, требования к условиям среды, особенности роста и совместимость растений), не оптимальная функциональная организация пространств, негармоничное и хаотичное расположение объектов, игнорирование факта, что дворовая территория – коммунальное пространство, при преобразовании которого необходимо учитывать интересы соседей.

Мировая практика обладает обширным набором примеров деятельного соучастия — это и партизанское садоводство [9], и городское огородничество, и многочисленные волонтерские движения по озеленению городов и экологическому стилю жизни. В настоящее время в

Нижнем Новгороде и других городах России предпринимается множество попыток оптимизации и стимулирования деятельного соучастия в рамках разнообразных проектов, конкурсов и грантов, таких как «Город, в котором хочется жить» [10], «Центр активных людей» [11], «Карта зеленых точек» [12] и др. Наблюдается положительная тенденция по оказанию материальной, финансовой и организационной поддержки активных жителей администрацией. К процессу, однако, практически не привлекаются архитекторы, в то время как именно конструктивный диалог специалиста и обитателя представляется основополагающим фактором позитивных результатов деятельного соучастия.

С учетом обозначенных выше положительных и отрицательных сторон рассматриваемого феномена к взаимодействию с обитателем предлагается привлекать профессионалов, в частности ландшафтных архитекторов. Необходимо расширить сферу ответственности архитекторов с только проектирования архитектурного каркаса до плотной работы с обитателями на всех этапах формирования среды, в т.ч. и на этапе функционирования. Особенно актуально это в уже существующих городских районах с низкими качествами среды. В результате появляется возможность преодолеть проблемы, связанные с отсутствием профессиональных знаний у обитателя, сохраняя при этом положительные стороны деятельного соучастия. Необходима пространственная и качественная регламентация деятельного соучастия, оказание консультационной помощи обитателям, осуществление контроля за результатами со стороны профессионалов. Это может быть обеспечено в рамках уже существующих административных проектов при некоторой их модернизации.

Список литературы

1. *Кияненко, К.В.* Общество, среда, архитектура: социальные основы архитектурного формирования жилой среды : учеб. пособие / К.В. Кияненко ; Волог. гос. ун-т. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Вологда : ВоГУ, 2015. – 284 с. : ил.
2. *Снигирева, Н.В.* Архитектурное формирование жилой среды, как проблема коммуникаций [Электронный ресурс] / Н.В. Снегирева // Архитектон: известия вузов. – 2012. – № 38. – Режим доступа : http://archvuz.ru/2012_22/60 (дата обращения 30.09.2015).
3. *Булинина, Н.С.* География жилой застройки в Нижнем Новгороде в прошлом и настоящем / Н.С. Булинина // Ярославский педагогический вестник. – 2013. – Т. III (Естественные науки), № 4. – С. 246-253.
4. *Нефедов, В.А.* Архитектурно-ландшафтная реконструкция как средство оптимизации городской среды [Электронный ресурс] : дис. … д-ра архитектуры : 18.00.04 / В.А. Нефедов. – Москва, 2006. – Режим доступа : http://www.rsl.ru/.
5. *Creighton, James L.* The public participation handbook : Making better decisions through citizen involvement / James L. Creaighton. – 1st ed. –Jossey-Bass A Wiley Imprint, 2005. – 261 p.
6. *Кияненко, К.В.* Архитектура и социальное моделирование жилища [Электронный ресурс] : дис. … д-ра архитектуры : 18.00.02 / К.В. Кияненко. – Вологда, 2006. – Режим доступа : http://www.rsl.ru/.
7. *Пузанов, К.А.* Внутригородская самоорганизация общества на примере США, России и стран Европейского союза: автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.24 / К.А. Пузанов. – Москва, 2012. – 23 с.
8. *Сычева, А.В.* Ландшафтная архитектура: учеб. пособие для вузов / А.В. Сычева. – 2-е изд., испр. – Москва: Издат. дом «Оникс 21 век», 2004. – 87 с. : ил.
9. Guerilla Gardening [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.guerrillagardening.org/, свободный.
10. Город, в котором хочется жить [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gorduma.nnov.ru/?id=11456 (дата обновления 06.08.2013).
11. Центр активных людей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.rucal.ru/.
12. Карта зеленых точек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.greenspotmap.ru/.

05.07.05

Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего профессионального образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (ПНИПУ), аэрокосмический факультет, кафедра Ракетно-космическая техника и энергетические системы, Центр высокопроизводительных вычислительных систем, Пермь, d.fedorovtcev@gmail.com, pisarev85@live.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

В рамках исследований был предложен альтернативный вариант генератора электрической энергии для элетрохимзащиты трубопроводов с минимальной стоимостью обслуживания при неизменных выходных характеристиках. В работе представлены физическая и математическая модели, разработана методика численного расчета, проведено численное моделирование отвода тепла в термоэлектрическом преобразователе энергии в связанной постановке. Численный эксперимент проводился с использованием многопроцессорного программного комплекса ANSYS CFX.

Ключевые слова: *численное моделирование, газодинамический расчет, термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье.*

Эксплуатация современных подземных конструкций связана с интенсивными динамическими нагрузками и неблагоприятными условиями их эксплуатации. В местах деформации возникает электрохимическая коррозия. Данную задачу возможно решить путем разработки инновационных высокотехнологичных средств защиты на базе электрохимзащиты (ЭХЗ). ЭХЗ существенно продлевает сроки эксплуатации сооружений, снижает расходы на проведение ремонтных мероприятий.

Для выработки электроэнергии в рамках данного метода был разработан термоэлектрический генератор (ТЭГ) на основе Пельтье-элемента, принцип действия которого заключается в появлении электродвижущей силы в замкнутой цепи из спая полупроводников при условии наличия разности температур в местах контактов. Между свободными сторонами термоэлемента возникает разность потенциалов. В момент замыкания термоэлемента на внешнюю нагрузку в цепи возникает постоянный электрический ток. Таким образом, происходит преобразование тепла, полученного от сжигания топлива, в электрическую энергию.

Корпус камеры термопреобразования представляет полую призму, на передней стенке расположено отверстие для крепления горелки, на задней поверхности – отверстие для выхода продуктов сгорания. Ширина каждой грани и длина корпуса пропорциональна габаритам термоэлектрического генераторного модуля (ТГМ). При использовании среднетемпературных ТГМ с габаритами 260x92x30мм рационально использовать горячий корпус с десятью крепежными гранями. Длина корпуса – 2000 мм, диаметр – 880 мм, ширина каждой грани – 280 мм. На гранях корпуса расположены ТГМ и радиаторы охлаждения.

Рассматривается следующая задача. Имеется твердотельная полая конструкция с входным и выходным отверстиями. На гранях конструкции расположены термоэлектрические модули и радиаторы охлаждения. Во входное отверстие подаются продукты сгорания газа. Охлаждение радиаторов – пассивное, без нагнетания холодного воздуха.

Для проведения численного моделирования отвода тепла в ТЭГ использовались следующие исходные данные: материал полой конструкции – сталь 20; материал термоэлектрических модулей – висмут; материал радиаторов охлаждения – алюминий; температура окружающей среды – 293 К; температура продуктов сгорания – 1073 К; скорость входа продуктов сгорания – 2 м/с.

При моделировании принимались следующие допущения:

- рабочей температурой устройства является температура пластины-держателя в реперной точке;

- все материалы элементов конструкции однородны по составу и изотропны по свойствам;
- контакты между элементами идеальны;
- боковые поверхности теплоизолированы.

Уравнение нестационарной теплопроводности для теплового блока записывается следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\rho_i \cdot c_{pi} \cdot T_i\right) - div\left(\lambda_i \cdot gradT\right) = S_{Ti}, \qquad (1)$$

где $T = T(\Omega_i, \tau)$, К – температура; c_{pi}, Дж/(кг*К) – теплоемкость; ρ_i, кг/м^3 – плотность; λ_i, Вт/(м*К) – коэффициент теплопроводности; τ, с – время; S_{Ti}, Вт/м^3 – источниковый член, учитывающий источники и стоки теплоты.

Начальное условие:

$$T(\Omega_i)\big|_{\tau=0} = T_0. \qquad (2)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} &\left(-\lambda_1 \cdot gradT, \vec{n}\right)\big|_{\Gamma_1} = \alpha_1 \cdot \left(T_1 - T_{f1}\right)\big|_{\Gamma_1}, \\ &\left(-\lambda_5 \cdot gradT, \vec{n}\right)\big|_{\Gamma_5} = \alpha_5 \cdot \left(T_5 - T_{f5}\right)\big|_{\Gamma_5}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где T_{fi}, К – температура окружающей среды; α_i, Вт/(м^2*К) – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи воздуха со стороны соответствующего элемента; $\vec{n}$ – единичный вектор внешней нормали.

Движение газа описывается уравнением Навье-Стокса для сжимаемой жидкости:

$$\begin{aligned} &\rho\left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k}\right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\mu\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{i,k}\frac{\partial v_l}{\partial x_l}\right)\right) + \frac{\partial}{\partial x_k}\left(\zeta \frac{\partial v_l}{\partial x_l}\delta_{i,k}\right), \\ &\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{v}\right) = 0, \end{aligned} \qquad (4)$$

где ρ – плотность, p – давление, μ – коэффициент динамической вязкости, ζ – объемная вязкость, $\delta_{i,k}$ – дельта Кронекера.

Ввиду симметрии геометрии расчет проводился на отдельном сегменте (рис. 1), что позволило сократить время расчета и сэкономить вычислительные ресурсы.

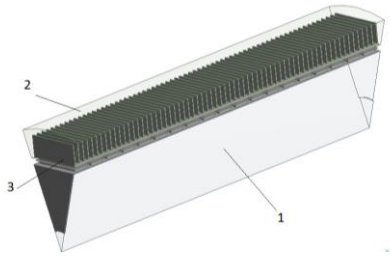


Рис. 1 – Геометрическая модель: 1, 2 – области для газодинамического расчета, 3 – область для расчета теплообмена в твердотельной конструкции

Задача решалась в связанной постановке, поэтому сегмент необходимо разбить на три области: область газодинамического расчета и область расчета конвективного охлаждения радиаторов, расчет теплопроводности в термоэлетропреобразователе-радиаторе – твердотельная конструкция. Для объединения решения газодинамического расчета и расчета теплообмена задан интерфейс на сопряженных сторонах расчетных областей.

В качестве элемента расчетной сетки был выбран тетраэдр. Минимальный размер элемента – 1 мм, максимальный – 10 мм.

В результате расчета были получены поля температуры, давления и распределение векторов скоростей в различных плоскостях и сечениях. Распределение поля температуры в ТГМ и радиаторе охлаждения представлено на рисунке 2. Значения температуры возрастают в направлении течения продуктов сгорания. Максимальное значение составило 936 К, минимальное – 839 К.

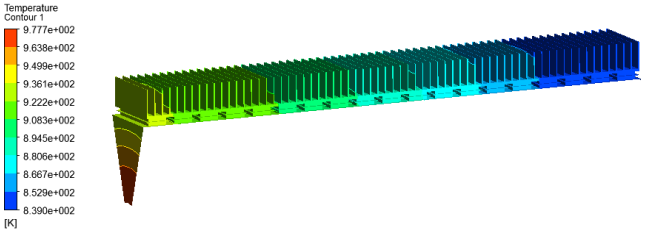


Рис. 2 – Распределение поля температуры по поверхности термоэлектрических модулей и радиаторе охлаждения

Температура продуктов сгорания внутри полой конструкции (рис. 3) понижается по мере отдаления от центра к стенкам. Максимальное значение – 1084 К, минимальное – 840 К.

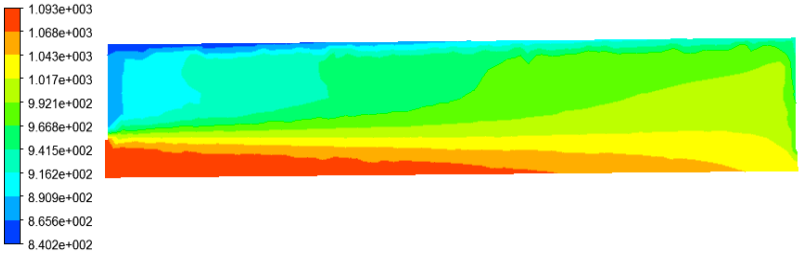


Рис.3 – Температура продуктов сгорания

Давление на стенках полой конструкции распределено величиной 3,838 атм.

Распределение векторов скоростей продуктов сгорания внутри полой конструкции представлено на рисунке 4. Максимальное значение – 4,654 м/с, минимальное – 0.

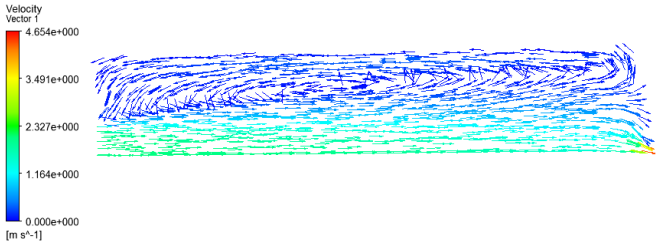


Рис. 4 – вектора скоростей продуктов сгорания в плоскости

Результаты полученных численных расчетов подтверждают физичность и адекватность модели. Температура на горячей стенке равна 887,2 К и близка к рекомендуемой (773 К), однако температура на охлаждающих радиаторах слишком высока 839 К. При этом температура возрастает в направлении течения продуктов сгорания. Данные значения температур обуславливаются режимами подачи продуктов сгорания, интенсивностью системы охлаждения радиаторов, а также образованием избыточного давления на выходе из горячего корпуса.

В целях получения значений температур близких к рекомендуемым в дальнейшем планируется провести численный эксперимент с уточненными режимами подачи продуктов сгорания.

Список литературы

1. *Беспалов Н.Н., Попов А.А.*, Устройство для термостатирования полупроводниковых приборов при определении электрических и тепловых характеристик // Казань: Научно-технический вестник Поволжья, №2 2014г. – 254 с.

2. *Писарев П.В., Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.,* Решение междисциплинарных задач на примере взаимодействия струи горячего газа с металлической преградой// Механика и процессы управления, Том 1., - Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. М.: РАН, 2011 С. 123.

3. *Писарев П.В., Зимин Д.В., Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.*, Численное моделирование взаимодействия в динамической системе «газ-конструкция» // Механика и процессы управления, Том 1., - Материалы XXXXI Всероссийского симпозиума. М.: РАН, 2011 С. 127.

4. *Флетчер К,.* Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х томах: Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с, ил. ANSYS CFX v.10. Release. Theory Reference.

05.09.03

Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждения высшего профессионального образования "Пермский национальный исследовательский политехнический университет" (ПНИПУ), аэрокосмический факультет, кафедра Ракетно-космическая техника и энергетические системы, Центр высокопроизводительных вычислительных систем, Пермь, d.fedorovtcev@gmail.com, pisarev85@live.ru

РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТЫ ГАЗОПРОВОДОВ

В рамках исследований был предложен альтернативный вариант генератора электрической энергии для элетрохимзащиты трубопроводов с минимальной стоимостью обслуживания при неизменных выходных характеристиках. В работе описан принцип работы термопреобразователя энергии на основе элемента Пельтье, предложена общая конструкция корпуса камеры термопреобразования и генераторной установки.

Ключевые слова: *термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье, электрохимзащита газотрубопровода.*

Эксплуатация современных подземных сооружений и конструкций связана с интенсивными динамическими нагрузками и неблагоприятными условиями их эксплуатации. В тех местах, которые подверглись деформации, начинается электрохимическая коррозия. Данную задачу возможно решить путем разработки инновационных высокотехнологичных средств защиты на базе электрохимзащиты (ЭХЗ).

Все подземные коммуникации и сооружения имеют электродный потенциал – 0,5-0,7 Вольта. Используя катодный ток, это значение можно существенно снизить. Скорость коррозии в этом случае значительно уменьшается. Таким образом, ЭХЗ трубопроводов значительно продлевает срок их. В настоящее время нефтегазовые компании для выработки тока в особо отдаленных и труднодоступных районах в рамках указанного метода используются дизельные генераторы и паротурбогенераторы. Однако, стоимость обслуживания неоправданно высока, что обуславливает актуальность разработок более экономичных технологий выработки электрической энергии.

Предлагаемое решение основано на понятии Пельтье элемента [1,2]. Элемент Пельтье – это термоэлектрический преобразователь, принцип действия которого заключается в появлении электродвижущей силы в замкнутой цепи при условии наличия разности температур в местах контактов. Термоэлектрический модуль представляет собой совокупность термопар, состоящих из двух разнородных элементов с p- и n- типом проводимости (рис. 1).

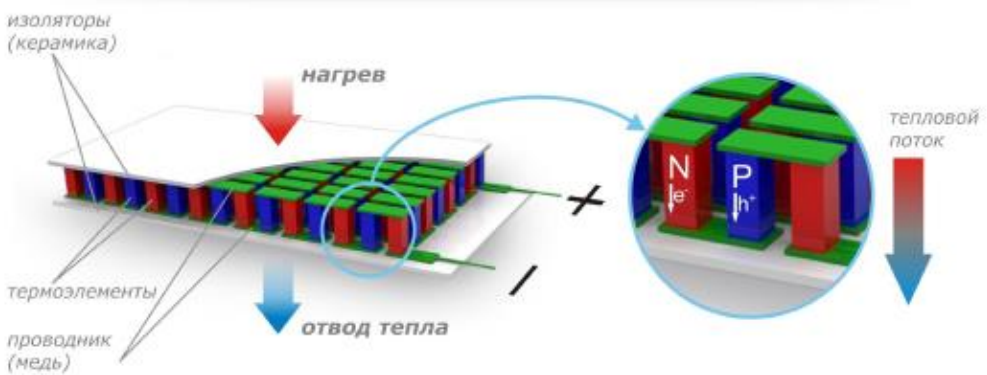


Рис. 1 – Устройство и принцип работы термоэлектрического модуля

При обеспечении разности температур на сторонах модуля – одна сторона холодная (охлаждается), а другая горячая (нагревается), – в полупроводниках происходит p-n переход, возникает разность потенциалов [3]. В момент замыкания термоэлементов на внешнюю

нагрузку в цепи возникает постоянный электрический ток. Величина тока будет пропорциональна разности температур. Таким образом, происходит преобразования тепла в электрическую энергию.

Проектируемый термоэлектропреобразователь энергии базируется на применении среднетемпературных генераторных модулей. Данные генераторные модули имеют параметры, приведенные в таблице.

Таблица – Технические характеристики генераторных модулей

Габаритные размеры (мм)	Размеры установочные	Iнагр. (А)	Uнагр. (В)	Ri* (Ом)	P (Вт)	КПД (%)	Вес (Кг)
260x92x30,0	171x68x12,5	9.6	6.8	0.70	65	7.4	0,855

Оптимальная температура холодной стороны составляет 70° С.

Оптимальная температура горячей стороны – 570° С.

Среди характеристик предлагаемого решения можно отметить некоторые технические и эксплуатационные преимущества.

Технические преимущества:

- система статична, содержит минимальное количество подвижных частей и, как следствие, имеет нулевой износ;
- установка имеет резервные системы горения и управления;
- имеется возможность удаленного пуска и останова;
- отсутствуют части под высоким избыточным давлением.

Эксплуатационные преимущества:

- установка модульная, не требует привлечения специализированного персонала для монтажа и технического обслуживания (ТО);
- установка позволяет выполнять оперативное вмешательство с целью ТО в короткие сроки и имеет быстро заменяемые основные компоненты (компоненты могут быть восстановлены с наименьшими затратами и благодаря своим размерам и весу легко транспортируются);
- время работы установки между ТО не менее 30000 часов;
- продолжительность срока службы не менее 30 лет;
- постепенный, прогнозируемый выход из строя установки, обусловлено большим количеством термоэлементов (более 1000).

Рассмотрим общую конструкцию термоэлектропреобразователя.

Термоэлектропреобразователь (рис.2) содержит узел нагревателя (горячий корпус), узел охладителя (радиаторы охлаждения) и батареи термоэлементов, выполненные в виде модулей, которые собраны в блок, размещенный между узлами нагревателя и охладителя.

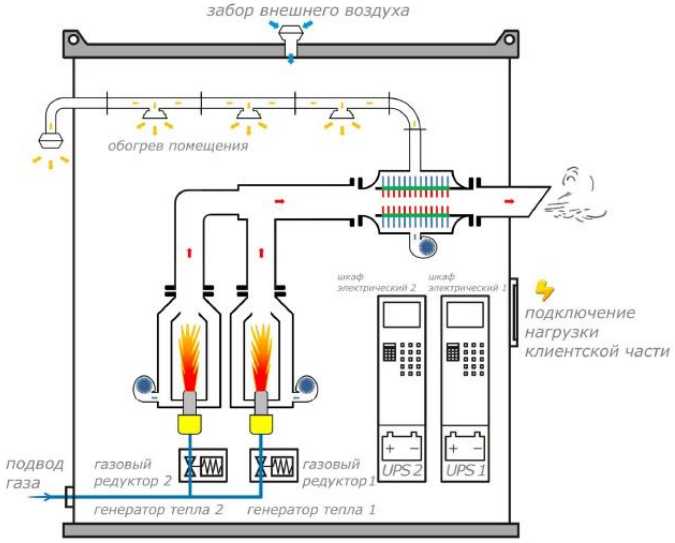


Рис. 2 – Принципиальная схема устройства термоэлектропреобразователя энергии

Нагрев поверхности горячего корпуса происходит за счет конвекционного тепла полученного в результате сжигания газа газовой горелкой. Одновременно происходит охлаждение холодных спаев термоэлементов за счет протекания потока воздуха между ребрами радиаторов

Между горячим и холодными спаями термоэлемента возникает разность температур, благодаря эффекту Зеебека в модулях происходит преобразование энергии , которую можно направлять в полезную нагрузку общего электрического контура.

Все части термоэлектропреобразователя расположены в стандартном блок-боксе (рис.3). Габаритные размеры 6058 х 2438 х 2591 мм.

Резервная горелка предназначена для нештатных ситуаций, когда использовать основную горелку невозможно. Также горелки можно использовать поочередно с заданным интервалом времени для увеличения срока службы и снижения их износа.

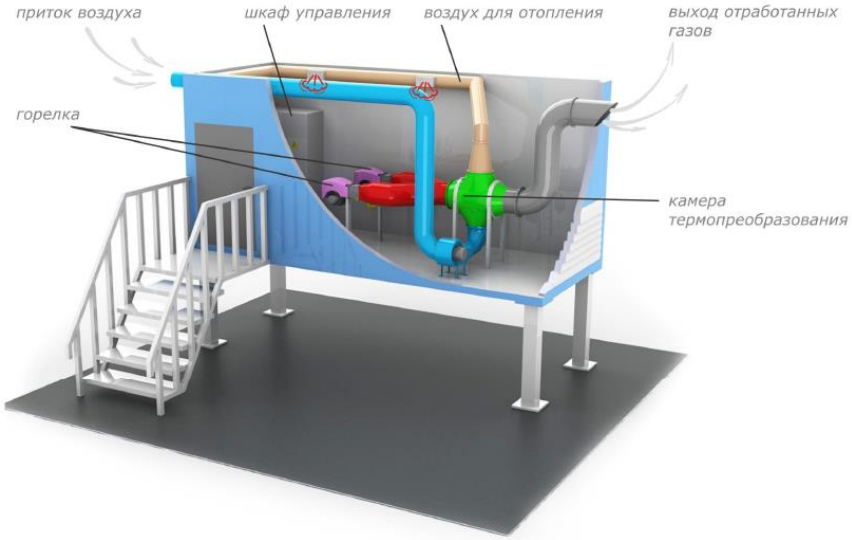


Рис.3 – Планируемое внутреннее расположение элементов термоэлектропреобразователя энергии

Источники бесперебойного питания предназначены для нештатных ситуаций, в случаях, когда процесс термопробразования остановлен. Мощности источника питания достаточно для обеспечения процесса электрохимзащиты на время устранения причин остановки.

Средства удаленной связи предназначены для управления и мониторинга всех протекающих процессов. Побочное тепло расходуется на обогрев помещения в холодные периоды. Выход отработанных газов выведен дымоходом наружу.

Таким образом, предлагаемое решение не имеет полных аналогов среди существующих и обладает существенными преимуществами перед частичными аналогами. Кроме того, использование предложенного термопреобразователя не ограничивается нефте- и газоперерабатывающей областью, возможно дальнейшее развитие технологии в химической, машиностроительной и аэрокосмической областях.

Список литературы

1. *Анатырчук Л.И.,* Термоэлементы и термоэлектрические устройства// Киев: Наукова думка, 1979, с.460.

2. *Беспалов Н.Н., Попов А.А.,* Устройство для термостатирования полупроводниковых приборов при определении электрических и тепловых характеристик // Казань: Научно-технический вестник Поволжья, №2 2014г. – 254 с.

3. *Вейник А.И.,* Термодинамическая пара// Минск: Наука и техника, 1973. с.384.

05.02.07

Р.М. Хусаинов, И.И. Мубаракшин, А.Р. Сабиров

Набережночелнинский институт Казанского Федерального Университета
Автомобильное отделение, кафедра «Конструкторско - технологическое обеспечение машиностроительных производств», Набережные Челны,
rmh@inbox.ru, mubarakshin_irek@mail.ru, A.Sabirov.R@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ.

В статье рассматриваются особенности расчетно-экспериментального исследования статических упругих деформаций при обработке на вертикально-фрезерных станках. Обращается внимание на особенности построения расчетных моделей металлорежущих станков, методы экспериментальной проверки. Анализируется влияние упругих деформаций на погрешности обработки.

Ключевые слова: *металлорежущие станки, конечно-элементный анализ, жесткость, UNIGRAPHICS NX.*

Ключевое требование к технологическому процессу изготовления детали – это обеспечение заданной точности. Точность обрабатываемых деталей формируется широким спектром факторов, действующих в технологической системе. Одним из наиболее влияющих факторов являются упругие деформации. Их величина во многих случаях может быть настолько значительной, что приведет к возникновению брака. Кроме того, они влияют также на виброустойчивость металлорежущих станков [1, с. 34]. Исходя из значительного влияния упругих деформаций на точность обработки, актуальной задачей является их предварительная оценка. Это необходимо, чтобы убедиться, что технологическая система способна изготовить детали с заданной точностью. Для решения этой задачи возможны два подхода:

- Экспериментальный, при котором происходит изготовление пробной детали. Этот подход является наиболее достоверным, но требует значительных затрат, особенно в случае изготовления дорогостоящих деталей.
- Расчетный. Одним из вариантов этого подхода является конечно-элементное моделирование станка с последующим расчетом в какой-либо из CAE-систем. Такой подход позволяет достаточно быстро выполнить данную задачу, не занимая при этом производственное оборудование. Однако для применения этого подхода необходимо убедиться в адекватности построенной модели. Для этого также необходима экспериментальная проверка. Однако она может быть выполнено достаточно быстро, во время организационных простоев и не используя при этом дорогостоящие заготовки.

Предварительная оценка деформаций должна быть произведена с учетом всех элементов технологической системы – станка, приспособления, инструмента – как режущего, так и вспомогательного, заготовки. Поскольку в общем балансе деформаций технологической системы именно эти элементы оказываются слабыми звеньями [2, с. 171]. Кроме того, собственные деформации заготовки, выявленные при таком анализе, могут дать повод к пересмотру схемы базирования и закрепления. и вообще к изменению конструкции приспособления.

Исследование проводилось в три этапа:

1. Расчётный этап.

На этом этапе была создана трехмерная модель системы станок – приспособление – инструмент – заготовка. Моделирование выполнялось в программном комплексе UNIGRAPHICS NX.

Конечно-элементный расчет выполнялся в той же программе, в модуле «Расширенная симуляция». Особенности расчета, применительно к технологической системе, диктуют учет следующих факторов:

- Нагрузки. Было использовано допущение, что на результаты решения задачи оказывают влияние только силы, возникающие при резании. Силы резания определялись по эмпирическим закономерностям для составляющих Px, Py, Pz, далее путем квадратичного суммирования была определена их равнодействующая. Согласно третьему закону Ньютона, равнодействующие были приложены к заготовке и к инструменту в точке их контакта при резании.
- Граничные условия (ограничения). В качестве граничного условия, ограничивающего смещение сборной модели как твердого тела, моделировалось крепление станины к фундаменту. Жесткость крепления к фундаменту вносит свой вклад в восприятие нагрузок. Поэтому недостаточно принимать в качестве ограничения заделку. Станок был установлен на виброизолирующие опоры ОВ-31, которые имеют свою податливость, которую необходимо было учитывать в процессе моделирования. Поэтому в качестве ограничений была построена 0D сетка со свойствами CBUSH (Grounded). Этот вид сетки позволяет имитировать пружину, прикрепленную одним концом к станине, другим — к фундаменту, что и позволяет моделировать установку станка на виброизолирующей опоре.
- Условия контакта моделей в сборке. Моделированию связей между элементами в сборной модели необходимо придавать большое значение, поскольку на долю смещений в контактах приходится до 80-90% всех деформаций станка, и неправильное моделирование контактов может привести к неадекватным результатам [3, с. 156-167; 4, с. 33-38; 5, с. 292-295].

Далее, согласно заданным условиям, NX Nastran производит решение системы уравнений, соответствующих линейному статическому анализу, определяя при этом напряженно–деформированное состояние технологической системы (рис. 1).

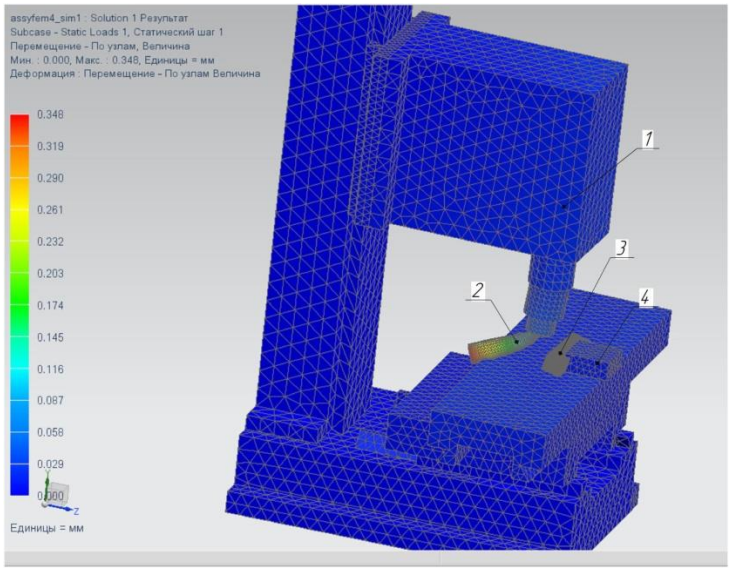


Рис. 1 – Карта результатов расчета
1-станок, 2- инструмент, 3-заготовка, 4- базовый упор

По результатам расчета можно оценить деформированное под заданной нагрузкой состояние системы, в том числе, рассчитать деформации заготовки и инструмента в определенных точках. Пользуясь этим, определили деформации точек, принадлежащих инструменту и заготовке. Точки выбирались на участке ширины резания с интервалом 1 мм. Результирующая погрешность обработки была вычислена как алгебраическая разность деформаций точек инструмента и заготовки на соответствующих уровнях. График результирующей погрешности представлен на рис. 4.

2. Экспериментальный этап.

На этом этапе проверяем адекватность полученных результатов конечно–элементного моделирования с помощью эксперимента. На точность обработки детали влияет большое количество факторов. В нашем исследовании изучаются только упругие деформации.

Поэтому при выполнении эксперимента и обработке его результатов необходимо устранить или компенсировать источники остальных погрешностей. К ним относятся:

- Погрешности позиционирования. Для их устранения подвод фрезы к обрабатываемой поверхности и установка на глубину резания, а в дальнейшем подвод измерительного прибора, производились не по управляющей программе, а по базовому упору и концевым мерам длины (рис. 2). То есть фреза была установлена на глубину резания 2 мм, затем было измерено расстояние между фрезой 5 и базовым упором 1 (рис. 2) путем набора блока концевых мер. К этому блоку был подведен измерительный прибор при измерении (рис. 3).
- Радиальное биение инструмента. Для компенсации этой погрешности, после установки инструментальной оснастки в шпинделе, было измерено биение инструмента на его конце и в начале участка резания, рассчитана угловая составляющая биения и эти значения были вычтены из результатов измерения в соответствующих точках.
- Отклонение от прямолинейности вертикального перемещения шпиндельной бабки. Эта погрешность оказывает влияние при измерениях. Для ее компенсации были определены ее значения в точках, соответствующих точкам перемещения шпиндельной бабки при измерениях, и вычтены из результатов измерений в соответствующих точках.
- Отклонение от прямолинейности перемещения стола. Для устранения этой погрешности, измерение выполнялось на том же станке и при том же установе, что и обработка.

Эксперимент проводился в следующей последовательности:

1. Установить фрезу в сборе с патроном.
2. Измерить на фрезе радиальное биение конического отверстия шпинделя в точках, соответствующих ширине фрезерования.
3. Установить, выверить и закрепить базовый упор 1 (рис. 2).
4. Установить по базовому упору и закрепить заготовку 4 (рис. 2).
5. Выставить фрезу 5 на размер по глубине относительно базового упора 1 по концевым мерам 2 (рис. 2). Глубина резания была выбрана 2 мм.
6. Выставить фрезу на размер по высоте. Ширина обрабатываемой поверхности была принята 11 мм.
7. Выполнить фрезерование на длину 10 мм.
8. Вывести фрезу вверх, снять фрезу, установить оправку с индикатором 5 (рис. 3).
9. Выставить индикатор 5 на ноль относительно базового упора 1 по концевым мерам 2 (рис. 3).
10. Не перемещая стол по координате Y, промерить плоскостность обработанной поверхности сеткой измерений с шагом 1 мм (рис. 3,б). Записать отклонения индикатора. Пересчитать результаты с учетом биения по п.2.
11. Определить отклонение от прямолинейности вертикального перемещения
12. Пересчитать результаты с учетом 11.

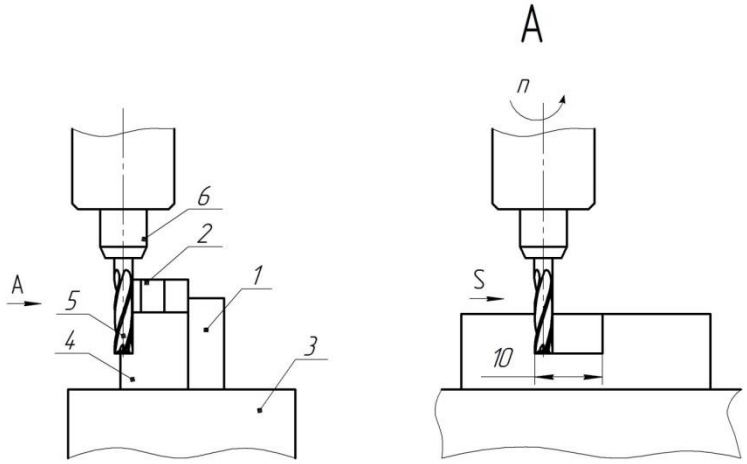
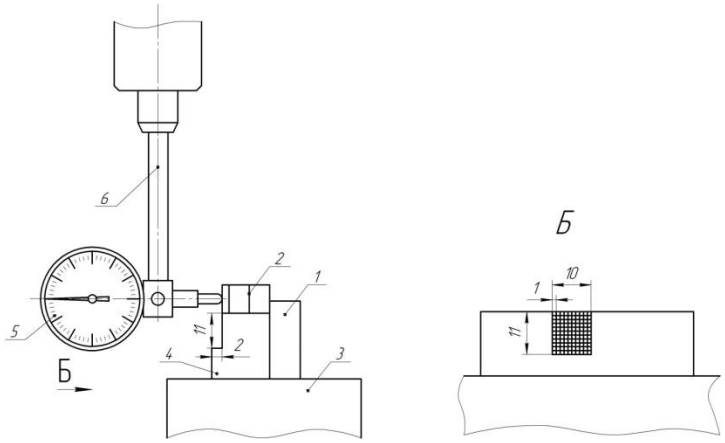


Рис. 2 – Схема фрезерования и выверки фрезы
1-базовый упор, 2- блок концевых мер, 3-стол станка, 4- заготовка, 5-фреза, 6- оправка



а) б)

Рис. 3 – Схема измерения и выверки индикатора
1-базовый упор; 2- блок концевых мер; 3-стол станка;
4- заготовка; 5-индикатор часового типа; 6- оправка

По результатам выполнения п. 12 построен график средних отклонений точек обработанной поверхности (рис. 4).

3. Анализ результатов исследований

При сравнении расчётных и экспериментальных данных, видно, что распределение деформаций по ширине обработки на обоих графиках похоже и отличается только значениями. Деформации равномерно возрастают с увеличением координаты ширины резания, и наибольшие деформации наблюдаются на конце участка обработки – на уровне 11 мм. Это объясняется изгибом инструмента (рис. 1). Имеется участок, выбивающийся из общей схемы – в начальных точках ширины резания – здесь также наблюдается некоторое увеличение деформаций. Это можно объяснить отгибом верхнего края заготовки. Таким образом видно, что результаты эксперимента подтверждают качественную и количественную характеристику распределения деформаций, полученную в расчетном этапе. По их результатам видно, что наибольшее из всех деформаций технологической системы, влияние на погрешности обработки оказывают деформации именно инструмента и заготовки.

Как видно из графиков, упругие деформации приводят к возникновению отклонений от плоскостности обрабатываемой поверхности и ее отклонений от перпендикулярности базовой поверхности. Абсолютные деформации достигают 350 мкм, что свидетельствует о недостаточной жесткости системы, в особенности инструментальной. Обработка прецизионных деталей в таких условиях недопустима. Для увеличения жесткости следует предпринять следующие меры:

- Увеличить диаметр или уменьшить длину вылета инструмента.
- Внести корректировки в технологический процесс обработки, изменив режимы резания, тем самым уменьшить силы резания.
- Использовать более жесткую оснастку для крепления или изменить схему базирования заготовки.

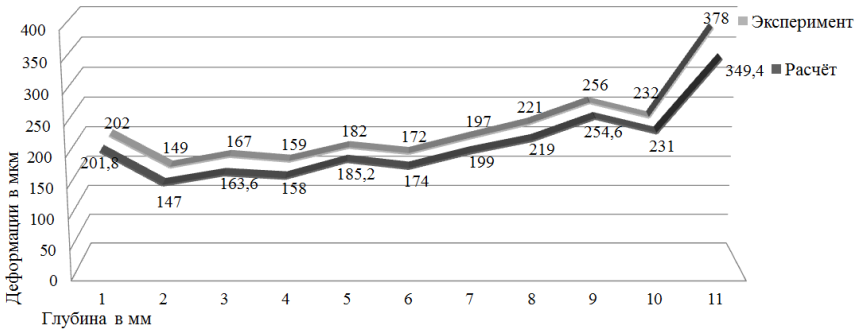


Рис. 4 – График сравнения расчётного и экспериментального этапов

Вывод.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что конечно – элементное моделирования даёт адекватные результаты, имеет небольшие отклонения от экспериментальных значений. Этот факт позволяет использовать на практике данный метод для предварительной оценки упругих деформаций при обработке на различном металлорежущем оборудовании, что позволит сократить возможность появления брака, проверить надёжность технологической системы.

Список литературы

1. *Кудинов В.А.* Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967 – 359 с.
2. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. *Гончаров П.С.* NX Advanced Simulation. Инженерный анализ / *Гончаров П.С., Артамонов И.А., Халитов Т.Ф., Денисихин С.В., Сотник Д.Е.* – М.: ДМК Пресс, 2012. – 504 с.
4. *Левина З.М., Решетов Д.Н.* Контактная жесткость машин. М.: Машиностроение, 1971. - 264 с.
5. *Рудаков К.Н.* FEMAP 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. - К.: КПИ, 2011. - 317 с.

05.13.11

М.А. Черноскутов[1,2], М.Л. Гольдштейн[1] к.т.н.

[1] Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,
[2] Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
Екатеринбург, mach@imm.uran.ru

АНАЛИЗ ОБЪЕМА ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ АЛГОРИТМЕ ПОИСКА В ШИРИНУ НА ГРАФЕ

Представлен анализ объема передаваемых сообщений в двух различных реализациях параллельного алгоритма поиска в ширину на графе. Первая из реализаций представляет собой поиск в ширину с точечными обменами данных. Вторая реализация – поиск в ширину с "обратным" направлением обхода и синхронизацией данных посредством битовой маски. Показано, что использование первой реализации обладает большими накладными расходами на промежуточных итерациях, в то время как вторая реализация демонстрирует умеренный объем накладных расходов на протяжении всего времени исполнения алгоритма.

Ключевые слова: *поиск в ширину, параллельные вычисления, передача сообщений, битовая маска.*

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №14-07-00435. При проведении работ был использован суперкомпьютер "Уран" ИММ УрО РАН.

1. Введение

Поиск в ширину является одним из наиболее известных и распространенных алгоритмов на графах. Он используется в различных практических приложениях науки, таких как биоинформатика, криптография, физическое и математическое моделирование и т.д.

Алгоритм поиска в ширину на графе имеет множество вариантов параллельной реализации. При распараллеливании, теоретически, каждый поток может обрабатывать часть вершин (или даже единичные вершины, при использовании массивно-параллельных вычислительных систем, таких как GPGPU-ускорители вычислений [1], или сопроцессоры с архитектурой Intel MIC).

Алгоритм поиска в ширину на графе относится к задачам класса "data intensive" [2], отличительной особенностью которых является нерегулярный шаблон доступа к памяти. В этом случае, доступ к данным определяется внутренней структурой самих данных [3]. В общем случае использования алгоритмов на графах, заранее нельзя точно знать, в какой ячейке памяти будут храниться данные о вершинах и ребрах, которые должны быть обработаны на следующих итерациях алгоритма. При обработке больших графов на многопроцессорных вычислительных системах возникают дополнительные трудности в виде межпроцессных коммуникаций, которые замедляют общее время исполнения алгоритма.

2. Параллельные алгоритмы поиска в ширину на графе

В данной статье рассмотрено две реализации параллельного алгоритма поиска в ширину на графе: с прямым и обратным [4] направлением обхода.

В первом алгоритме (с прямым направлением обхода) используется известная схема обхода, когда родительская вершина помечает все свои соседние вершины (см. Алгоритм 1).

Входные данные: массив вершин `V`, корневая вершина `s`

Выходные данные: массив расстояний `dist`, содержащий значения дистанций от корневой до всех остальных вершин, массив `pred`, содержащий номера предшествующих вершин

Функции: `check_end()`, возвращающая `1` если текущая итерация была последней и `0` в других случаях

```
 1  for all u in dist
 2        dist[u] ← -1
 3  dist[s] ← 0
 4  level ← 0
 5  do
 6        parallel for each vert in V
 7              if dist[vert] = level
 8                    for each neighb in vert.neighbors
 9                          if dist[neighb] = -1
10                                dist[neighb] ← level + 1
11                                pred[neighb] ← vert
12        level++
13  while(!check_end())
```

Алгоритм 1. Псевдокод параллельного алгоритма поиска в ширину на графе (прямой обход)

В строках 1-4 описана инициализация алгоритма, а основной цикл расположен в строках 6-12. При этом, для использования данного параллельного алгоритма на многопроцессорных вычислительных системах необходимо правильно выстроить обмены данными между вычислительными узлами. Так, обновление состояния вершины в строках 9-11 возможно только для тех вершин, которые находятся на том же узле, что и их вершина-предшественник. Информацию для разметки остальных вершин необходимо передать на тот вычислительный узел, где они хранятся. Передача осуществляется посредством точечных пересылок данных в MPI.

Во втором параллельном алгоритме поиска в ширину на графе (с обратным направлением обхода), наоборот, дочерние вершины проверяют, не является ли их родительская вершина активной на текущей итерации алгоритма (см. Алгоритм 2).

Входные данные: массив вершин `V`, корневая вершина `s`
Выходные данные: массив расстояний `dist`, содержащий значения дистанций от корневой до всех остальных вершин, массив `pred`, содержащий номера предшествующих вершин
Функции: `check_end()`, возвращающая `1` если текущая итерация была последней и `0` в других случаях

```
 1  for all u in dist
 2        dist[u] ← -1
 3  dist[s] ← 0
 4  level ← 0
 5  do
 6        parallel for each vert in V
 7              if dist[vert] = -1
 8                    for each neighb in vert.neighbors
 9                          if dist[neighb] = level
10                                dist[vert] ← level + 1
11                                pred[vert] ← neighb
12                                break
13        level++
14  while(!check_end())
```

Алгоритм 2. Псевдокод параллельного алгоритма поиска в ширину на графе (обратный обход)

В отличие от Алгоритма 1, среди соседей каждой непомеченной вершины осуществляется (см. строки 8-12) поиск активных вершин (т.е. тех, у которых значение переменной `level` равно текущему номеру итерации). Если такая вершина будет найдена, то просмотр остальных соседей прекращается. Данный алгоритм предполагает использование битовой маски, содержащей информацию о родительских вершинах на текущей итерации. Синхронизация битовой маски по вычислительным процессам осуществляется с помощью использования коллективных операций в MPI.

Однако, несмотря на то, что оба алгоритма выполняют одинаковую разметку графа, нагрузка на подсистему передачи данных при выполнении различных итераций алгоритма поиска в ширину на графе может сильно отличаться.

3. Анализ нагрузки на подсистему передачи данных

Для анализа нагрузки на подсистему передачи данных были разработаны реализации Алгоритма 1 и Алгоритма 2 с использованием технологии MPI. Тестирование проводилось на суперкомпьютере “Уран” (расположенном в ИММ УрО РАН) на 8 узлах (каждый имеет CPU Intel Xeon X5675 и 192 ГБ ОЗУ). Граф для тестирования был создан с помощью генератора Кронекера, имел 2^{25} вершин и 2^{29} ребер. При выполнении поиска в ширину измерялось время разметки вершин на каждой итерации, а также время, затраченное на синхронизацию данных о непомеченных вершинах. Результаты тестирования усреднены по 10 запускам и представлены в табл.

Таблица – результаты тестирования

№ итерации	Прямой обход		Обратный обход	
	Разметка вершин, сек	Передача данных, сек	Разметка вершин, сек	Передача данных, сек
1	0.0001	0.00007	0.11	0.016
2	0.0026	0.00004	0.09	0.003
3	0.74	0.17	0.03	0.003
4	1.99	0.34	0.01	0.003
5	0.16	0.0036	0.005	0.003
6	0.0007	0.00003	0.005	0.003
7	0.00002	0.00002	0.005	0.003

Как видно из таблицы, за счет использования точечных передач, реализация с прямым обходом имеет много накладных расходов на промежуточных итерациях (на данных итерациях приходится обрабатывать большинство вершин в графе). В то же время, реализация с обратным обходом за счет использования битовой маска (размер которой не меняется со временем) и коллективных коммуникаций демонстрирует устойчивый объем коммуникаций практически на каждой итерации поиска в ширину.

6. Заключение

В работе описан анализ объема передаваемых сообщений в двух реализациях поиска в ширину. Показано, что в реализации с прямым обходом основная нагрузка как на подсистему передачи данных, так и на вычислительную подсистему приходится на промежуточные итерации, в то время как в реализации с обратным обходом основная нагрузка приходится на начальные итерации.

В будущих работах будет проверена эффективность использования гибридной реализации, сочетающей в себе прямой обход на начальных и конечных итерациях и обратный обход на промежуточных итерациях.

Список литературы

1. *Harish P.* Accelerating large graph algorithms on the GPU using CUDA / Harish P., Narayanan P. J. // in Proceedings of the 14th international conference on High performance computing, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 197–208.
2. *Murphy R.* Introducing the Graph 500 / Murphy R., Wheeler K., Barrett B. et al. // Cray User's Group (CUG), May 5, 2010, pp. 1–3.
3. *Hendrickson B., Berry J.W.,* Graph analysis with high-performance computing, Computing in Science and Engineering, vol. 10, no. 2, pp. 14-19, 2008.
4. *Beamer S.* Direction-optimizing breadth-first search / Beamer S., Asanovic K., Patterson D. // in Proceedings of the International Conference on High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis, Salt Lake City, Utah, USA, 2012, pp. 12–22.

05.18.15

А.В. Широков, С.М. Козырева, Л.О. Широкова

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет технологий и управления им. К.Г.Разумовского», кафедра «Технологии продуктов питания и экспертизы товаров», Москва
«Институт пищевых технологий и дизайна» – филиал Государственного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный инженерно – экономический университет» кафедра «Технологии общественного питания»
careeraipt@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В работе представлены результаты исследования обогащения хлебобулочных изделий физиологическими пищевыми ингредиентами (добавками из растительного сырья) на основе – комбинированного порошка столовой свеклы (КПС), содержащего функциональные пищевые вещества растительного и животного происхождения.

Ключевые слова: *обогатительные добавки, комбинированный порошок столовой свеклы (КПС), качество хлебобулочных изделий.*

Одним из основных приоритетных направлений государственной политики в области здорового питания является - расширение отечественного производства основных видов продовольственного сырья и производства пищевых продуктов, обогащенных незаменимыми компонентами пищи.

Наиболее перспективными видами обогащаемых пищевых продуктов являются пищевые продукты, ежедневно употребляемые в пищу, каковыми являются хлеб и хлебобулочные изделия.

Для обогащения хлебобулочных изделий использовали комбинированный порошковый продукт столовой свеклы (КПС), вырабатываемый по ТУ 9199-60457533-001-2010.

КПС не имеет сильно выраженного свекольного запаха и вкуса, обладает приятным кисло-молочным вкусом, хорошо растворим в холодной воде.

При изучении влияния КПС, на хлебопекарные свойства муки и реологические свойства теста добавки вносили в дозировке от 5 до 15% по отношению к массе муки.

Установлено, что введение КПС оказывает интенсифицирующее воздействие на процесс брожения – наблюдается нарастание кислотности теста и увеличение газообразования в тесте в связи с увеличением в питательной среде легко сбраживаемых углеводов.

Снижение показателей деформации по сравнению с контролем характеризует уменьшение содержания клейковины и укреплению ее структурно-механических свойств.

Повышение упругих свойств, клейковины, видимо, является результатом образования белково-полисахаридных комплексов при взаимодействии белков муки, творожной сыворотки с полисахаридами КПС, что приводит к уплотнению структуры белкового вещества за счет дополнительного образования новых связей (ионных, водородных, гидрофобного взаимодействия). Укреплению клейковины могут способствовать полифенольные соединения, перекиси, образующиеся из ненасыщенных ЖК липидов порошков, которые оказывают ингибирующее действие на протеолитические ферменты муки и упрочняют внутримолекулярную структуру белка.

Результаты исследования показали, что характер изменения параметров фаринограмм зависит от количества КПС. Введение добавок в дозировке 5-10% от массы муки приводит к увеличению водопоглотительной способности муки, снижению разжижения теста, способствует укреплению его консистенции и повышению упругости.

Анализ динамики кислотности показал - увеличение дозировки КПС до 15 % приводит к замедлению кислотонакопления. Вероятно, это связано с конкурентным воздействием

дрожжевых клеток на молочнокислые бактерии в условиях высокого содержания сахаров, благоприятного для развития дрожжевой микрофлоры.

По результатам исследования реологических свойств теста установлена пропорциональная зависимость дозировки КПС и вязкости выбродившего теста.

В целом, по результатам исследования процессов брожения теста из пшеничной муки рекомендована дозировка КПС от 5до10,0 % к массе муки. Для определения влияния КПС на качество хлебобулочных изделий и выбора оптимальных дозировок КПС проводили серию лабораторных выпечек. Тесто готовили безопарным способом путем смешивания пшеничной муки высшего сорта, порошка, соли, сахара, дрожжей и расчетного количества воды.

Для оценки показателей качества хлебобулочных изделий применяли дескриптивный (описательный) анализ. Для описания цвета, аромата, вкуса и ощущений во рту, связанных с состоянием мякиша, было выбрано шесть терминов, при этом оценочные характеристики позволили создать «профиль» продукта.

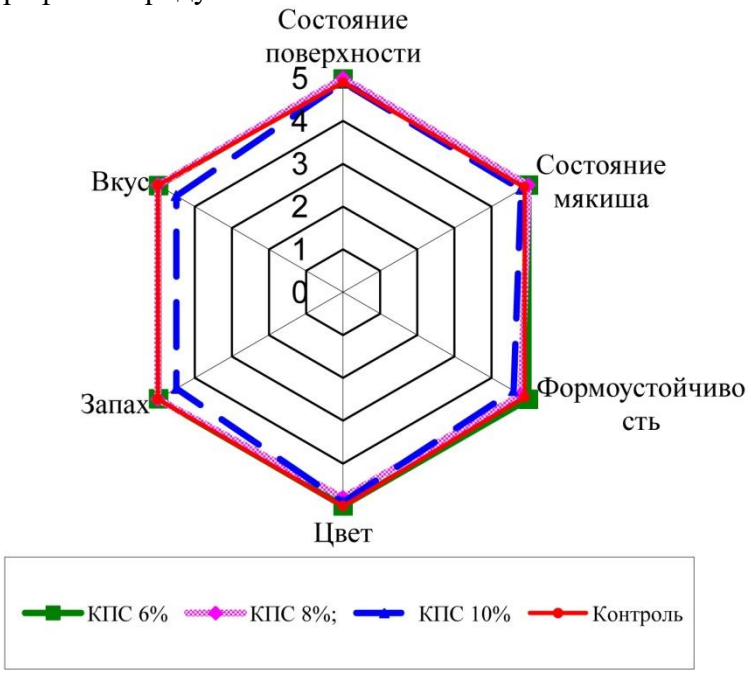


Рисунок 1 Органолептическая оценка хлебобулочных изделий из муки высшего сорта обогащенных КПС

Наивысшую оценку получил образец с дозировкой КПС 6%. По сравнению с образцами 8 и 10%-ными добавками он имеют более приятный вкус и аромат свойственный хлебу с кисломолочным оттенком, цвет мякиша – бледно-свекольного цвета, равномерной окраски. Форма правильная, поверхность корки гладкая. Образец с добавкой 10% имеет вкус и аромат свойственный хлебу с незначительным свекольный привкусом; цвет мякиша изделий – бордовый, равномерной окраски. Пористость хлеба во всех образцах равномерная, средняя, тонкостенная; мякиш – эластичный. Во всех образцах хлеба отсутствует комкуемость.

Установлено, что введение КПС улучшает качество изделий. Наиболее существенное повышение удельного объема хлеба, формоустойчивости подовых изделий, пористости и общей деформации мякиша отмечено при внесении КПС от 6% от массы муки. При этом максимальные значения физико-химических и структурно-механических показателей достигаются в пробах с 6 - 10%-ой КПС по сравнению с контролем без КПС.

Таким образом, комплекс проведенных органолептических и физико-химических, исследований подтвердил целесообразность использовать КПС в качестве обогатительной добавки для производства хлеба и хлебобулочных изделий.

Список литературы

1. *О. Вершина, В. Деревенко, Е. Милованова.* Производство хлеба повышенной пищевой ценности, обогащенного тыквенным жмыхом [Текст] / О. Вершина, В. Деревенко, Е. Милованова // Хлебопродукты. – 2010. – № 11. – С.42-43.

2. *Л.И. Войно, О.И. Конновой.* Белковые добавки грибного происхождения для обогащения хлеба [Текст] / Л.И. Войно, О.И. Коннова // Кондитерское и хлебопекарное производство. – 2011. – №7. – С.18-20.

3. *Н.И. Дерканосов.* Разработка и оценка потребительских свойств хлебобулочных изделий обогащенных яконтом. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.18.15 - Технология и товароведение пищевых продуктов и функционального и специализированного назначения и общественного питания г. Орел 2011. - С 7-10 (27 стр).

4. *В.В. Письменный.* Хлебобулочные изделия повышенной пищевой ценности на основе пектиновых смесей [Текст] / В. Письменный, А. Черкашин, Л. Скибина // Хлебопродукты. – 2006. – №10. – С.42-43.

05.20.01

[1]С.А. Шишлов к.т.н., [2]С.В. Щитов д.т.н.

[1]ФГБОУ ВПО «Приморская государственная сельскохозяйственная академия», инженерно-технологический институт, кафедра «Проектирование и механизация технологических процессов», sergey_a_shishlov@mail.ru
[2]ФГБОУ ВПО «Дальневосточный государственный аграрный университет», факультет механизации сельского хозяйства, кафедра «Транспортно-энергетические средства и механизация АПК»

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРИ ПУНКТИРНО-ПОЛОСНОМ СПОСОБЕ ПОСЕВА СОИ

В статье рассматривается распределение семян сои высевающим аппаратом, содержащим вертикальный диск с ячейками, расположенными под углом к плоскости его вращения. Приводятся результаты теоретических исследований движения единичного зерна сои при высеве его из ячейки, расположенной под углом к плоскости вращения высевающего диска. Представлены некоторые результаты лабораторных исследований.

Ключевые слова: *соя, ячейка, высевающий диск, пунктирно-полосный способ посева.*

Основным условием, обеспечивающим высев семян вертикально-дисковым аппаратом при пунктирно-полосном способе посева [1], является бесперебойное заполнение каждой ячейки семенем и высев его в заданное место формируемой полосы. Чтобы конструктивно не увеличивать ширину высевающего диска, содержащего три ряда ячеек, и при этом получить полосу посева заданной ширины *C* (рисунок 1), боковые ряды ячеек, из которых происходит высев семян в крайние строчки полосы, изготовлены наклонными к плоскости вращения диска. Рассмотрим процесс движения единичного зерна сои, высеваемого из ячейки, расположенной под углом к плоскости вращения диска.

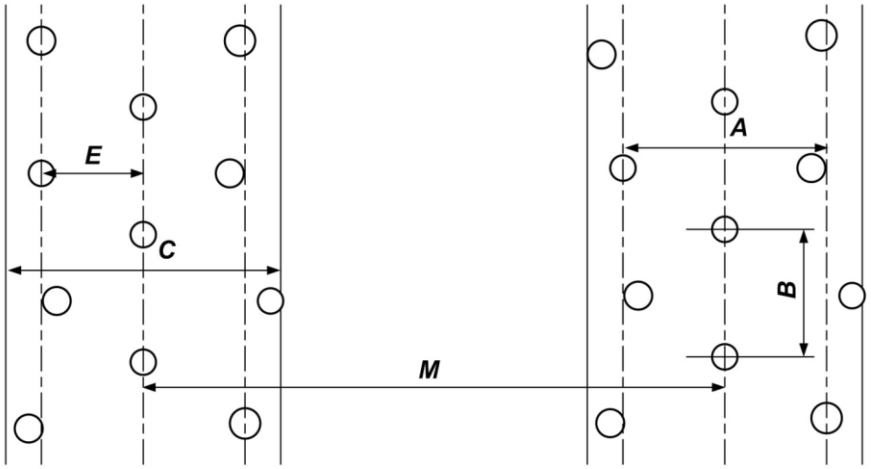


Рис. 1- Схема пунктирно-полосного способа посева

При движении посевного агрегата со скоростью V_A, зерно под действием выталкивателя высевается из ячейки с начальной скоростью V_0 (рисунок 2). Совместим начало системы координат с моментом вылета зерна из ячейки. Направления осей координат *X, Y, Z,* X_n принимаем положительными. Плоскость *XOY* совместим с траекторией полета зерна. В произвольный промежуток времени зерно массой m находится в равновесии под действием трех сил: веса зерна, $G = m \cdot g$;силы сопротивления воздуха, $F = -\mu \cdot V$; силы инерции зерна, $F_{\text{и}} = -m \cdot a$. В этих уравнениях: g - ускорение свободного падения; μ- коэффициент аэродинамического сопротивления; a - ускорение движения зерна.

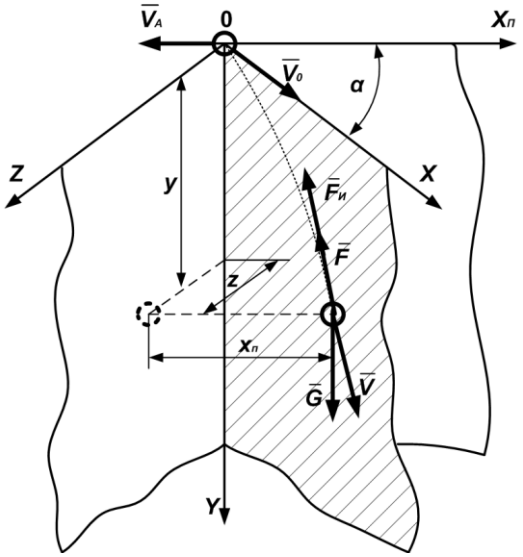


Рис. 2- К определению параметров полосы при высеве семян сои

Запишем уравнение движения зерна в плоскости его перемещения, спроектировав все действующие на зерно силы на оси X и Y,

$$\sum x = 0;\ m \cdot \ddot{x} = G_x + F_x = -\mu \cdot V_x = -\mu \cdot \dot{x}\ ,$$
$$\sum y = 0;\ \ m \cdot \ddot{y} = G_y + F_y = G + F_y = G - \mu \cdot \dot{y}\ .$$

Получим

$$m \cdot \ddot{x} = -\mu \cdot \dot{x},$$
$$m \cdot \ddot{y} = G - \mu \cdot \dot{y}.$$

Путем математических преобразований найдем параметр y, определяющий место установки выталкивателя по высоте,

$$y = \frac{m \cdot g}{\mu}\left[t - \frac{m}{\mu}\left(1 - e^{\frac{\mu \cdot t}{m}}\right)\right].$$

Принимаем начальную скорость зерна равной окружной скорости торца высевающего диска

$$V_0 = \omega \cdot \frac{D}{2},$$

где: ω - угловая скорость вращения диска; D - диаметр диска.

Тогда координаты точки, в которую происходит высев зерна определятся из уравнений:

в продольном направлении полосы

$$x_{\text{п}} = \frac{\omega \cdot m \cdot D}{2 \cdot \mu} \cdot cos\alpha \cdot \left(1 - e^{\frac{\mu \cdot t}{m}}\right);$$

по ширине полосы

$$z = E = \frac{\omega \cdot m \cdot D}{2 \cdot \mu} \cdot sin\alpha \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot t}{m}}\right).$$

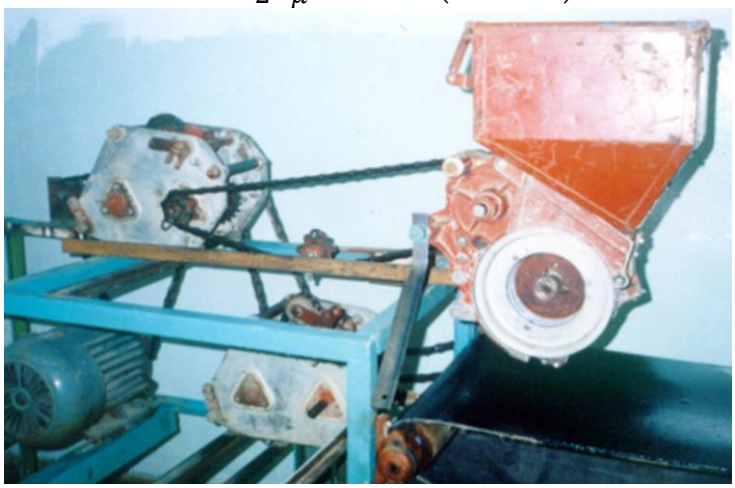


Рис. 3- Лабораторная установка

Для подтверждения теоретических предпосылок нами проведены лабораторные исследования влияния угла наклона ячеек высевающего диска на ширину формируемой полосы посева с использованием лабораторной установки и переоборудованной секции сеялки СКТ–12 (рисунок 3) с набором высевающих дисков, изготовленных с углом наклона ячеек к плоскости вращения от 10 до 50 градусов.

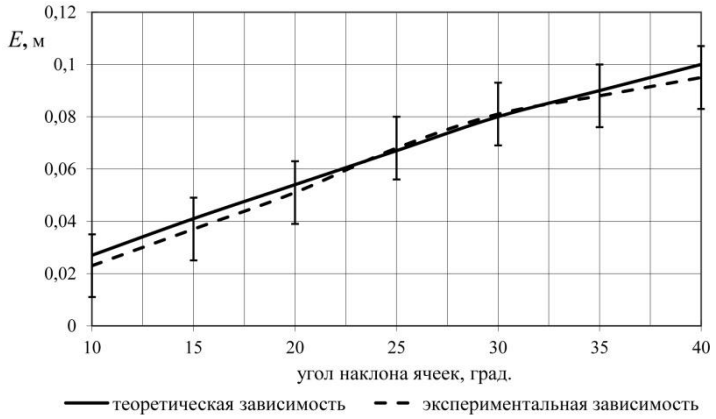


Рис. 4- Влияние угла наклона ячеек на формирование полосы при окружной скорости высевающего диска 0,3 м/с

Для проведения опытов использовались калиброванные семена сои фракции 7…8 мм. Каждый диск устанавливался в высевающий аппарат, жестко закрепленный на раме установки, и производился высев семян на движущуюся липкую ленту. По липкой ленте в продольном направлении натягивалась нить, на которую проецировалась точка выброса семян из ячеек, и измерялось расстояние в поперечном направлении полосы от нити до семени (параметр *E* на рисунке 1).

Графически результаты опыта показывают зависимости, построенные для окружной скорости высевающего диска, равной 0,3 м/с, соответствующей скорости движения посевного агрегата 7 км/ч, представленные на рисунке 4. Экспериментальная зависимость построена по средним значениям лабораторного исследования, теоретическая зависимость - на основании данных, полученных расчетным путем. Соответствие сравниваемых значений теоретического и экспериментального ряда произведено с применением интервальной оценки параметров распределения [2], при этом теоретическая зависимость расположена в границах доверительного интервала экспериментальной. Анализ полученных данных показывает, что при наклоне ячеек на угол 30^0 к плоскости вращения высевающего диска достигается выброс семян сои на расстояние 0,08 м от центра полосы без учета раскатывания, кроме того увеличение угла наклона ячеек на величину, превышающую 30^0 повышает вероятность защемления второго семени в ячейке и его травмирования [3].

Проведенные исследования позволяют сделать следующий вывод: чтобы обеспечить формирование рациональной с агротехнической и агробиологической точек зрения ширины полосы посева сои, в пределах 0,16 – 0,20 м [4], необходимо ячейки крайних рядов трехрядного высевающего диска расположить под углом 30^0 к плоскости его вращения.

Список литературы

1. Пат. 2127032 Российская Федерация, МПК A01 C7/00, A01C7/04. Способ высева семян и устройство для его осуществления / В.Д. Липин, С.А. Шишлов; заявитель и патентообладатель Приморская гос. с.-х. академия. - №20127032; заявл. 16.01.1997; опубл. 10.03.1999; Бюл. №7. - 5 с.

2. *Доспехов, Б.А.* Методика полевого опыта: (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б.А. Доспехов. - 5-е изд., перераб. и доп. - М.: Колос, 1985.-416с.

3. *Шишлов, С.А.* Влияние угла наклона ячеек высевающего диска на травмирование семян сои / С.А. Шишлов, А.Н. Шишлов // Научно-технический вестник Поволжья. - 2015. - №4. - С. 151-153.

4. *Гершевич, М.Г.* Технологические основы и техническое обеспечение интенсификации возделывания сои на Дальнем Востоке / М.Г. Гершевич. – Благовещенск: БСХИ, 1991. - 254с.

05.07.05

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр высокопроизводительных вычислительных систем,
Пермь, ar.shmakov@gmail.com, modorsky@pstu.ru, president@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В КОМПРЕССОРЕ МОДЕЛЬНОГО СТЕНДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

В данной работе представлены результаты численного моделирования газодинамических процессов и процессов деформирования, протекающих в компрессоре модельного стенда газоперекачивающего агрегата. Получены поля давлений и температур, а также компонент напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом импортированных газодинамических и тепловых нагрузок. Проанализированы перемещения в зоне лабиринтных уплотнений у рабочего колеса компрессора.

Ключевые слова: *газоперекачивающие агрегат, ANSYS CFX, ANSYS Workbench, тепловой анализ, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование*.

Возникновение вибраций в валопроводах газоперекачивающих агрегатов (ГПА) на сегодняшний день не поддается прогнозированию. При определенных значениях вибраций (больше допустимых) в действующем ГПА происходит его автоматическое выключение. Вместе с тем, уравновешивание имеющихся дисбалансов сопряжено с проблемой доступа к ограниченному числу плоскостей коррекции, а простои ГПА приводят к большим материальным затратам на устранение проблемы колебаний, на компенсацию недопоставок газа, а также к отказам системы, вплоть до разрушения, с опасностью для здоровья и жизни людей.

Для исследования процессов в компрессорах и верификации численных моделей создан модельный стенд газоперекачивающего агрегата. Стенд представляет собой комплекс технических систем, предназначенных для получения газодинамических характеристик центробежной компрессорной ступени. Экспериментальная установка включает в себя привод, компрессорную ступень, системы электроснабжения, пневмо- и гидросистемы, систему измерения и регистрации данных и др.

Рисунок 1. Модельный стенд компрессора газоперекачивающего агрегата

Для проведения исследований была разработана физическая модель, описывающая протекание газодинамических, тепловых процессов и процессов деформирования в модельном стенде компрессора газоперекачивающего агрегата [2]:

- в качестве рабочего тела используется воздух, описываемый как сжимаемый, вязкий совершенный газ;
- рассматривается течение только внутри корпуса модельного компрессора;
- рабочее колесо компрессора вписано в объем, ограниченный корпусом;
- не учитывается прилипание газа к стенкам корпуса;

- стенки являются адиабатическими;
- учитывается вращение рабочего колеса;
- материал корпуса модельного компрессора принят изотропным (сталь).

В качестве аппаратного обеспечения для вычислительных экспериментов использовались ресурсы высокопроизводительного вычислительного комплекса «Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ», имеющем 24 Тфлопс пиковой производительности и 6784 Гбайт оперативной памяти.

Для проведения численных расчетов в программном пакете инженерных исследований ANSYS Workbench были созданы расчетные модели для газодинамического и прочностного расчета и конечно-элементные сетки (рис. 2). Количество ячеек составляло от 0.075 до 3,5 млн ячеек.

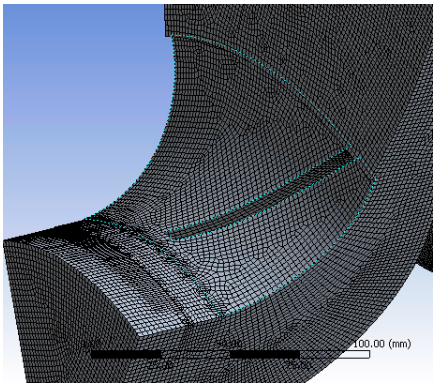
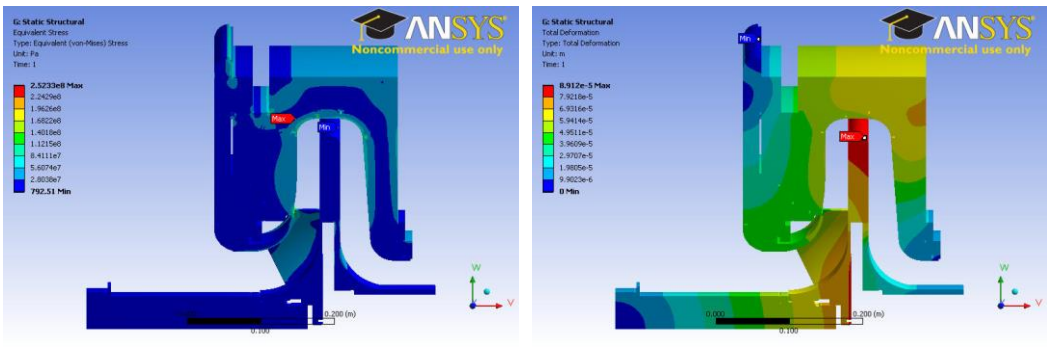


Рисунок 2. Конечно-элементная сетка газодинамического расчета проточного тракта

В результате газодинамического расчета проточного тракта модельного стенда компрессора были получены распределения температуры и давления газа. На периферии лопаток наблюдается область максимального давления, которое достигает $1{,}4 \cdot 10^5$ Па. К выходу давление несколько падает до значений $1{,}1 \cdot 10^5$ – $1{,}2 \cdot 10^5$ Па. Температура газа на входе в проточный тракт была задана 25 ˚С. Далее наблюдается рост температуры, более интенсивный в рабочем колесе. Далее, температура стабилизируется, достигая средних значений около 60 ˚С. В зоне после поворота, на перегородке, температура достигает 70 ˚С. В зоне лабиринтных уплотнений наблюдается температура около 50-60 ˚С.

Для оценки напряженно-деформированного состояния конструкции при действии газа был проведен тепловой анализ для различных частот вращения рабочего колеса и в различные моменты времени. При проведении теплового анализа на внешних стенках корпуса задавалась температура 22 ^{0}С. Максимальные значения температур расположены на внешних стенках проточного тракта и составляют от 43 ^{0}С до 56,24 ^{0}С. В зоне лабиринтного уплотнения значение температуры увеличивается с 32 ^{0}С до 38 ^{0}С.

При проведении оценки напряженно-деформированного состояния конструкции от действия внутреннего давления и температуры нагрузки на стенки проточного тракта модельного стенда центробежного компрессора были переданы из газодинамического расчета и теплового анализа. В качестве граничных условий, имитирующих закрепление вала к двигателю рабочей камеры и экспериментальной установки, были заданы ограничения на перемещения. В качестве равновесной температуры было задано значение 25 ^{0}С, что соответствует средней температуре сборки конструкции по техническим требованиям. При проведении комплексного анализа напряженно-деформированного состояния конструкции центробежного компрессора модельного стенда было выявлено, что наибольшее влияние на напряжения и перемещения оказывает температурная нагрузка. Увеличение частоты вращения рабочего колеса с 8000 до 10000 об/мин приводит к повышению температуры на 14 ^{0}С. Напряжения и перемещения при этом возрастают на 52%. Изменение давления вдоль стенок проточного тракта происходит незначительное. Напряжения и перемещения при этом увеличиваются на 6 % (рис. 5).



а) б)

Рисунок 3. Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции компрессора модельного стенда газоперекачивающего агрегата от действия внутреннего давления и температуры при частоте вращения 10000 об/мин:
а – эквивалентные напряжения по Мизесу; б — суммарные перемещения.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Основной вклад в формирование напряженно-деформированного состояния конструкции вносит температурное нагружение, вызванное нагревом от подшипников и при сжатии воздуха в компрессоре газоперекачивающего агрегата. Суммарное влияние температуры на напряженно-деформированное состояние конструкции составляет более 90%.
2. Относительное смещение элементов лабиринтного уплотнения в рассмотренной постановке зависит от теплового нагружения и газодинамических нагрузок. При этом основной вклад оказывает температура.
3. Разработана методика численных экспериментов, позволяющая в дальнейшем перейти к учету газодинамических и тепловых нагрузок при расчете вибрации элементов конструкции газоперекачивающего агрегата и оценке потерь.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00877).

Список литературы

1. *Модорский В.Я., Соколкин Ю.В.* Газоупругие процессы в энергетических установках. / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 176 с.
2. *Модорский В.Я., Шмаков А.Ф.* Численный расчет газодинамических процессов в осевом вентиляторе. Журнал Научно-технический вестник Поволжья. №6 2014г. – Казань.: Журнал Научно-технический вестник Поволжья, 2014. – 412 с.
3. Решение инженерных задач на высокопроизводительном вычислительном комплексе ПНИПУ моногр./ под ред. В.Я. Модорского. –Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. -314с.

05.02.02

Б.В. Шогенов, А.М. Казиев, А.И. Сижажев, А.С. Ципинов

Политехнический институт, Кабардино-Балкарского государственного университета имени Х.М. Беребекова, кафедра «Теоретической и прикладной механики», Нальчик, beslanshogenov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМООБРАЗОВАНИЯ В ПЕРЕДАЧАХ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе проведены исследования по снижению уровня шума в передаче с гибким звеном. Выбраны оптимальные режимы работы зубчато-ременной передачи (ЗРП) методом активного многофакторного планирования. Получено уравнение регрессии для ремня с круговой формой зубьев.

Ключевые слова: *шум, вибрация, зубчато-ременная передача, оптимизация.*

Проблема снижения шума в передачах с гибкой связью имеет важное значение. В данной работе рассмотрена зубчато-ременная передача с круговой формой зубьев ремня и шкива. Как известно [1,2,3], с возрастанием скорости движения шкива увеличивается уровень звукового давления L передачи. Для его снижения и выбора оптимальных режимов работы ЗРП нами проведены исследования с использованием метода многофакторного планирования. На основе проведенного анализа установлено, что из всех параметров, влияющих на уровень шума наиболее значимыми являются следующие: частота вращения ведущего шкива передачи – n_1, предварительное натяжение ремня – F_0 и окружная сила передачи – $F_{окр}$.

В связи со сложностью, формирования процессов шумообразования в ЗРП, решение задачи о снижении уровня шума можно осуществить на математической модели создаваемой колебательной системой. Для решения этой задачи используем возможность имитационного моделирования и методы многофакторного планирования экспериментов. Для проведения эксперимента была выбрана ЗРП с круговой формой зубьев модулем m = 5 мм, шириной ремня b = 30 мм, числах зубьев ремня $Z_р$ = 160 и шкива $Z_{шк}$ = 49, передаточным отношением U_{12} = 1. Передача была исследована на экспериментальном стенде [4].

На основе полученных экспериментальных данных в зависимости от указанных параметров передачи была составлена и реализована матрица. Интервалы варьирования исследуемых факторов следующие: частота вращения шкива n – 500…3500 мин$^{-1}$; предварительное натяжение ремня F_0 – 10…15 Н; передаваемая окружная сила $F_{окр}$ – 5…40 Н. По результатам исследований установлена математическая модель, описывающая процесс шумообразования в зависимости от регулируемых параметров и режимов работы ЗРП. В кодированном виде, искомое уравнение регрессии будет иметь вид:

$$y = A + A_1 x_1 + A_2 x_1^2 + B_1 x_2 + B_2 x_2^2 + C_1 x_3 + C_2 x_3^2 + D_1 x_1 x_2 + D_2 x_1 x_3 + D_3 x_2 x_3, \quad (1)$$

где y – уровень звука L, x_1 – частота вращения ведущего шкива n,

x_2 – натяжение ветви F_0, x_3 – окружная сила $F_{окр}$.

После проведения экспериментов были получены следующие значения приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Матрица планирования экспериментов

№ эксперимента	x_1	x_2	x_3	y
	n_1	F_0	$F_{опр}$	L
1	500	30	40	65
2	1500	30	10	67
3	2500	10	40	73
4	500	10	40	58
5	3500	20	40	82

6	500	20	40	60
7	500	30	10	65
8	1500	20	40	69
9	2500	20	40	75
10	1500	10	10	65
11	3500	20	25	84
12	3500	10	40	85
13	500	30	25	66
14	500	10	25	63
15	1500	10	25	70
16	2500	10	25	75
17	3500	10	25	79
18	1500	20	25	66,6
19	1500	20	10	71
20	1500	30	25	74
21	500	10	10	55,5
22	1500	20	10	65
23	2500	10	10	69
24	3500	10	10	73

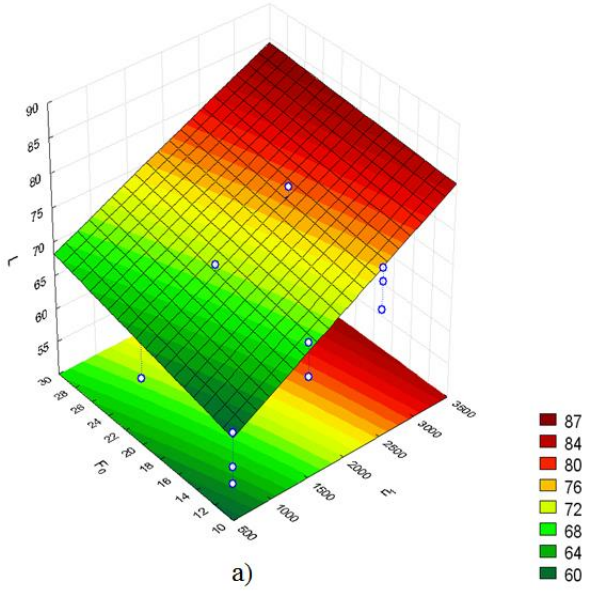
После обработки результатов в программе STATISTIKA уравнение регрессии приняло следующий вид:

$$y = 47{,}5299 + 0{,}0046x_1 - 0{,}00001x_1^2 + 0{,}3562x_2 + 0{,}0005x_2^2 + 0{,}6874x_3 - 0{,}0147x_3^2 - 0{,}0001x_1x_2 + 0{,}0001x_1x_3 - 0{,}0018x_2x_3, \quad (2)$$

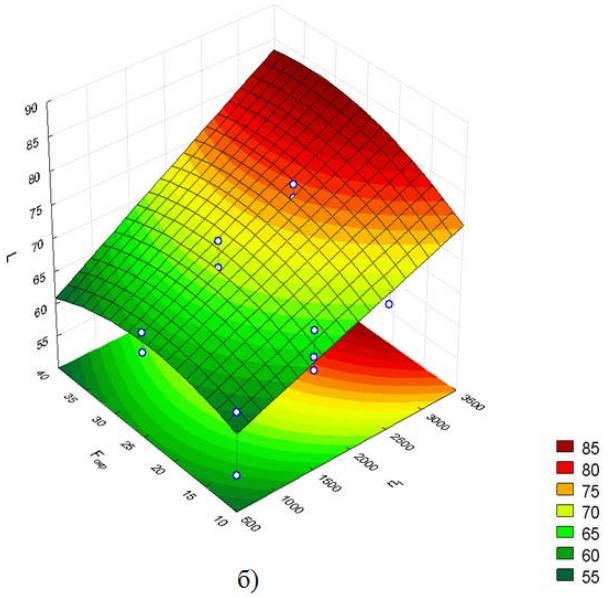
Решение уравнения регрессии (2) дает возможность оптимизировать значения входящих в уравнение параметров, с учетом их комплексного влияния на уровень шума.

На рисунке 1 показаны, построенные трехмерные графики, характеризующие влияние действующих факторов на параметр оптимизируемого уровня шума. Как следует из рисунка 1, наибольшее влияние на уровень звука оказывает скорость вращения шкива. С увеличением предварительного натяжения и передаваемой окружной силы имеет место возрастание уровня, но в меньшей степени.

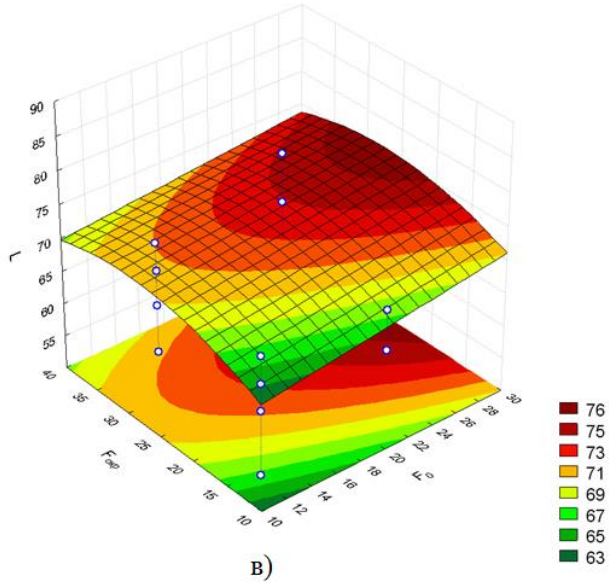
Общий анализ уравнения (2) показывает, что степень влияния на параметр оптимизации шумообразования оказывают факторы в следующей последовательности: частота вращения шкива $n_1(x_1)$, предварительное натяжение $F_o(x_2)$ и окружная сила $F_{окр}(x_3)$.



а)



б)



в)

Рис.1.Графики зависимости уровня звука ЗРП: а) от частоты вращения шкива и предварительного натяжения; б) от частоты вращения шкива и передаваемой силы; в) от предварительного натяжения и передаваемой силы.

Получены следующие оптимальные значения исследуемых факторов: частота вращения 500 - 1500 мин$^{-1}$, – L = (55-70) ДБА; окружная сила 15–20Н,– L = (63-72) ДБА; предварительное натяжение 10–20Н, L = (63-69) ДБА.

Таким образом, проведенные исследования расчета уровня шума свидетельствуют о больших возможностях использования многофакторного планирования экспериментов, позволяющий выбрать оптимальный уровень режима работы и параметров ЗРП, обеспечивающий снижение уровня шума.

Список литературы

1. *Постонен У.М.* Шумовые характеристики зубчато-ременной передачи. // Станки и инструменты.- М., - 1976. - № 11.

2. *Сабанчиев Х.Х.* Шум и вибрация в зубчато-ременных передачах. // Извест. СКНЦ ВШ сер. «Технические науки». – 1981. - №2. – с. 56-59.

3. *Сабанчиев Х.Х.* Снижение шума в зубчато-ременных передачах. // Вестник машиностроения. – 1987. - №1. – с. 32-36.

4. *Шогенов Б.В*. Снижение уровня вибраций и шума в передачах с зацеплением гибкой связью сельскохозяйственных машин. Дис. на соискание степени к.т.н.-Нальчик,2006.73-75с.

05.13.10

А.В. Шорохова

Сибирский государственный индустриальный университет, институт экономики и менеджмента, кафедра экономической теории и предпринимательской деятельности, Новокузнецк, shoroxova_a@mail.ru

АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ

В работе представлен алгоритм моделирования процессов переработки отходов с последующей рекультивацией нарушенных территорий, позволяющий выбрать наиболее приемлемый вариант из ряда альтернативных, опирающийся на экономические показатели оценки инвестиционной привлекательности проектов. Предложенный алгоритм позволяет учитывать экологические интересы общества за счет приведения экологических параметров рассматриваемых проектов в соответствие с нормативами.

Ключевые слова: *алгоритм, моделирование, отходы, угольные предприятия, рекреационные зоны.*

Негативное воздействие на окружающую среду усиливается ежегодно, и одно из первых мест по уровню загрязнений занимает угольная промышленность. С каждым годом увеличивается рост отходов добычи и переработки угля [1], большая часть которых практически не используется [2]. Площадь нарушенных территорий для складирования техногенных ресурсов в угледобывающих регионах превышает площадь населенных пунктов. В настоящее время экологические проблемы в этих регионах достигли предельно высокого уровня.

В этой связи, для снижения техногенного воздействия на природную среду в угледобывающих регионах предлагается провести исследование и моделирование процессов переработки отходов с последующей рекультивацией нарушенных земель, направленное на использование отходов производства, высвобождение и восстановление отчужденных территорий с целью создания рекреационных зон и организации отдыха населения в парках, водоемах и других искусственных объектах.

Автором разработан алгоритм моделирования процессов переработки отходов с последующей рекультивацией нарушенных территорий, который состоит из 12 блоков (рисунок 1).

1 блок. Формируется проблемная ситуация. Производится анализ состояния предприятия (уровень выбросов, объем отходов, площадь нарушенных территорий и т.д.).

2 блок. Ввод исходных данных, которые разделены на три основных группы:

– основная продукция (годовая производительность и себестоимость основной продукции до внедрения мероприятий);

– дополнительная продукция, полученной из отходов (калькуляция себестоимости дополнительной продукции, инвестиции на внедрение технологии, производительность установки по переработке отходов);

– рекреационные зоны (параметры месторождения, уровень выбросов и загрязнений, параметры рекреационных зон, ПДК и нормы СанПИН, нормативные платы за выбросы, инвестиции для создания рекреационных зон).

3 блок. Формируются альтернативные варианты управленческих решений (различие вариантов управленческих решений заключается в задании объемов расходов на внедрение технологий по переработке отходов, по восстановлению нарушенных земель и типов рекреационных

Рисунок 1 – Алгоритм моделирования процессов переработки отходов с последующим восстановлением нарушенных земель

зон и изменении уровня выбросов). Количество вариантов обозначается: n (n=1,N).

4 блок. Расчет затрат на создание рекреационных зон. Себестоимость работ по рекультивации нарушенных территорий (Z_k) рассчитывается следующим образом:

$$Z_к = S_{teh} + S_{bio} - P_{om}, \quad (1)$$

где $Z_к$ – себестоимость работ по рекультивации нарушенных территорий, тыс. руб.; S_{teh} – затраты на технологическую рекультивацию, тыс. руб.; S_{bio} – затраты на биологическую рекультивацию, тыс. руб.; P_{om} – прибыль от продажи оборудования и стройматериалов в результате сноса и демонтажа зданий, тыс. руб.

Затраты на технологическую рекультивацию (S_{teh}) определяются по формуле:

$$S_{teh} = S_{snos} + S_{vos}, \quad (2)$$

где S_{snos} – затраты на демонтаж, снос зданий и сооружений, тыс. руб.; S_{vos} – затраты на восстановление ландшафта местности, тыс. руб.

Затраты на биологическую рекультивацию (S_{bio}) рассчитываются:

$$S_{bio} = S_t \cdot (S_{yd} + S_{der} \cdot N_{der} + S_{km} \cdot N_{km}), \quad (3)$$

где S_t – площадь территории, га; S_{yd} – стоимость удобрений, тыс.руб./га; S_{der} – стоимость насаждений (деревьев), тыс. руб.\шт.; N_{der} – количество насаждений (деревьев), шт.; S_{km} – стоимость насаждений (кустарников), тыс. руб.\шт.; N_{km} – количество насаждений (кустарников), шт.

5 блок. Расчет себестоимости основной и дополнительной продукции. Себестоимость продукции включает следующие статьи расходов [3]: сырье и основные материалы с учетом транспортно-заготовительных расходов; покупные изделия, полуфабрикаты и услуги производственного характера сторонних организаций; возвратные отходы (вычитаются); вспомогательные материалы; топливо и энергия на технологические цели; основная заработная плата производственных рабочих; дополнительная заработная плата производственных рабочих (дополнительная заработная плата устанавливается, как правило, в процентах к основной заработной плате); отчисления на социальные нужды, производятся от суммы основной и дополнительной заработной платы в размере 30,2%; расходы на подготовку и освоение производства; расходы на содержание и эксплуатацию оборудования; общезаводские расходы; потери от брака; прочие производственные расходы; внепроизводственные расходы.

6 блок. Расчет стоимости основной и дополнительной продукции:

$$C_d = S_d \cdot D_d, \quad (4)$$

где D_d – торговая надбавка, доли единиц; S_d – себестоимость продукции, руб./т.

7 блок. Расчет предотвращенного экономического ущерба U_t в результате снижения выбросов после реализации проекта [4]:

$$U_t = \Delta V_a + \Delta V_v + \Delta V_p + \Delta V_o + \Delta V_w \quad (5)$$

где ΔV_a, ΔV_v, ΔV_p, ΔV_o, ΔV_w – экономические эффекты в результате снижения концентрации угольной пыли в атмосферном воздухе, взвешенных веществ в воде, отходов в почве, объема накопленных отходов и объема отходов для вывоза на отвал соответственно, руб.

8 блок. Сопоставление уровня вредных веществ в воздухе, почве, воде после внедрения проекта предельно-допустимым значениям [4]:

$$\begin{cases} V_{ab} > V_{ap} \le V_{an} \\ V_{vb} > V_{vp} \le V_{vn} \\ V_{pb} > V_{pp} \le V_{pn} \\ P_{dt} \ge 0 \end{cases}, \quad (6)$$

где V_{an}, V_{vn}, V_{pn} – предельно-допустимые концентрации угольной пыли в атмосферном воздухе, взвешенных веществ в воде отходов в почве соответственно; V_{vb}, V_{vp} - содержание взвешенных веществ в воде до и после внедрения соответственно, мг/л; V_{pb}, V_{pp} - концентрация отходов в почве до и после внедрения соответственно, мг/кг.

9 блок. Производится расчет целевой функции $F(Y_t)$ [4]:

$$F(Y_t) = \sum_{t=1}^{T} (U_t + P_{rt} + (P_{dt} + \Delta S_{ot} + \Delta A_t) \cdot Q_{gdt}) \cdot \frac{1}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T} \frac{K_t}{(1+E)^t} \to \max, \quad (7)$$

$F(Y_t)$ – целевая функция, руб./т; U_t – предотвращенный экономический ущерб в результате снижения выбросов после реализации проекта, руб.; P_{rt} – прибыль от использования рекреационных зон (парки развлечений, торговые комплексы) в течение t-того периода времени, руб.; P_{dt} – прибыль от реализации дополнительной продукции после реализации проекта в течение t-того периода времени, руб./т; ΔS_{ot} – изменение себестоимости основной выпускаемой продукции после реализации проекта, руб./т.; ΔA_t – изменение амортизационных отчислений после реализации проекта, руб./т; Q_{gdt} – годовая производительность установки по переработке отходов в течение t-того периода времени, т\год; $1/(1+E)^t$ –коэффициент дисконтирования (α_t); E – ставка дисконтирования, доли ед.; K_t – инвестиции в проект по утилизации отходов и создание рекреационных зон, руб.

10. Формируются результаты моделирования n-ого варианта управленческих решений исходя из заданных параметров и ограничений.

11 блок. Осуществляется расчет экономической эффективности проекта по переработке техногенных отходов и восстановлению нарушенных территорий методом дисконтирования с помощью системы показателей :

а) Чистый дисконтированный доход (NPV).

$$NPV = \sum_{t=1}^{T} \frac{(P_{prt} - S_o)}{(1+E)^t} - \sum_{t=1}^{T} \frac{K_t}{(1+E)^t}, \quad (8)$$

где P_{prt} – результаты проекта, достигаемые на шаге расчета t, тыс. руб.\год; S_o – соответствующие затраты, руб.; T – период расчета; E – ставка дисконтирования, доли ед.

б) Индекс рентабельности (J_R)

$$J_R = \frac{\sum_{t=0}^{T} (P_{prt} - S_o) \cdot \alpha_t}{\sum_{t=0}^{T} K_t \cdot \alpha_t}. \quad (9)$$

в) Срок окупаемости (T_{pr})

$$T_{pr} = \frac{K_t}{P_{pr} - S_0}. \quad (10)$$

12 блок. Выбор оптимального варианта управления системой утилизации техногенными отходами с последующей рекультивацией из совокупности n вариантов путем сравнения следующих показателей:

- срок окупаемости проекта;
- себестоимость дополнительной продукции, полученной из отходов;
- капитальных вложений (K_t).

Таким образом, предложенный алгоритм моделирования процессов переработки отходов с последующей рекультивацией нарушенных земель обеспечивает комплексную переработку техногенных ресурсов угольных предприятий, увеличение площади озелененных территорий, получение прибыли за счет реализации дополнительной продукции из отходов, а также создания торговых развлекательных комплексов на восстановленных территориях.

Список литературы

1. *Образование отходов производства и потребления по видам экономической деятельности по Российской Федерации* [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/ oxrana/tabl/oxr_otxod1.htm.

2. *Использование и обезвреживание отходов производства и потребления по видам экономической деятельности по Российской Федерации* [Электронный ресурс] / Федеральная служба государственной статистики. – Режим доступа: http://www.gks.ru/free_doc/new_site/oxrana/tabl/oxr_otxod2.htm.

3. *Приказ Минфина РФ от 6 мая 1999 г. N 33н "Об утверждении Положения по бухгалтерскому учету "Расходы организации" ПБУ 10/99" (с изменениями и дополнениями).*

4. *Шорохова А.В.* Экономико-математическая модель процессов утилизации и использовании отходов угольных предприятий для создания рекреационных зон / А.В. Шорохова, О.В. Дмитриева, В.Н. Фрянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. - № 12. – с. 294-296.

05.02.05

Д.В. Штых, И.В. Шинаков к.т.н., В.В. Морозов д.т.н.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир, vvm@vlsu.ru

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РОЛИКОВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

В статье рассматриваются математические модели роликовинтовых механизмов (РВМ). Определены упрощения и допущения, систематизированы характерные особенности моделей, выделены общие проблемы. Сформулированы требования к математической модели РВМ.

Ключевые слова: *роликовинтовой механизм (РВМ), математическая модель, теоретические исследования, критерии сравнения моделей.*

В настоящее время расширяются сферы применения роликовинтовых механизмов (РВМ) [1-5]. Высокая жесткость, грузоподъемность и точность обеспечиваются большим количеством точек контакта в резьбовых сопряжениях. Однако изготовление резьбовых поверхностей деталей механизма представляет собой определенную трудность, что приводит к отклонениям реальных профилей от номинальных. Ошибки, допущенные при сборке и регулировке могут являться источниками ухудшения технических характеристик РВМ.

Теоретические исследования РВМ являются источником дополнительной информации о параметрах функционирования механизма. Однако разнообразие схем и сложная конструкция не позволяют получить однозначную аналитическую модель. Множество и переменное количество контактных пар в резьбовых сопряжениях обуславливают многократную статическую неопределимость РВМ. Поэтому при теоретических исследованиях прибегают к упрощенным математическим моделям, позволяющим с определённой степенью достоверности оценить степень влияния тех или иных параметров на выходные характеристики механизма. В литературе приводится несколько математических моделей, описывающих различные параметры функционирования РВМ с учетом конструктивных особенностей механизма, погрешностей изготовления его элементов, а также величины внешней нагрузки. В работе [1] рассматривается механизм с короткими роликами. При построении модели рассматривается сечение механизма, проходящее через линии контакта обоих сопряжений. Таким образом, смещение точек контакта вследствие несовпадения углов подъема винтовых линий не учитывается. При расчете смещений элементов механизма друг относительно друга учитываются погрешность изготовления резьбовых поверхностей, упругие деформации в точках контакта, упругие деформации тел сопряженных деталей. В работе [5] используется плоская модель РВМ с гарантированным зазором для определения неравномерности распределения нагрузки по виткам сопряженных резьб. Однако данная модель разрабатывалась для описания РВМ с длинными роликами и двумя гайками (опорной и ходовой). В системе уравнений, описывающих условия равновесия элементов механизма, предусмотрены осевые и радиальные смещения роликов, угол поворота роликов вследствие действия опрокидывающего момента, осевые перемещения ходовой и опорной гаек. В модели РВМ [3] подробно рассматриваются элементарные погрешности резьбовой поверхности. Все смещения точек контакта проецируются на осевое направление. Точки контакта располагаются на линиях средних диаметров идеального механизма. В ходе статистических испытаний (по результатам обработки данных из большой выборки, N=100) определяется кинематическая погрешность РВМ. При этом элементарные погрешности резьбовых поверхностей генерируются случайным образом с параметрами нормального закона распределения из интервала соответствующих допусков.

Для сравнительного анализа особенностей математических моделей РВМ составлена таблица (см. табл.), в которой отражены отличительные особенности каждой из рассматриваемых моделей. Таким образом, видно, что существующие модели РВМ имеют различные, но существенные недостатки. Использование какой-либо из рассмотренных моделей без внесения изменений приведет к получению некорректных результатов.

Следовательно, первой задачей теоретического исследования РВМ является построение его математической модели, в которой указанные выше недостатки будут исключены, либо минимизированы. В ходе анализа рассматриваемых моделей были выявлены теоретические проблемы, ограничивающие возможности корректного математического описания функционирования РВМ. Ни в одной из представленных моделей эти проблемы не были решены, либо решены в частном виде без обобщения. Речь идет о следующих узких местах при моделировании:

1. Особенности определения основных параметров реальной резьбовой поверхности. В работе [2] на основании обработки результатов измерений контуров сопрягаемых поверхностей винта, гайки и роликов РВМ показано, что шаг резьбы является величиной непостоянной вследствие погрешностей изготовления и варьируется от витка к витку в пределах поля допуска. Распределение данной случайной величины соответствует нормальному закону с соответствующими параметрами. Т.е. номинальный шаг в случае реальной резьбы заменяется математическим ожиданием с некоторым среднеквадратическим отклонением.

На основании данных измерений резьбовых поверхностей можно показать, что значение среднего диаметра для каждой канавки (определение см. ГОСТ 11708-82) также является случайной величиной. При этом понятие среднего диаметра необходимо заменить на понятие среднего радиуса, т.к. отклонение данного параметра относится только к канавке, расположенной на одной стороне осевого сечения. Как и в случае с шагом резьбы, значение среднего радиуса является случайной величиной с нормальным законом распределения. Тогда средним диаметром будет считаться диаметр воображаемого несоосного (в общем случае) с резьбой цилиндра, который, в свою очередь, является математическим ожиданием, рассчитанным по результатам измерений резьбовой поверхности.

Таблица - Систематизация основных параметров математических моделей

Критерии сравнения моделей	Работа, в которой описана модель		
	[1]	[5]	[3]
Тип модели	Плоская		Одноосная
Расположение точек контакта	Средние радиусы		
Направление прикладываемой нагрузки	Односторонняя	Двусторонняя	Односторонняя
Подвижность элементов РВМ:			
гайки	осевое смещение, поворот вокруг двух осей	осевое смещение	
роликов	осевое смещение	осевое смещение, поворот в плоскости сечения	осевое смещение
винта	вращательная		
Учитываемые погрешности резьбовой поверхности	Прогрессивная погрешность шага	Погрешность шага, разноразмерность диаметров роликов	Полный комплекс технологических погрешностей
Исследуемые параметры РВМ	Жесткость	Распределение нагрузки по виткам	Погрешность перемещения выходного звена

Однако, в таком случае и осевая линия резьбы может быть представлена лишь аппроксимацией некоторого множества точек с соответствующим среднеквадратическим отклонением. Альтернативой такого определения оси резьбы может быть использование дополнительных конструктивных либо технологических элементов детали, таких, как опорные шейки или центровые отверстия.

Вследствие того, что рассмотренные основные параметры реальной резьбовой поверхности являются результатами обработки массива данных, полученных при проведении соответствующих измерений, вычисленные значения зависят от размера массива. Это означает, что на различных длинах измерения получатся разные величины указанных параметров резьбы.

2. Допущение о расположении точек контакта на линиях средних диаметров. Такое допущение не позволяет учитывать радиальные перемещения элементов механизма друг относительно друга, что приводит к некорректному описанию силовых механизмов и особенно механизмов с предварительным натягом. Осевые и радиальные смещения роликов способствуют уменьшению неравномерности распределения нагрузки по виткам, а при использовании систем выборки зазоров именно радиальные смещения роликов к винту обеспечивают натяг в сопряжении винт-ролик.

Также подмена реальной точки контакта точкой контакта, расположенной на линиях средних диаметров идеального механизма привносит дополнительную ошибку при расчетах основных параметров РВМ (кинематическая погрешность, жесткость и др.).

Анализ представленных моделей позволил систематизировать их основные достоинства и недостатки. Исходя из этого, были сформированы требования к математической модели РВМ: (1) Модель должна адекватно описывать геометрические параметры профилей резьбовых поверхностей (как треугольного, так и кругового); (2) При расчете геометрических параметров профилей должны быть учтены элементарные технологические погрешности; (3) Величины погрешностей должны генерироваться случайным образом либо использоваться данные измерений реальных резьбовых поверхностей, обработанные соответствующим образом; (4) Положение точек контакта должно определяться исходя из погрешностей профиля и смещений элементов механизма под действием внешних и внутренних сил; (5) Для возможности рассмотрения передач с натягом контактные силы в элементарных парах должны рассчитываться по обеим сторонам профилей; (6) Смещения элементов механизма должны рассчитываться с учетом упругих деформаций и действующих моментов; (7) Исследование механизма должно проводиться методом статистических испытаний (по результатам обработки данных выборки определенного объема); (8) Модель должна обеспечивать возможность определять различные параметры РВМ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-07464 а.

Список литературы

1. *Блинов Д.С.* Разработка научно-методических основ расчета и проектирования планетарных РВМ, имеющих многочисленные избыточные связи: Дисс. докт. техн. наук. - Москва, 2007. - 373 с.

2. *Морозов В.В.* РВМ. Кинематические характеристики.. (монография) / ВлГУ – Владимир, 2005. – 78 стр - ISBN 5-89368-634-9.

3. *Зуева Е.В.* Разработка методики расчета и проектирования РВП с заданными точностью, жесткостью и стабильностью кинематических передаточных функций: Дисс. канд. техн. наук. - Владимир, 1993. - 148 с.

4. *Козырев В.В.* Сравнение параметров шариковых и роликовых передач винт – гайка // Станки и инструмент. – 1990. – №5. – С. 30 – 33 с.

5. *Овчинников А.Ю.* Разработка и исследование РВП как исполнительного механизма ортопедического аппарата: Дисс. канд. техн. наук. - Владимир, 2000. - 132 с.

АННОТАЦИИ
ABSTRACTS

В.В. Абрамова
РЕШЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ПАРАМЕТРОМ ПРИ ПРОИЗВОДНОЙ

Ключевые слова: краевая задача, обратный оператор, итерационный метод, ряд Фурье.

Доказана теорема существования и единственности решения периодической краевой задачи для дифференциального уравнения первого порядка с параметром при производной (в том числе и малым) на основе теории положительных операторов, а также приводится теоретическое обоснование итерационного метода для рассматриваемого уравнения.

V.V. Abramova
SOLUTION FOR PERIODIC BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR FIRST ORDER DIFFERENTIAL EQUATIONS WITH PARAMETER IN DERIVATIVE

Keywords: boundary value problem, inverse operator, iteration method, Fourier series.

The theorem of existence and uniqueness of solution of periodic boundary value problem for first order differential equation with a parameter in the derivative (including small) on the basis of the theory of positive operators, as well as the theoretical basis of iterative method for the equation.

Н.Т. Валишин
МЕТОД V-ФУНКЦИИ И ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГИЯ

Ключевые слова: вариационный принцип, волновое движение, волновое уравнение, оптико-механическая аналогия.

На базе метода V-функции проводится оптико-механическая аналогия на уровне волной оптики. Показывается, что оптико-механическая аналогия получает новое продолжение по сравнению с известными оптико-механическими аналогиями. Полученные результаты сравниваются с известными результатами Луи де Бройля и Шредингера.

N.T. Valishin
V-FUNCTIONS METHOD AND OPTICAL-MECHANICAL ANALOGY

Keywords: variational principle, wave flow, wave equation, optical-mechanical analogy.

Based on the v-functions method optical-mechanical analogy is performed at the wave optics level.It shows how optical-mechanical analogy starts to new continuation as opposed to well-known optical-mechanical analogy.Obtained results are compared with well-known results of Louis de Broglie and Arvin Shredinger.

Х.Ш. Джураев
РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЯ ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Ключевые слова: сглаживающая функция; параметр регуляризации; устойчивость; семейство регуляризирующих операторов; некорректность.

Рассматривается проблема устойчивости задачи Коши для уравнения Гельмгольца с применением преобразования Фурье. Построен класс приближенного решения в виде регуляризирующего оператора, обладающего свойством устойчивости к малым отклонениям исходных данных. При этом важную роль играют выбор сглаживающей функции и условия согласования параметра регуляризации с погрешностью.

Kh. Sh. Dzhuraev
REGULARIZATION OF CAUCHYS PROBLEMS FOR THE HELMHOLTZS EQUATION

Keywords: the smoothing function; parameter regularization; stability; family regularization of operators; an incorrectness.

Stability of distribution of Cauchy's problems for Helmholtz's equation of transformation of Fourier in considered problems. The class of the approached solution in a kind regularization operator is constructed by property of stability to small deviations of the initial data. The important role is played by a choice smoothing function and conditions of the coordination of parameter regularization with a margin error.

Х.Ш. Джураев, З.Д. Каримов, Б.И. Махсудов
ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР

Ключевые слова: метод моделирующих функций, компонент волнового вектора, оптимизации параметров.

В работе на основе математических методов решения уравнения математической физики, изучаются волноводные свойства многослойных квантоворазмерных гетероструктур. Приведены методы определения параметров постоянного распространения волноводной моды, компонента волнового вектора в k -ём слое, а также оптимизации параметров волновода.

Kh.Sh. Dzhurayev, Z.D. Karimov, B.I. Makhsudov
INVERSE PROBLEMS IN THE STUDY OF WAVEGUIDE PROPERTIES OF MULTILAYER QUANTUM-DIMENSIONAL HETEROSTRUCTURES

Keywords: method of modeling functions, solution of equations of mathematical physics, the component of the wave vector of optimization parameters.

In work on the basis of mathematical methods of the solution of the equation of mathematical physics, it is studied the waveguide properties of multilayered quantum-dimensional heterostructures. It is carried out methods of determination of parameters a constant of distribution of the waveguide fashion, a component of a wave vector in - m a layer, and also optimization of parameters.

В.В. Дружинин
ОБОБЩЕНИЕ МАЛОЙ ТЕОРЕМЫ ФЕРМА

Ключевые слова: малая теорема Ферма, теория сравнений, остатки, вычеты.

Проведено обобщение малой теоремы Ферма на случай разных степеней основания, которое взаимно просто с произвольным простым числом. Составлена матрица вычетов и указаны ее свойства симметрии. Даны приложения новых соотношений.

V.V. Druzhinin
GENERALIZATION OF THE LITTLE FERMAT'S THEOREM

Keywords: Fermat's little theorem, theory of congruences, residues, deductions.

The generalization of the little Fermat's theorem for the case of different degrees, which are mutually simple with arbitrary Prime number. The matrix is composed of deductions and specified its properties of symmetry. The application given of new ratios.

В.В. Дружинин

ОБОБЩЕНИЕ ТЕОРЕМЫ ЭЙЛЕРА В ТЕОРИИ СРАВНЕНИЙ

Ключевые слова: теорема Эйлера, малая теорема Ферма, теория сравнений, остатки, вычеты.

Проведено обобщение теоремы Эйлера, которая сама обобщает малую теорему Ферма, на случай разных степеней основания, если оно взаимно просто с произвольным составным числом. Составлена матрица вычетов и указаны ее свойства симметрии. Даны приложения новых соотношений.

V.V. Druzhinin

GENERALIZATION OF EULER'S THEOREM IN THE THEORY OF CONGRUENCES

Keywords: Euler's theorem, Fermat's little theorem, theory of congruences, residues, deductions.

The generalization of Euler's theorem, which itself generalizes the small Fermat's theorem, for the case of different degrees of basis, if it is mutually simple with arbitrary integral number. The matrix is composed of deductions and specified its properties of symmetry. The application of new a ratios is given.

Д.Л. Еськин

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛН КОМБИНАЦИОННЫХ ЧАСТОТ ПРИ УСИЛЕНИИ ДВУХЧАСТОТНОГО СИГНАЛА В ЛБВ М-ТИПА

Ключевые слова: лампа бегущей волны, комбинационные частоты, многочастотный сигнал, спектр, искажение сигнала.

В работе представлены результаты моделирования процесса усиления сигнала сложного спектрального состава, представляющего собой суперпозицию двух монохроматических волн близких частот, лежащих в одной полосе пропускания замедляющей системы ЛБВ М-типа. Показано влияние уровня входной мощности более высокочастотного сигнала на ширину спектра выходного сигнала вследствие возбуждения волн комбинационных частот.

D.L. Eskin

THE COMBINATIONAL FREQUENCES WAVES EXITATION BY DUAL-FREQUENCY SIGNAL AMPLIFICATION IN A TWT M-TYPE

Keywords: traveling wave tube, combinational frequencies, multiharmonic signal, spectrum, signal distortion.

The simulation results of complex spectral composition signal amplification, which are superposition of two monochromatic waves with closely frequencies lying in the same bandwidth of slow-wave system of TWT M-type, are presented in the article. The effect of the higher frequency signal power level to the output signal spectrum width due combination frequencies wave excitation is shown.

Э.С. Сибгатуллин, О.Г. Новоселов, К.Э. Сибгатуллин

ПОСТРОЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТРЕХОСНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ

Ключевые слова: объемные конечные элементы, параметрические уравнения предельной поверхности, сечения предельной поверхности прочности.

Рассмотрены изотропные тела с различными пределами прочности на растяжение и сжатие. Приведены параметрические уравнения поверхности прочности для массивных тел в пространстве внутренних сил и моментов. Построены некоторые сечения этой поверхности.

E.S. Sibgatullin, O.G. Novoselov, K.E. Sibgatullin

CROSS SECTIONS LIMITING SURFACE DURABILITY FOR VOLUMETRIC FINITE ELEMENTS UNDER TRIAXIAL STATE OF STRESS

Keywords: volumetric finite elements, the parametric equations of the limiting surface, the cross section of the limiting surface strength.

Considered isotropic body with different ultimate strengths in tension and compression. The obtained parametric equations of the limit surface for a massive phone built some sections of the surface strength in the space of internal forces and moments.

О.Ю. Сметанников, В.В. Зыков, К.А. Могильников

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОПОРНОГО ЭЛЕМЕНТА АВТОМОБИЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ В ПАКЕТЕ ANSYS

Ключевые слова: ANSYS, Design Optimization, Design Exploration, однокритериальная оптимизация, прочность.

Статья содержит результаты оптимизации новой конструкции опорного элемента (станины) автомобильной колесной платформы специального назначения. Для расчета снижения веса станины применены две различные методики – модули Design Optimization в ANSYS Mechanical APDL и Design Exploration в ANSYS Workbench. Проведен сравнительный анализ эффективности использования данных пакетов.

O.Yu. Smetannikov, V.V. Zykov, K.A. Mogilnikov

DESIGN OPTIMIZATION OF THE AUTOMOBILE PLATFORM SUPPORT ELEMENTS IN ANSYS PROGRAM

Keywords: ANSYS, Design Optimization, Design Exploration, Single-Objective Optimization, strength.

The work contains the design optimization results for the support element (stand) of special purposed automobile wheel platform. To calculate the weight reduction of the stand two different techniques - Design Optimization module in ANSYS Mechanical APDL and Design Exploration in ANSYS Workbench are used. A comparative analysis of the efficiency of these modules is done.

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В ОБЛАСТИ С ПОДВИЖНЫМИ СТЕНКАМИ

Ключевые слова: ANSYS CFX, Matlab, теплопроводность, газодинамика, уравнения Навье-Стокса.

Решение задач газодинамики с подвижными стенками представляет собой процесс, включающий трудности построения сетки, а также большую ресурсоемкость при вычислении, особенно в условиях больших перемещений границ. В работе представлено численное решение в пакете ANSYS CFX нестационарной задачи течения сверхзвукового

O.Yu. Smetannikov, G.V. Ilinykh

A METHOD OF THE INVESTIGATION OF HIGH-SPEED GAS FLOW IN THE REGION WITH MOVING WALLS

Keywords: ANSYS CFX, Matlab, thermal conduction, aerodynamics, Navier-Stokes equations.

The solution of supersonic gas flow with moving walls is complicated process that involved some difficulties like generation of qualitative grid and high resource usage, especially with large displacement of the walls. The numerical solution of non-stationary supersonic gas flow in ANSYS CFX with using set of solutions at different times instead of continuous solution is presented in the work. The methodology

газового потока с заменой непрерывного решения на совокупность решений в различные моменты времени. Приведена методика получения граничных условий для задачи теплопроводности твердого тела, находящегося в поле действия потока, включающая усреднение температурных полей в пакете Matlab.

Н.С. Созонов, И.Н. Шардаков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики деформации, напряженно-деформированное состояние, математическое моделирование.

В статье приведены результаты математического моделирования деформирования металлической пластины с дефектом с закрепленным на ней волоконно-оптическим датчиком. Показано, что датчик, расположенный на достаточном удалении от дефекта, достоверно отражает деформационное состояние пластины. При размещении датчика вблизи дефекта его показания дают существенно искаженную картину деформации.

N.S. Sozonov, I.N. Shardakov

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING THE FIBER OPTIC SENSOR FOR NONUNIFORM STRAIN REGISTRATION

Keywords: fiber optic strain sensors, strain-stress state, computer modeling.

The results of mathematical modeling of the deformation of the metal plate with a defect equipped with a fiber optic sensor are presented. It is shown that the sensor located at a sufficient distance from the defect, measures the deformation of the plate reliably. Sensor located in the vicinity of the defect shows a significantly distorted picture of the deformation.

П.П. Сырников, Н.В. Зайцева, Е.Ю. Каптелов, С.В. Сенкевич, И.П. Пронин, Р.А. Кастро

ПОЛУЧЕНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$, ИХ СТРУКТУРНЫЕ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, структура перовскита, фазовые переходы, температура Кюри.

Исследованы структурные, оптические и диэлектрические свойства монокристаллов $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$. Обнаружено, что кристаллическая структура выращенных монокристаллов представляет собой чистый перовскит без каких-либо примесей посторонних фаз. Характер температурных зависимостей диэлектрических параметров свидетельствует о сильном размытии сегнетоэлектрического фазового перехода. Увеличение $tg\delta$ на высоких частотах вызвано смещением средней температуры Кюри в область 100^0 С.

Syrnikov P.P., Zaytseva N.V., Kaptelov E.Y., Senkevich S.V., Pronin I.P., Castro R.A.

SYNTHESIS OF $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$ SINGLE CRYSTALS, THEIR STRUCTURAL, DIELECTRIC AND OPTICAL PROPERTIES

Key words: ferroelectric, perovskite structure, phase transitions, the Curie temperature

Structural, optical and dielectric properties of $Na_{1/2}Bi_{1/2}TiO_3 – KTaO_3$ monocrystals have been studied. It has been found that crystalline structure of studied monocrystals is perovskite type without impurities phases. The temperature dependence of dielectric parameters suggests intense diffusion of ferroelectric phase transition. Increase in $tg\delta$ at high frequencies is caused by displacement of Curie temperature into 100^0 C temperature range.

А.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ НА ПРОТОЧНОМ ЭЛЕКТРОЛИТНОМ КАТОДЕ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТОКАХ РАЗРЯДА

Ключевые слова: газовый разряд, жидкий катод, теплообмен, проточный электролит.

Исследованы процессы нагрева и испарения жидкого электролитного катода в диапазоне токов 4−16 А при относительно высокой плотности тока (~0,9 А/см^2). Разряд горел в диффузном виде при атмосферном давлении. Мощность, вкладываемая в разрядный узел, достигала до 20 кВт. Скорость течения электролита через зону действия разряда составляла 0,1−5,0 см/с. Выявлены режимы, в которых вся теплота, идущая от плазмы к жидкому катоду, обратно возвращается парами электролита в разрядную область.

A.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva

STUDY OF HEAT EFFECTS ON FLOWING ELECTROLYTIC CATHODE AT HIGH DISCHARGE CURRENTS

Keywords: gas discharge, liquid cathode, heat exchange, flowing electrolyte.

The processes of heating and evaporation of liquid electrolyte to the cathode in the range of currents 4-16 A at relatively high current density was investigated (~0.9 A/cm2). Discharge burned in a diffuse form at atmospheric pressure. Power delivered to the discharge unit, reached up to 20 kW. The rate of flow of electrolyte through the zone of discharge is 0.1-5.0 cm / s. All the heat coming from the plasma to the liquid cathode is returned back in form of electrolyte steam into discharge region regimes was revealed.

Б.Х. Тазмеев, Р.Н. Тазмеева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА С ЖИДКИМ ЭЛЕКТРОДОМ

Ключевые слова: газовый разряд, жидкий катод, математическая модель.

Предложена математическая модель газового разряда между электролитическим катодом и твердотельным анодом. Предполагается, что разряд горит в многоканальном режиме и в отдельно взятом канале формируется предельный участок с неизменными электрофизическими свойствами. Выполнены расчеты

B.Kh. Tazmeev, R.N. Tazmeeva

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF GAS DISCHARGE WITH LIQUID ELECTRODE

Keywords: gas discharge, liquid cathode, mathematical description.

A mathematical model of a gas discharge between electrolytic cathode and a solid anode was proposed. It is assumed that the discharge burns in multichannel mode and in the single channel limited area was formed with the same physical properties. The calculations of the characteristics of the limited area of the discharge channel were performed.

характеристик предельного участка разрядного канала.

М.Ю. Федотова

О СХОДИМОСТИ СОБСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СИНГУЛЯРНО ВОЗМУЩЕННОЙ ЗАДАЧИ ДИРИХЛЕ

Ключевые слова: сингулярные возмущения; оператор Лапласа; краевая задача.

В работе рассмотрена трехмерная сингулярно – возмущенная краевая задача Дирихле со сменой типа граничного условия на узкой полосе. Для данной задачи доказана сходимость собственных значений.

M.Yu. Fedotova

ON THE CONVERGENCE OF EIGENVALUES OF SINGULARLY PERTURBED BOUNDARY – VALUE DIRICHLET PROBLEM

Keywords: singular perturbation; Laplace operator; boundary – value problem.

In this paper, we study three-dimensional singularly perturbed boundary-value Dirichlet problem with variation of boundary conditions on a narrow strip. There have been proved the convergence of eigenvalues for this problem.

А.В. Быков, Г.Н. Демиденко, Л.Ж. Никошвили, Г.В. Самойлова

ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННЫЙ РУТЕНИЕВЫЙ КАТАЛИЗАТОР В ПРОЦЕССЕ N-АЛКИЛИРОВАНИЯ АРОМАТИЧЕСКИХ АМИНОВ

Ключевые слова: N-алкилирование; рутенийсодержащий катализатор; N-монометиланилин.

В данной работе представлены результаты каталитического тестирования рутения, стабилизированного в сверхсшитом полистироле, в реакции N-алкилирования ароматических аминов. В ходе исследования показано, что каталитическая система на основе рутения в реакции восстановительного N-алкилирования позволяет достичь высокого соотношения N-монометиланилин/N,N-диметиланилин.

A.V. Bykov, G.N. Demidenko, L.Zh. Nikoshvili, G.V. Samoilova

THE POLIMERSTABILIZED RUTHENIC CATALYST IN THE REDUCTIVE N-ALKYLATION OF AROMATIC AMINES

Keywords: N- alkylation ; ruthenium-containing catalyst; N-monomethylaniline.

This work presents the results of catalytic testing of ruthenium stabilized in hypercrosslicked polystyrene in reaction of N-alkylation of aromatic amines. During the investigation, ruthenium-containing catalytic system was shown to allow achieving high ratio of N-monomhylaniline/N, N-dimethylaniline in reaction of reductive N-alkylation.

О.В. Кислица, О.В. Манаенков, В.Г. Матвеева, А.Е. Филатова, В.Ю. Долуда, Э.М. Сульман, А.И. Сидоров, В.В. Шумилов, М.Б. Лебедева, Е.В. Ребров

ГИДРОЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ

Ключевые слова: сверхсшитый полистирол, гидролитическое гидрирование, целлюлоза, субкритическая вода, полиолы.

В данной работе представлены результаты исследования процесса гидролитического гидрирования целлюлозы с использованием катализаторов на основе сверхсшитого полистирола (СПС). Приведены данные физико-химических исследований используемых катализаторов, данные о зависимости протекания процесса от условий реакции, а также результаты кинетических расчётов.

O.V. Kislitza, O.V. Manaenkov, V.G. Matveeva, A.E Filatova, V. Yu. Doluda, E.M. Sulman, A.I. Sidorov, V.V. Shumilov, M.B. Lebedev, E.V. Rebrov

HYDROLYTIC HYDROGENATION OF CELLULOSE WITH USE OF THE POLYMERIC CATALYSTS

Keywords: hypercrosslinked polysterene, hydrolytic hydrogenation, cellulose, subcritical water, polyols.

This paper presents the results of a study of the hydrolytic hydrogenation of cellulose with use of the catalysts based on the hypercrosslinked polystyrene (HPS). The data physico-chemical studies of the catalysts and the data of the dependence of the process on the reaction conditions and the results of kinetic calculations are presented.

В.П. Молчанов, Е.В. Ребров, М.Е. Григорьев, И.П. Шкилева, О.В. Матвеева

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОКОНВЕРСИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ И ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПОЛУЧЕНИЕМ ЭФФЕКТИВНЫХ УДОБРЕНИЙ И КОРМОВЫХ ДОБАВОК

Ключевые слова: биоконверсия, растительное сырье, органические отходы, физико-химический анализ, удобрения, кормовые добавки.

Исследован процесс ферментации (переработки) отходов животноводства и трудногидролизуемого растительного сырья (торфа) с добавлением биостимуляторов – солей аскорбиновой кислоты. Определен аминокислотный состав продуктов биоферментации и выявлена возможность целевого биосинтеза с целью получения удобрения и кормовой добавки с заранее заданными свойствами.

V.P. Molchanov, E.V. Rebrov, M.E. Grigoriev, I.P. Shkileva, O.V. Matveeva

PHYSICO-CHEMICAL STUDY OF THE PROCESSES OF BIOCONVERSION OF PLANT RAW MATERIAL AND ORGANIC WASTE TO PRODUCE EFFECTIVE FERTILIZERS AND FODDER ADDITIVES

Keywords: bioconversion, plant material, organic waste, physico-chemical analysis, fertilizers, fodder additives.

Process of a fermentation (processing) of animal husbandry's wastes and the difficultly hydrolyzable vegetable crude (peat) with addition of biostimulators – salts of ascorbic acid is investigated. Aminoacid composition of the products of biofermentation is determined and possibility of target biosynthesis in order to receive of fertilizer and fodder additive with predetermined properties is revealed.

Н.А. Немыгина, Л.Ж. Никошвили, М.Г. Сульман, Э.М. Сульман, L. Kiwi-Minsker

ПАЛЛАДИЙ СОДЕРЖАЩИЕ КАТАЛИЗАТОРЫ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО СВЕРХСШИТОГО ПОЛИСТИРОЛА ДЛЯ РЕАКЦИИ КРОСС-СОЧЕТАНИЯ СУЗУКИ

Ключевые слова: кросс-сочетание, реакция Сузуки, сверхсшитый полистирол, палладий.

N.A. Nemygina, L.Zh. Nikoshvili, M.G. Sulman, E.M. Sulman, L. Kiwi-Minsker

PALLADIUM-CONTAINING CATALYSTS BASED ON FUNCTIONALIZED HYPERCROSSLINKED POLYSTYRENE FOR SUZUKI CROSS-COUPLING REACTION

Keywords: cross-coupling, Suzuki reaction, hypercrosslinked polystyrene, palladium.

Целью настоящего исследования является изучение возможности получения активных, селективных и стабильных палладиевых катализаторов реакции кросс-сочетания Сузуки-Миюра на основе пористой полимерной матрицы сверхсшитого полистирола (СПС). Кинетические исследования были выполнены при варьировании природы основания, состава растворителя и температуры реакции. Показано, что использование СПС в качестве носителя позволяет обеспечить конверсию 4-бромоанизола выше 98% за время реакции менее часа.

This work is directed to the investigation of the possibility of obtaining of active, selective and stable palladium catalysts based on porous polymeric matrix of hypercrosslinked polystyrene (HPS) for Suzuki cross-coupling reaction. Kinetic study was carried out at variation of type of base, solvent composition and reaction temperature. The use of HPS as a support was shown to allow conversion of 4-bromoanisole higher than 98% for one hour.

М.Ю. Ракитин, В.Ю. Долуда, А.И. Петрова, И.П. Шкилева, В.Г. Матвеева, Г.Н. Демиденко, Э.М. Сульман, А.А. Рубина

ПРИМЕНЕНИЕ RU/СПС КАТАЛИЗАТОРОВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ АНИЛИНА В СРЕДЕ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

Ключевые слова: нитробензол, анилин, сверхкритический диоксид углерода, гидрирование.

В статье приводятся результаты по исследованию каталитического гидрирования нитробензола в среде изопропилового спирта и в среде сверхкритического диоксида углерода. Для проведения процесса использовались Ru/СПС катализаторы. При использовании сверхкритического диоксида углерода повышается селективность процесса, скорость реакции и выход целевого продукта – анилина.

M.Yu. Rakitin, V.Yu. Doluda, A.I. Petrova, I. P. Shkileva, V.G. Matveeva, G.N. Demidenko, E.M. Sulman, A.A. Rubina

APPLICATION OF RU/HPS CATALYSTS IN RECEIVING ANILINE IN MEDIUM SUPERCRITICAL CARBON DIOXIDE

Keywords: nitrobenzene, aniline, supercritical carbon dioxide, hydrogenation.

Results on research of catalytic hydrogenation of a nitrobenzene in the medium of isopropanol and in the medium of supercritical carbon dioxide are given in article. For carrying out process were used Ru/HPS catalysts. When using supercritical carbon dioxide selectivity of process, reaction rate and an exit of a main product – aniline increases.

А.А. Степачёва, Е.И. Шиманская, Е.С. Мигунова, В.Н. Сапунов, В.Г. Матвеева, А.М. Сульман, В.Ю. Долуда, Е.В. Ребров

КАТАЛИТИЧЕСКОЕ ГИДРИРОВАНИЕ КАРБОКСИЛЬНОЙ ГРУППЫ ЖИРНЫХ КИСЛОТ

Ключевые слова: коэффициент трансформации, катализатор, гидрирование, жирные спирты, биомасса, биотопливо.

Изучен процесс гидрирования карбоксильной группы жирных кислот в присутствии катализаторов на основе благородных металлов с целью получения высших спиртов. С помощью метода неформальной кинетики выдвинута гипотеза о механизме каталитического гидрирования карбоновых кислот.

A.A. Stepacheva, E.I. Shimanskaya, E.S. Migunova, V.N. Sapunov, V.G. Matveeva, A.M. Sulman, V.Yu. Doluda, E.V. Rebrov

CATALYTIC HYDROGENATION OF CARBOXYLIC GROUP OF FATTY ACIDS

Keywords: transformation coefficient, catalyst, hydrogenation, fatty alcohols, biomass, biofuel.

In current work the process of hydrogenation of carboxylic group of fatty acid in the presence of catalysts based on noble metals to produce fatty alcohols was studied. The hypothesis of catalytic hydrogenation of carbonic acids mechanism was developed using informal kinetic methods.

В.А. Стригина, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева, А.С. Скворцов, М.Г. Сульман, Э.М. Сульман, Е.В. Ребров

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКОФАЗНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФУРФУРОЛА

Ключевые слова: фурфурол, гидрирование, катлизатор, биомасса.

Гидрирование фурфурола является сложным многоступенчатым каталитическим процессом, в связи с чем, разработка катализаторов, способных синтезировать необходимые полупродукты является важной научно технической задачей. В статье отражены современные тенденции применения каталитических систем в жидкофазном гидрировании фурфурола.

V.A. Strigina, V.Yu. Doluda, V.G. Matveeva, A.S. Skvortsov, M.G. Sulman, E.M. Sulman, E.V. Rebrov

RESEARCH LIQUID-PHASE CATALYTIC FURFURAL REDUCTION

Keywords: furfural, hydrogenation, catalyst, biomass

This paper presents an overview of existing furfural hydrogenation catalysts and the results of the practical screening of Pd-containing catalysts on various carbon supports. The study showed the maximum conversion was obtained by using 5% Pd catalyst based on activated carbon at a temperature of 453 K and a pressure of 6.1 MPa, and was 15.72% with 87% selectivity.

Б.Б. Тихонов, А.И. Сидоров, П.Ю. Стадольникова, О.В. Матвеева, Н.В. Лакина

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МУЛЬТИФЕРМЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПЕРОКСИДАЗЫ ХРЕНА И ГЛЮКОЗООКСИДАЗЫ

Ключевые слова: пероксидаза хрена, глюкозооксидаза, мультиферментная система, глюкоза, о-дианизидин, иммобилизация.

В работе изучены свойства ферментативных систем на основе 2 ферментов класса оксидоредуктаз (пероксидазы хрена и глюкозооксидазы) в реакции окисления о-дианизидина. Процесс основан на окислении глюкозооксидазой β-D-глюкозы в присутствии кислорода до

B.B. Tihonov, A.I. Sidorov, P.Yu. Stadolnikova, O.V. Matveeva, N.V. Lakina

INVESTIGATION OF MULTIENZYME SYSTEMS BASED ON GLUCOSE OXIDASE AND HORSERADISH PEROXIDASE

Keywords: horseradish peroxidase, glucose oxidase, multienzymatic system, glucose, o-dianisidine, immobalization

In this article the properties of the enzymatic systems on the basis of two enzymes of a class of oxidoreductases (horseradish peroxidase and glucose oxydase) in the reaction of an o-dianizidine oxidation are investigated. Process is based on β-D-glucose oxidation in the presence of oxygen to β-D-glucono-δ-lactone and H_2O_2 by glucose oxydase and with use of the last

β-D-глюконо-δ-лактона и H_2O_2 и использовании последней для окисления о-дианизидина. Доказана возможность ковалентной иммобилизации данной мультиферментной системы на ионообменных смолах.

for the oxidation of o-dianizidine (with forming of the painted products). Possibility of a covalent immobilization of this multienzymatic system on ion-exchangers is proved.

А.С. Торозова, Э.М. Сульман, П.В. Синицына, П. Мяки-Арвела, К. П. Волчо, Д.Ю. Мурзин, И.Ю. Тямина
КАТАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДИОКСИНОЛА С ОБЕЗБОЛИВАЮЩИМ ЭФФЕКТОМ

Ключевые слова: цеолиты, эпоксид вербенола, биологически активные вещества с обезболивающим эффектом.

В настоящей работе представлены результаты по подбору и тестированию условий и катализаторов для осуществления реакции взаимодействия эпоксида вербенола с бензальдегидом. Целевой продукт реакции представляет собой диоксинол с выраженным обезболивающим действием. Для проведения реакции были использованы три различных альдегида и протестированы следующие катализаторы: H-Beta-300, H-Beta-150, H-Beta-25 и 5 мас.% Fe-Beta-150.

A.S. Torozova, E.M. Sulman, P.V. Sinitsyna, P. Mäki-Arvela, K.P. Volcho, D.Yu. Murzin, I.Yu. Tiamina
CATALYTIC SYNTHESIS OF DIOXINOL WITH ANTICONVULSANT ACTIVITY

Keywords: zeolites, isomerisation, verbenol oxide, anticonvulsant activity.

This paper presents the results of a study of the reaction between verbenol epoxide and benzaldehydes in different conditions. The target product is dioxinol with anticonvulsant activity.

Е.А. Фарберова, Е.А. Тиньгаева, А.Д. Чучалина, А.Р. Кобелева
ВЛИЯНИЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА КАМЕННОУГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА КАЧЕСТВО ПОЛУЧАЕМОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО АКТИВНОГО УГЛЯ

Ключевые слова: каменный уголь; гранулированный активный уголь; гранулометрический состав; истинная плотность; кажущаяся плотность; карбонизация; активация.

Изучено влияние степени измельчения неспекающегося каменного угля на технологические параметры процесса получения гранулированного активного угля и его качество. Установлено, что увеличение доли частиц мелкой фракции (0,1–40 мкм) в каменноугольной пыли позволяет улучшить его сорбционные характеристики.

E.A. Farberova, E.A. Tingaeva, A.D. Chuchalina, A.R. Kobeleva
THE INFLUENCE OF COAL DUST GRANULOMETRIC COMPOSITION ON EXTRUDED ACTIVATED CARBON QUALITY

Keywords: coal; extruded activated carbon; particle size distribution; true density; apparent density; carbonization; activation.

The influence of crushing degree of non-coking coal on the technical characteristics of extruded activated carbon and its quality. It is found that the increase of fine fraction particles (0,1 to 40,0 μm) content in coal dust allows to improve sorption characteristics of resulting extruded activated carbon.

Н.М. Хлынова
ИНВЕРСИОННО-ВОЛЬТАМПЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ЭЛЕКТРОДА

Ключевые слова: Фрактал, фрактальная размерность, электроосаждение, электрорастворение, монослой.

Показана возможность расчета на основе экспериментальных данных фрактальной размерности твердой поверхности электрода. Методом инверсионной вольтамперометрии осуществляется электроосаждение малорастворимого вещества на поверхности твердого электрода с последующим электрорастворением монослойной анодной пленки и нахождения количества осажденного вещества в монослое. Частицы осажденного вещества используются в качестве элементов покрывающего поверхность электрода множества.

N.M. Khlinova
STRIPPING VOLTAMMETRIC DETERMINATION OF THE FRACTAL DIMENSION OF THE SURFACE SOLID ELECTRODE

Keywords: Fractal, fractal dimension, electro-sedimentation, electro-dissolution, adsorbed layer.

The possibility of calculation on the basis of experimental data of fractal dimensionality of solid electrode surface is shown. Stripping voltammetry is used for electrodeposition of poorly soluble substance on the surface of solid electrode with subsequent electrodissolution of adsorbed layer anodic film and determination of the quantity of deposited substance in adsorbed layer. The particles of deposited compound are reviewed as elements of covering the surface of electrode plurality.

Е.И. Шиманская, А.А. Степачёва, Ю.В. Луговой, Э.М. Сульман, А.Е. Филатова, М.Г. Сульман, Е.В. Ребров
ПЕРЕРАБОТКА ЛИГНИНА И ЛИГНИН-СОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ЖИДКИЕ ТОПЛИВА

Ключевые слова: гидрогенолиз, биомасса, катализатор, лигнин, бензол, толуол, фенол.

Изучен процесс гидролитической переработки лигнин-содержащего сырья с использованием полярных растворителей в присутствии палладий-содержащих катализаторов. Найдено, что использование пропанола-2 позволяет достичь высоких степеней конверсии субстрата (до 80%) с получением ароматических соединений.

E.I. Shimanskaya, A.A. Stepacheva, Yu.V. Lugovoj, E.M. Sulman, A.E. Filatova, M.G. Sulman, E.V. Rebrov
PROCESSING OF LIGNIN AND LIGNIN CONTAINING RAW MATERIAL INTO LIQUID FUELS

Keywords: hydrogenolysis, biomass, catalyst, lignin, benzene, toluene, phenol.

In this paper hydrogenolysis process of plant biomass (sawdust) in the presence of a palladium-containing catalyst was investigated. Analysis of the liquid phase in all the experiments shown the presence of such compounds as benzene, toluene, phenol, o- and p-cresols, cyclohexane, methoxycyclohexane in the catalyzate. The best results were obtained using 2-propanol as a solvent.

В.Н. Абузяров, И.А. Акимов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОМЕХ НА ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВОМ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСТАНОВКАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Ключевые слова: технологический процесс, помехи, погрешность, композиционные материалы, установка автоматического ведения технологического процесса.

Статья посвящена выявлению причин влияющих на качество продукции из композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

V.N. Abuzyarov, I.A. Akimov

MATHEMATICAL MODELING OF INTERFERENCE TO THE MANAGEMENT PROCESSES OF COMPOSITE MATERIALS IN THE INSTALLATION OF AUTOMATIC BUSINESS PROCESS

Keywords : process , interference , fault , composite materials , the installation of an automatic process of doing .

The article is devoted to identifying the causes affecting the quality of products made of composite materials in the installation of an automatic process of doing (AVTP) .

В.Н. Абузяров, И.А. Акимов

ПРОЦЕСС УПРАВЛЕНИЯ С РАСПРЕДЕЛЕНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМАХ

Ключевые слова: технологический процесс, установка АВТП, математическая модель, композиционные материалы, температура, распределенные параметры.

Статья посвящена математическому моделированию процесса управления температурой в стационарных установках. Усовершенствованию установки автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

V.N. Abuzyarov, I.A. Akimov

MANAGEMENT PROCESSES WITH DISTRIBUTED PARAMETERS IN CLOSED SYSTEM

Keywords: process, facility AVTP, mathematical model, composite materials, the temperature distribution of the parameters.

The article is devoted to the mathematical modeling of the temperature control in fixed installations. Improvement of automatic installation of the technological process.

А.И. Акимов

ЗАДАЧА ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ПОЛОГО МНОГОСЛОЙНОГО ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТЕЛА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ДО ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Ключевые слова: композиционные материалы, термонапряжения, установки АВТП, температура полимеризации, остаточные термонапряжения.

В работе представлены результаты изучения охлаждения композиционных материалов в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП) после завершения процесса полимеризации. Для разработки систем управления производством композиционных материалов нужны знания естественного охлаждения изделия от температуры полимеризации до температуры окружающей среды, чтобы исключить опасные остаточные термонапряжения, которые выявляются в процессе эксплуатации.

A.I. Akimov

THE PROBLEM OF THE COOLING OF THE HOLLOW MULTILAYER CYLINDRICAL BODY MADE OF COMPOSITE MATERIALS TO THE TEMPERATURE OF POLYMERIZATION TO A TEMPERATURE OF THE ENVIRONMENT

Keywords: composite materials, thermonatrite, installation AWTP, the temperature of polymerization, residual thermonatrite.

The paper presents the results of a study of the cooling of composite materials in the automated technological process (AWTP) after completion of the polymerization process. For the development of production control systems composite materials desired value of the natural cooling of the product from the polymerization temperature to the ambient temperature, to avoid dangerous residual thermonatrite that occur during operation.

В.В. Аникеев, С.В. Елесин, В.Н. Пермяков

ВЛИЯНИЕ СЕЗОННЫХ УСЛОВИЙ НА РЕСУРС ДВИГАТЕЛЕЙ КОЛЕСНЫХ И ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

Ключевые слова: ресурс двигателя, нормирование, закономерности, климат, имитационная модель, сезонная вариация, расход картерных газов.

В статье рассматривается проблема влияния сезонных условий на формирование ресурса двигателей. Проанализированы подходы к решению этой задачи. Предложена методика корректирования нормативов ресурса двигателей с использованием программного пакета «RESURS».

V.V. Anikeev, S.V. Elesin, V.N. Permyakov

THE INFLUENCE OF SEASONAL CONDITIONS ON THE RESOURCE OF ENGINES OF WHEELED AND TRACKED VEHICLES

Keywords: the life of the engine, regulation, laws, climate, simulation model, seasonal variation, flow rate of crankcase gases.

In the article the problem of influence of seasonal conditions on the formation of resource engines. The approaches to solving this problem. The technique of adjusting standards of resource engines using programs stake "RESURS".

А.В. Антонов, С.Г. Фомичев, Т.В. Бурнышева

ОЦЕНКА УРОВНЯ УПРАВЛЯЕМОСТИ ПРОИЗВОДСТВОМ С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И НЕТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОСТОЕВ

Ключевые слова: технология производства, отказы оборудования, коэффициент управляемости производством.

В статье проводиться анализ причин снижения объема выпускаемой продукции на предприятиях, связанных с различными остановками в технологии производства. Рассматривается коэффициент управляемости производства, который учитывает известные подходы к

A.V. Antonov, S.G. Fomichev, T.V. Burnysheva

EVALUATING THE CONTROLLABILITY OF PRODUCTION LEVEL TAKING INTO ACCOUNT TECHNOLOGICAL AND NON-TECHNOLOGICAL DOWNTIME

Keywords: production technology, equipment failures, controllability of the production coefficient

In the article analyzed the reasons of the decline in output at the enterprises associated with various stops in the production technology. Considered controllability of production coefficient, which taking into the known approaches to

определению коэффициентов надежности технологий производства, используемых в расчетах объема выпускаемой продукции.

Р.С. Ахметшин, А.Ф. Анчугова, А.З. Гумеров
ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ ПЫЛИ В ПОМЕЩЕНИИ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Ключевые слова: неэкранированные электрические проводники; частицы пыли; небалансная результирующая сила.

Рассматривается помещение с двухфазной электропроводкой, уложенной по противоположным стенам помещения, к которому предъявлены повышенные требования к чистоте воздуха. Определяются условия, предъявляемые к монтажу системы электропроводки исходя из повышенных требований к чистоте воздуха.

R.S. Akhmetshin, A.F. Anchugova, A.Z. Gumerov
THE MOVEMENT OF DUST PARTICLES IN THE ROOM WITH THE ELECTROMAGNETIC FIELD

Keywords: unshielded electrical conductors; dust particles; unbalanced resultant force.

Examines the room with the two-phase wiring laid on opposite walls of the room, which brought increased demands for clean air. Defines the requirements for the wiring system based on high for clean air.

А.В. Базанов, В.И. Бауэр, Е.С. Козин, А.А. Мухортов
ВЛИЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ОРГАНИЗАЦИЮ ТО И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЕЙ ПРИ РЕМОНТЕ НЕФТЕПРОВОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Ключевые слова: передвижная авторемонтная мастерская, техническое обслуживание и ремонт, автомобили, специальная техника, ремонт нефтепровода.

В работе рассмотрены вопросы, связанные с выбором оптимального количества передвижных автомастерских для технического обслуживания и ремонта автомобилей и спецтехники, задействованных при ремонте нефтепровода. Выявлены закономерности влияния производственных факторов на потребность в автомастерских. Представлены рекомендации по определению оптимального количества передвижных автомастерских, а также по выбору места их базирования.

A.V. Bazanov, V.I. Bauer, E.S. Kozin, A.A. Muhortov
INFLUENCE OF PRODUCTION TECHNOLOGY FACTORS ON THE ORGANIZATION THE MAINTENANCE AND CAR REPAIRS AT REPAIR OF OIL PIPELINES OF WESTERN SIBERIA

Keywords: automobile repair shop, technical maintenance and repair, cars, special equipment, repair of the oil pipeline.

In work the questions connected with a choice of optimum number of mobile auto repair shops for the maintenance and car repairs and special equipment involved at repair of the oil pipeline are considered. Regularities of influence of production factors on need for auto repair shops are revealed. Recommendations about definition of optimum number of mobile auto repair shops, and also at the choice of a place of their basing are submitted.

Ф.Д. Байрамов, Б.Ф. Байрамов, А.Р. Фардеев
МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПОДАЧИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЁ ДИНАМИКИ

Ключевые слова: автоматический регулятор расхода жидкости, система подачи смазочно-охлаждающих технологических средств, математическое моделирование динамики, устойчивость работы.

Разработана принципиальная схема подачи смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) с регулятором расхода жидкости. Регулирование расхода осуществляется за счёт изменения частоты вращения вала насоса. Проведено математическое моделирование динамики и получены условия устойчивости такой системы.

F.D. Bairamov, B.F. Bairamov, A.R. Fardeev
MODERNISED SYSTEM OF GREASING-COOLING TECHNOLOGICAL SUBSTANCES DELIVERING OF METAL-CUTTING MACHINES AND THE INVESTIGATION OF ITS DYNAMICS

Keywords: automatic liquid flow regulator, the system of greasing-cooling technological substances delivering, mathematical modeling of the dynamics, work stability.

The principal scheme of greasing-cooling technological substances delivering with the automatic liquid flow regulator is developed. Liquid flow regulating is carried out due to the change of pump shaft rotation frequency. Mathematical modeling of the dynamics is fulfilled and the basic conditions of such system stability are received.

А.С. Баранов
РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕДЫ ДВИЖЕНИЮ ТЕЛА

Ключевые слова: лабораторные испытания, конструкция стенда, сила сопротивления среды движению тела.

Проводится анализ конструкции стенда для проведения лабораторных испытаний рабочих органов сельхозмашин. Предлагается конструкция стенда, применение которой снижает трудоемкость определения силы сопротивления среды движению тела и расширяет условия экспериментальных исследований. Для получения достоверных экспериментальных данных приведен расчет, даны рекомендации выбора места крепления рабочего органа на момент начала проведения испытаний.

A.S. Baranov
THE DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION AND THE ANALYSIS OF USE CONDITIONS FOR LABORATORY TESTING THE STAND DETERMINING THE RESISTANCE FORCE TO A BODY MOVEMENT

Keywords: laboratory testing, stand construction, resistance force to a body movement.

The construction of the stand used for laboratory testing operating devices of agricultural machinery is analyzed. The stand construction which allows to reduce the labour intensity while determining the resistance force to a body movement and to broaden the conditions of experimental studies is proposed. To obtain valid experimental data the calculations were performed; the recommendations for the location where the operating device is attached at the starting moment of testing were given.

Л.В. Беляев, И.В. Волкова, А.В. Жданов
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

L.V. Belyaev, I.V. Volkova, A.V. Zhdanov
MANUFACTURING TECHNOLOGIES OF COMPONENTS

ИСКУССТВЕННЫХ ЖЕЛУДОЧКОВ СЕРДЦА ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИСТЕМ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО КРОВООБРАЩЕНИЯ И ИСКУССТВЕННОГО СЕРДЦА ИЗ ГЕМОСОВМЕСТИМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: искусственный желудочек сердца, технологии изготовления, гемосовметимые материалы.

Целью данной статьи является описание материалов, применяемых для изготовления искусственных желудочков сердца российских систем вспомогательного кровообращения и искусственного сердца пульсирующего типа, а так же обзор и критический анализ возможных технологий для их изготовления.

OF ARTIFICIAL HEART VENTRICLES FOR PULSATIVE ASSIST AND ARTIFICIAL HEART SYSTEMS FROM HEMOCOMPATIBLY MATERIALS

Keywords: artificial heart ventricle, manufacturing technology, hemocompatible materials

The purpose of this article is to describe the materials used for the manufacture of artificial ventricles of the heart of Russian systems of circulatory support and artificial heart pulsing type, as well as review and critical analysis of the possible technologies for their manufacture.

Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов, М.В. Ильин, А.В. Евишев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ ПРОТИВО-ЭДС В НАГРУЗКЕ

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, тиристорный преобразователь, противо-ЭДС, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.

В статье рассматриваются особенности работы однофазного однополупериодного тиристорного преобразователя в электроприводе постоянного тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС. Представлены результаты моделирования работы преобразователя при различных значениях противо-ЭДС в нагрузке. Получена зависимость величины ёмкости снабберного конденсатора, необходимого для ограничения амплитуды коммутационных перенапряжений, от значений противо-ЭДС.

N.N. Bespalov, S.S. Kapitonov, M.V. Ilyin, A.V. Evishev

RESEARCH OF OPERATING MODES OF THYRISTOR CONVERTERS IN DC ELECTRIC DRIVE WITH VARIATION OF BACK-EMF IN LOAD

Keywords: DC electric drive, thyristor converter, back-EMF, switching overvoltage, snubber circuit.

This article discusses features of work a single-phase half-wave thyristor converter DC electric drive, working in an active-inductive load with the back-EMF. The simulation results of the converter for different values of the back-EMF of the load. Dependence the value of the snubber capacitor capacitance required to limit the amplitude of the switching overvoltage, the values of the back-EMF is presented.

Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов, М.В. Ильин, А.В. Евишев

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТИРИСТОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ВАРИАЦИИ ВЕЛИЧИН ИНДУКТИВНОСТИ НАГРУЗКИ

Ключевые слова: тиристорный преобразователь, электропривод постоянного тока, суммарная индуктивность нагрузки, коммутационное перенапряжение, снабберная цепь.

В статье исследуются работа однофазного однополупериодного тиристорного преобразователя в электроприводе постоянного тока, работающего на активно-индуктивную нагрузку с противо-ЭДС. Проведено моделирование работы преобразователя при различных значениях суммарной индуктивности нагрузки. Представлена полученная зависимость величины ёмкости снабберного конденсатора, от значений суммарной индуктивности нагрузки.

N.N. Bespalov, S.S. Kapitonov, M.V. Ilyin, A.V. Evishev

RESEARCH OF OPERATING MODES OF THYRISTOR CONVERTERS IN DC ELECTRIC DRIVE WITH VARIATION OF LOAD INDUCTANCE

Keywords: thyristor converter, DC electric drive, total inductance of the load, switching overvoltage, snubber circuit.

In article research the work of a single-phase half-wave thyristor converter in DC electric drive, working in an active-inductive load with the back-EMF. The simulation of the converter for different values of the total load inductance. Dependence of the snubber capacitor capacitance, the values of the total load inductance is presented.

Д.М. Бородин, В.В. Конев

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ГИДРОЦИЛИНДРА ЗЕМЛЕРОЙНОЙ МАШИНЫ С ЛОКАЛЬНЫМ ПРОГРЕВОМ

Ключевые слова: гидропривод, локальный прогрев, землеройная машина, тепловая подготовка.

В статье представлен анализ систем тепловой подготовки гидропривода землеройных машин на основе которого разрабатывается способ локального прогрева гидродвигателя. Исследуется конструкция гидроцилиндра с локальным прогревом. Модернизация землеройных машин позволяет повысить ее эффективность за счет снижения времени тепловой подготовки и увеличения производительности.

D.M. Borodin, V.V. Konev

DEVELOPMENT OF THE CONSTRUCTION CYLINDER EARTHMOVER WITH LOCAL WARMING

Keywords: hydraulic, local heating, digger, thermal training.

The analysis of the thermal preparation of hydraulic drive systems earthmoving machinery on which developed a way to warm up the local hydraulic. We study the design of the hydraulic cylinder with a local warming. Modernization of earthmoving equipment improves its efficiency by reducing the time of preparation of heat and increase performance.

Е.Ф. Бояркина, В.Г. Логачев

ФАКТОР «МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ ОБЩЕСТВА» ПРИ ИЗУЧЕНИИ УРОВНЯ АВТОМОБИЛИЗАЦИИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

E.F. Boyarkina, V.G. Logachev

THE FACTOR “SOCIETY BEHAVIOR MODEL” IN THE RESEARCHING OF CAR OWNERSHIP IN RUSSIA AND ABROAD

Ключевые слова: уровень автомобилизации, модель поведения общества.

Рассматривается понятие термина «модель поведения общества». Приводятся примеры влияния этого фактора на уровень автомобилизации населения в разных странах. Раскрывается механизм формирования модели поведения общества.

Keywords: car ownership, society behavior model

This paper presents the term notion "society behavior model". The author describes the examples of the influence of this factor on car ownership in different countries. The mechanism of society behavior model forming is revealed.

А.П. Буйносов, Д.С. Денисов

БЛОК ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРАЦИИ УЗЛОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА В ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ключевые слова: электропоезд, узел, эксплуатация, блок, исследование, разработка, предварительный анализ.

В статье приведены результаты создания блока для экспериментальных исследований вибрации узлов моторного вагона электропоезда в эксплуатации.

A.P. Buinosov, D.S Denisov

THE BLOCK FOR PILOT STUDIES OF VIBRATION OF KNOTS OF THE ELECTRIC TRAIN IN OPERATION

Keywords: electric train, knot, operation, block, probe, development, preliminary analysis.

In article results of creation of the block for pilot studies of vibration of knots of the motor car of an electric train are given in operation.

А.П. Буйносов, А.В. Панфилов

ВЫБОР ПРОФИЛЯ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ 2ЭС6

Ключевые слова: электровоз, 2ЭС6, колесная пара, бандаж, профиль, износ, контролируемые параметры, ресурс, сравнение, результаты.

В статье приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных исследований определения наиболее эффективного профиля поверхности катания бандажей исходя из критерия максимального ресурса до смены колесных пар электровозов 2ЭС6.

A.P. Buinosov, A.V. Panfilov

CHOICE OF THE CROSS-SECTION OF BANDAGES OF WHEELPAIRS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES 2ES6

Keywords: electric locomotive, 2ES6, wheelpair, bandage, cross-section, wear, controlled parameters, resource, comparison, results.

In article results of the comparative analysis of pilot studies definitions of the most effective surface profile of driving of bandages proceeding from criterion of the maximum resource before change of wheelpairs of electric locomotives 2ES6 are given.

А.П. Буйносов, И.О. Шепелева

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ БАНДАЖЕЙ ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ КОЛЕСНЫХ ПАР ЭЛЕКТРОВОЗОВ

Ключевые слова: электровоз, колесная пара, бандаж, упрочнение, нагрев, тепло, моделирование, результаты.

В статье приведены результаты моделирования упрочнения стали бандажей при термообработке колесных пар электровозов с использованием импульсного или быстродвижущегося теплового источника.

A.P. Buinosov, I.O. Shepeleva

RESULTS OF MODELLING OF HARDENING OF STEEL OF BANDAGES AT HEAT TREATMENT OF WHEELPAIRS OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

Keywords: electric locomotive, wheelpair, bandage, hardening, heating, heat, modeling, results.

Results of modeling of hardening of steel of bandages at heat treatment of wheelpairs of electric locomotives with use of a pulse or fast-moving thermal source are given in article.

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА КОЛЕБАНИЯ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА В СИСТЕМЕ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ»

Ключевые слова: численное моделирование, лопатки осевого компрессора, фазовый сдвиг, компрессор ГПА, ANSYSCFX.

В работе представлены результаты численного моделирования влияния кинематических параметров на колебания лопаток модельного компрессора ГПА в динамической системе «газ-конструкция». Рассмотрен случай консольного закрепления лопаток. При различных скоростях потока, а также при различных углах сдвига фаз между колебаниями лопаток исследуются газодинамические силы, действующие на конструкцию. Показано, что сдвиг фаз между изменением соответствующих газодинамических сил, действующих на лопатки и колебаниями лопаток может не соответствовать сдвигам фаз между колебаниями лопаток.

L.N. Butymova, V.YA. Modorskiy, V.YU. Petrov

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF THE KINEMATIC PARAMETERS TO FLUCTUATIONS BLADES MODEL COMPRESSION SYSTEM "GAZ-CONSTRUCTION"

Keywords: numerical simulation, blades of axial compressor, phase offset, the compressor GPA, ANSYS CFX.

This paper presented the results of the numerical simulation of the influence of the kinematic parameters to fluctuations blades model compression system "gaz-construction". Blades fixed cantilever. Between the blades fluctuations investigated gas-dynamic forces acting on the structure with different flow rates and with different angles of phase offset. The phase offset changed between the respective gas-dynamic forces that acted on the blades and blades fluctuations. This phase offset may not correspond to phase offset between the blades fluctuations.

Л.Н. Бутымова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОК МОДЕЛЬНОГО КОМПРЕССОРА НА СИСТЕМУ «ГАЗ-КОНСТРУКЦИЯ»

Ключевые слова: численное моделирование, лопатки осевого компрессора, фазовый сдвиг, компрессор ГПА, ANSYS CFX.

В работе представлены результаты численного моделирования влияния колебаний лопаток модельного компрессора ГПА на систему «газ-конструкция». Показано,

L.N. Butymova, V.YA. Modorskiy, V.YU. Petrov

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF FLUCTUATIONS IN THE COMPRESSOR BLADES ON THE MODEL SYSTEM "GAS-CONSTRUCTION"

Keywords: numerical simulation, blades of axial compressor, phase offset, the compressor GPA, ANSYS CFX.

This paper presents the results of the numerical simulation of the influence of fluctuations in the compressor blades on the model system "gas-construction". It is shown that the

что сдвиг фаз в колебаниях соседних лопаток не всегда соответствует сдвигу фаз газодинамических сил, действующих на лопатки. Сделан вывод о необходимости исследования факторов, влияющих на сдвиг фаз колебаний в газе относительно колебаний конструкции для гашения вибраций. На модельной задаче обнаружено, что несинхронное колебание лопаток может приводить к гашению или ослаблению колебаний.

neighboring blades have the phase offset. The phase offset of the neighboring blades does not always correspond to a phase offset of gas-dynamic forces acting on the blades. Conclusion is made about the need to study the factors influencing the phase offset concerning the fluctuations in the gas vibrations of the construction for absorb vibrations. On the model task found that non-synchronous fluctuation of blades can lead to extinction or easing of the fluctuations.

В.В. Бухтояров, А.К. Данилов, Н.В. Иванов, В.С. Тынченко

НЕЙРОСЕТЕВАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, диагностирование, искусственные нейронные сети, надежность.

В статье представлены результаты разработки и исследования подхода к решению задач моделирования, в основе которого лежит пример алгоритмического комплекса для ЭВМ и проводится анализ системы мониторинга (контроль, оценка, прогнозирование), базирующаяся на применении методов системного анализа для принятия управленческих решений в условиях большого количества информации. Приведены результаты численных исследований эффективности предлагаемой системы диагностики на наборе тщательно сгенерированных данных.

V.V. Bukhtoyarov, A.K. Danilov, N.V. Ivanov, V.S. Tynchenko

SYSTEM DIAGNOSTICIANS OF OIL PUMPING EQUIPMENT

Keywords: simulation, forecasting, diagnosing, neural networks, reliability.

The results of development and research of approach to the solution of problems of simulation and the analysis of system of monitoring (control, an assessment, forecasting), based on application of methods of system analysis for adoption of administrative decisions in the conditions of a large number of information is carried out. Results of numerical researches of efficiency system of diagnostics are given on a set of carefully generated data.

Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин

ГИБРИДНАЯ ПРОГРАММНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ

Ключевые слова: система логического вывода, дедуктивный логический вывод, процедура деления дизъюнктов, определение фактов.

Предлагается структура гибридной системы логического вывода с определением фактов. Оценивается эффективность программной реализации гибридной системы логического вывода.

D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin

HYBRID SOFTWARE SYSTEMS OF INFERENCE WITH FACTS DETERMINATION

Keywords: system of inference, deductive inference, disjunct division procedure, facts determination.

The proposed structure of the hybrid system of inference with facts determination. Evaluated the effectiveness of a software implementation the hybrid system of inference.

Р.О. Волошин, Ю.П. Ясьян

ВЛИЯНИЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ПРИСАДКИ ЦДП НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ

Ключевые слова: дизельное топливо, жирные кислоты таловых масел, противоизносные свойства, диаметр пятна износа, коэффициент трения.

Представлена существующая потребность рынка дизельных топлив России в присадках. Перечислены преимущества использования жирных кислот таловых масел (ЖКТМ) в качестве противоизносных присадок. Представлены результаты воздействия ЖКТМ на противоизносные свойства дизельных топлив. Проведены исследования по способности полифункциональной присадки ЦДП уменьшать диаметр пятна износа и снижать коэффициент трения.

R.O. Voloshin, Y.P. Yasyan

INFLUENCE OFMULTIFUNCTIONAL ADDITIVES CDP ON ANTI-WEAR PROPERTIES OFDIRSEL FUELS

Key words: diesel fuel, tall oil fatty acid, lubricity, wear scar diameter, friction coefficient.

Existing demand of diesel fuel additives in Russia are submitted. The advantages of the use tall oil fatty acids as lubricity are discribed. The results of the impact ZHKTM to lubricity of diesel fuels are compared. Ability of multifunctional additive CDP to reduce the spot diameter of wear and reduce friction are stadied.

В.В. Воронин, В.И. Марчук, Н.В. Гапон, Р.А. Сизякин, Д.В. Фоломкин

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С ДИНАМИЧЕСКИМИ СЦЕНАМИ

Ключевые слова: реконструкция, видеопоследовательность, синтез текстуры, AR-модель.

В статье описан новый подход для удаления выделенных динамических объектов в видеосигналах, при условии, что объекты перекрывают часть сцены на статичном фоне. Предлагаемый подход позволяет удалять объекты или восстанавливать отсутствующие или испорченные области, используя пространственную и временную информацию соседних кадров. Показана эффективность нового подхода на нескольких примерах в сравнении с известными методами восстановления

V.V. Voronin, V.I. Marchuk, N.V. Gapon, R.A. Sizyakin, D.N. Folomkin

RECOVERY OF VIDEO SEQUENCE WITH DYNAMIC SCENES

Keywords: reconstruction, video sequences, texture synthesis, AR model.

This paper describes a novel inpainting approach for removing marked dynamic objects from videos captured with a camera, so long as the objects occlude parts of the scene with a static background. Proposed approach allow to remove objects or restore missing or tainted regions present in a video sequence by utilizing spatial and temporal information from neighboring scenes. We demonstrate the performance of a new approach via several examples, showing the effectiveness of our algorithm and compared with state-of-the-art video inpainting

видеопоследовательностей.

Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «ЖИДКОСТЬ – ГАЗ – КОНСТРУКЦИЯ» НА МОДЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ

Ключевые слова: модельная установка, экспериментальная установка, гидроупругость, взаимодействие в динамической системе «жидкость – газ – конструкция».

Для исследования кавитационных эффектов при вибрации конструкции создана модельная установка для анализа и обработки параметров быстропротекающих процессов в динамической системе «жидкость – газ – конструкция». Приводится описание основных узлов установки. Проводится методика работы на модельной установке.

Д.Ф. Гайнутдинова, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО ТЕЛА И СЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

Ключевые слова: волновые процессы, колебания, взаимодействие в динамической системе «жидкость-подвижная стенка».

Численным методом решена модельная задача о движении поршня в замкнутой трубе, заполненной водой. Использованы математическая модель, алгоритм и метод, апробированные ранее для газодинамических расчетов. Проведен сравнительный анализ численного и аналитического решений. Показана принципиальная возможность использования предложенного подхода к решению задач по исследованию динамических процессов в системе «газ – жидкость – подвижное деформируемое тело» и «газ – жидкость – деформируемая конструкция».

Ф.М. Гайсин, Р.Т. Насибуллин, А.Ш. Садриев, Р.Ш. Садриев, Л.Р. Саримов
ПРИМЕНЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ

Ключевые слова: высокочастотный разряд, дуга обратной полярности, плазма.

Статья посвящена решению проблемы сварки металлов, имеющих на поверхности тугоплавкие окисные пленки с помощью применения особенностей высокочастотного разряда в технологических циклах сварки металлов. Были проведены исследования высокочастотного разряда обратной полярности, горящий между соплом плазменной горелки и изделием, возбуждаемый и стабилизируемый с помощью факела плазмы, в ходе экспериментов были получены сваренные образцы из цветных металлов и алюминия.

И.В. Гуляев, А.В. Волков, А.А. Попов, М.А. Бобров
ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами, векторное управление, ток, магнитный поток.

В статье даётся краткая характеристика синхронных двигателей, рассматриваются принципы векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами. Приводятся структурные схемы систем векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с определением положения ротора.

Т.А. Деменкова, М.С. Побережный
АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

methods.

D.F. Gaynutdinova, V.Ya. Modorsky, V.Yu. Petrov
DEVELOPMENT OF TECHNIQUES OF EXPERIMENTS ON ESTIMATION OF PARAMETERS OF FAST PROCESSES IN DYNAMICAL SYSTEMS "LIQUID - GAS - STRUCTURE" ON MODEL STAND

Keywords: model stand, experimental stand, hydroelasticity, interaction in a dynamic system "liquid - gas - structure".

To investigate the effects of cavitation during vibration structure created a model system. This stand intended for the analysis and processing of the parameters of fast processes in a dynamic system "liquid - gas - structure". This article provides a description of the main components of model stand. Held technique works on a model stand.

D.F. Gainutdinova, V.Ya. Modorsky, V.Yu. Petrov
NUMERICAL SIMULATION MUTUAL MOVABLE BODY AND SQUEEZES LIQUID BY METHOD LARGE PARTICLES

Keywords: wave processes, fluctuations in the dynamic interaction of the system "liquid-movable wall".

Numerically solved the problem of modeling the movement of the piston in a closed tube filled with water. We used a mathematical model, algorithms and methods previously tested for gas-dynamic calculations. A comparative analysis of numerical and analytical solutions. The principal possibility of using this approach to solving problems in the study of dynamic processes in the "gas - liquid - moving deformable body" and "gas - liquid - deformable structures".

F.M. Gaysin, R.T. Nasibullin, A.Sh. Sadriev, R.Sh. Sadriev, L.R. Sarimov
THE PRACTICE OF FEATURES OF HIGH-FREQUENCY DISCHARGES IN THE TECHNOLOGICAL CYCLE

Keywords: high-frequency discharge, arc of reverse polarity, plasma.

The article tells about decisions of problems of metal welding, that has refractory oxide skins on a surface. This method is possible through the practice of features of high-frequency discharges in the technological cycle of metal welding. Researches were done the arc discharge having an opposite polarity and burning between the high-frequency discharge into the plasma torch and a ware which is caused and stabilized with the help of a not plasma. As a result of the experiments the examples made of non-ferrous metals and aluminum were got.

I.V. Gulyaev, A.V. Volkov, A.A. Popov, M.A. Bobrov
VECTOR CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Keywords: permanent magnet synchronous motor, vector control, current, magnetic flux.

The article provides a brief description of synchronous motors, discusses the principles of vector control of permanent magnet synchronous motor. Block diagrams of vector control systems of permanent magnet synchronous motor with the determination of the rotor position.

T.A. Demenkova, M.S. Poberezny
HARDWARE REALIZATION OF ALGORITHM OF PROCESSING IMAGE

*Ключевые слова***:** *синтез радиолокационного изображения, языки описания аппаратуры, программируемые логические интегральные схемы.*

В работе представлены результаты исследований в области аппаратной реализации алгоритмов цифровой обработки информации на примере синтеза радиолокационных изображений с учетом миграции дальности, описывается решение на языке описания аппаратуры VHDL. Работа выполнена в Центре проектирования интегральных схем, устройств наноэлектроники и микросистем МИРЭА в рамках научно-исследовательского проекта №35.

Keywords: synthesis of radar-tracking image, hardware description languages, VLSI.

In work the results of researches in the field of hardware realization of algorithms of digital processing of information on example of synthesis of the radar-tracking images in view of migration of range are submitted. The decision in VHDL is described. This work is made in "Design center of integrated circuits, nano-electronics devices and MEMS" of MIREA within the framework of the research project №35.

Т.Н. Иванова, Л.К. Шушкова, О.А. Чикишева

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Ключевые слова: осесимметричные детали, сталь, термообработка, прочность, остаточные напряжения.

Осесимметричные детали работают в разнообразных условиях, находятся под высокой температурой и давлении, подвергаются силовым воздействиям, что приводит к возникновению значительных остаточных напряжений (кольцевых и продольных) и деформаций. При неблагоприятном сочетании нагрузок происходят трещины, прогибы, смятия детали. Проведены исследования прочности и устойчивости продольных и поперечных сечений осесимметричной детали. Рекомендованы режимы термообработки стальной осесимметричной детали.

T.N. Ivanova, O.A. Chikisheva, L.K. Shushkova

IMPROVING THE EFFICIENCY OF ROTATIONALLY SYMMETRIC PARTS

Keywords: axisymmetric parts, steel, heat treatment, strength, residual stresses.

Symmetrical components working in diverse conditions, under high temperature and pressure, are subjected to force effects, which leads to significant residual stresses (circumferential and longitudinal) and deformations. Under adverse load combination occur cracks, deflections, shear details. Conducted research strength and stability of longitudinal and cross sections of axisymmetric parts. Recommended regimes of heat treatment of steel symmetrical components.

В.А. Кондряков, Аль-Рубой Мудар, Е.А. Рубцов

ВАРИАНТ РАЦИОНАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ СИСТЕМ VOR/DME В РЕСПУБЛИКЕ ИРАК

Ключевые слова: оптимизация, VOR, DME, рациональное размещение.

Предлагается вариант рационального размещения VOR/DME на территории Республики Ирак для обеспечения требуемой точности и безопасности полетов в случае отказа спутниковых систем навигации. Применяется модифицированный метод определения рационального размещения РТС навигации, который позволяет решить задачу полного перекрытия воздушного пространства Республики Ирак зонами действия и перекрытия воздушных трасс рабочими областями.

V.A. Kondryakov, Al-Rubaye Mudher, E.A. Rubtsov

VARIANT OF RATIONAL ALLOCATION OF VOR/DME IN THE REPUBLIC OF IRAQ

Keywords: optimization, VOR, DME, rational allocation.

Proposed a variant of rational allocation of VOR/DME on the territory of the Republic of Iraq to ensure the required accuracy and safety in case of failure of satellite navigation systems. Implemented a modified method for the determination of rational allocation of radio navigation aids, which allows solving the problems: covering of the airspace of the Republic of Iraq, and covering air routes with effective ranges.

В.В. Конев, Д.М. Бородин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН

Ключевые слова: тепловая подготовка, гараж, строительно-дорожные машины, хранение, эксплуатация, экспериментальные исследования.

В работе представлены результаты исследования процессов изменения теплового состояния строительно-дорожных машин, эксплуатируемых в северных условиях России. Экспериментально исследуется новый подход, заключающийся в сохранении тепла машины, накопленного во время рабочей смены. Это позволяет исключить использование внешних источников энергии для предпусковой тепловой подготовки машины, эксплуатируемой автономно.

V.V. Konev, D.M. Borodin

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL STATE ROAD CONSTRUCTION MACHINERY

Keywords: thermal preparation, garage, construction machinery, storage, handling, experimental studies

The results of the study process changes the thermal state of road construction machinery, operating in the northern Russian conditions. Experimentally investigated a new approach, which consists in maintaining the machines heat accumulated during the work shift. This eliminates the use of external sources of energy for thermal pre-launch preparation of the car operated autonomously.

Ю.А. Кузнецова

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦИИ ДОННОГО СЛОЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ГИДРОУЗЛА

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, деформация донного слоя, нижний бьеф, энергетическая модель устойчивости, модельная балка, сцепление частиц грунта, глубина размыва.

Разрушение донного слоя распределенными нагрузками исследовано на основе энергетической модели устойчивости стержней. По зависимости для изгибающего момента

Yu.A. Kuznetsova

ENERGY MODEL OF BOTTOM LAYER DEFORMATION IN HYDROSYSTEM TAILRACE

Keywords: hydraulic facility, bottom layer deformation, tailrace, energy model of stability, model beam, coalescence of soil particles, erosion depth.

Destruction of the bottom layer by the external distributed loads is investigated based on the energy model of rods stability. Energy of bending is determined on the basis of the bending energy dependence. By substitution of the bottom soil

определена энергия изгиба. В результате подстановки параметров слоя донного грунта в выражения энергии изгиба и работы силового воздействия, индуцированного потоком в нижнем бьефе, найдена функция глубин размыва от длины русла. Выведена формула критической скорости размыва.

layer parameters in the bending energy expression and the expression of work of force action induced by the flow in the tailrace, the function of the erosion depth distribution along the river bed length is found. Formula for calculating the critical velocity of erosion is derived.

С.В. Леонтьев, В.А. Голубев, В.А. Шаманов, А.Д. Курзанов

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГАЗООБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ГАЗОБЕТОНА АВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

Ключевые слова: Автоклавный газобетон, теплоизоляция, алюминиевая паста, специализированный газообразователь, структурообразование.

В статье представлены результаты исследования влияния различных газообразователей на формирование структуры ячеистого бетона, а также дана оценка эффективности их использования. Замена в составе АГБ алюминиевой пудры «ПАП-1» на специализированный газообразователь «Stapa Alupor N905» позволила снизить плотность образцов на 15-20% за счет формирования гексагональной ячеистой структуры материала, а также стабилизировать процессы газообразования и вспучивания ячеистобетонного массива.

S.V. Leontev, V.A. Golubev, V.A. Shamanov, A.D. Kurzanov

THE RESEARCH OF INFLUENCE OF VARIOUS BLOWING AGENTS ON THE STRUCTURE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE WITH LOW DENSITY

Keywords: Autoclave aerated concrete, insulation, aluminum paste, special blowing agent, structure.

The article presents the results of a study the effect of different blowing agents on the structure of autoclaved aerated concrete and evaluates the effectiveness of their use. Substitution in the AAC aluminum powder «PAP-1» on a dedicated blowing «Stapa Alupor N905» has reduced the density of the samples by 15-20% due to the formation of the hexagonal honeycomb structure of the material, as well as to stabilize the processes of gasification and swelling of porous solid.

Р.И. Ливеровский

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ НА ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ

Ключевые слова: метод Давыдова, сжимаемый газ, нерегулярная четырехгранная сетка, численное моделирование.

Данное исследование посвящено модификации метода крупных частиц для случая четырехгранной сетки. В работе проводится сравнение численных результатов моделирования движения идеального сжимаемого газа, полученных с использованием метода Давыдова для трехмерного случая на четырехгранной сетке, с результатами, полученными различными методами в двухмерном пространстве.

R.I. Liverovskiy

NUMERICAL SIMULATION OF SUPERSONIC THREE-DIMENSIONAL GAS DYNAMICS PROBLEMS ON A TETRAHEDRAL GRID

Keywords: Davydov's method, compressible gas, irregular tetrahedral grid, numerical simulation.

This study focuses on modification of the large particles method in case of the tetrahedral grid. Ih this paper the comparision of numerical results of the motion of a perfect compressible gas obtained using the Davydov's method in three-dimensional space on the tetrahedral mesh with the results of different methods in two dimensional space is carried out.

Р.И. Ливеровский, С.П. Шевырев

РАЗНОСТНАЯ СХЕМА МЕТОДА ДАВЫДОВА ДЛЯ ТРЕХМЕРНЫХ ТЕЧЕНИЙ СЖИМАЕМОГО ГАЗА НА НЕРЕГУЛЯРНОЙ ЧЕТЫРЕХГРАННОЙ СЕТКЕ

Ключевые слова: метод Давыдова, сжимаемый газ, нерегулярная четырехгранная сетка.

В работе описывается разработанный численный подход к решению трехмерных уравнений течения невязкого совершенного газа с использованием нерегулярной четырехгранной сетки. Приведены расчетные формулы, описано задание начальных и граничных условий.

R.I. Liverovskiy, S.P. Shevirev

DIFFERENTIAL SCHEME OF DAVIDOV'S METHOD FOR THREE-DIMENSIONAL FLOW OF COMPRESSIBLE GAS ON AN IRREGULAR TETRAHEDRAL GRID

Keywords: Davydov's method, compressible gas, irregular tetrahedral grid.

The paper describes the developed numerical approach to the solution of three-dimensional equations of inviscous perfect gas flows with an irregular tetrahedral mesh. Calculation formulas are carried out, there is a description of assignment of initial and boundary conditions.

С.А. Лисаков, А.Н. Павлов, Е.В. Сыпин, Г.В. Леонов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ГАЗОДИСПЕРСНОЙ СИСТЕМЕ «УГОЛЬНАЯ ПЫЛЬ–ВОЗДУХ»

Ключевые слова: оптическое излучение, оптико-электронный датчик, возгорание, газодисперсная система, ослабление.

В статье описывается постановка задачи моделирования ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух». Рассмотрены параметры и характеристики газодисперсной системы «угольная пыль–воздух», влияющие на ослабление оптического излучения. Проанализированы подходы к моделированию ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль-воздух» и обосновано использование теории Ми. Сформулированы исходные данные для проведения моделирования. Выполнена постановка задачи расчета.

S.A. Lisakov, A.N. Pavlov, E.V. Sypin, G.V. Leonov

DETERMINATION OF OPTICAL RADIATION ATTENUATION IN DISPERSED SYSTEM «COAL DUST-AIR»

Keywords: optical radiation, electro-optical gauge, fire, dispersed system, attenuation.

The article describes statement of a task of modeling of optical radiation attenuation in dispersed system «coal dust-air». Parameters and characteristics of dispersed system «coal dust-air» are considered. These parameters and characteristics define attenuation of optical radiation. Approaches to modeling of optical radiation attenuation in dispersed system «coal dust-air» are analyzed. Use of Mie theory for modeling of optical radiation attenuation is proved. Initial data for modeling are formulated. Statement of the calculation task is carried out. The further work is directed on modeling of optical radiation attenuation in dispersed system «coal dust-air» according to

Дальнейшая работа направлена на моделирование ослабления оптического излучения в газодисперсной системе «угольная пыль–воздух» в соответствии с постановкой задачи расчета.

statement of the calculation task.

Д.В. Литвина, Л.Б. Строгонова

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ТЕОРИИ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В МЕДИЦИНЕ

Ключевые слова: телемедицина, теория поддержки принятия решений, здравоохранение.

Телемедицинские методики возникли и совершенствовались на основе медицинского контроля, разрабатываемого и применяемого для пилотируемых космических полетов. На Земле и в Космосе возникают ситуации, когда требуется принимать решение на месте. В этом случае необходима разработка система поддержки принятия решения для той или иной медицинской ситуации. Для космических проблем такие системы разрабатываются, в связи предстоящими пилотируемыми полетами к планетам.

D. Litvina, L. Strogonova

MATHEMATICAL METHODS OF THE THEORY OF DECISION SUPPORT IN MEDICINE

Keywords: Telemedicine, theory of decision support, healthcare.

Telemedicine methods appeared and improved on the basis of medical monitoring for manned space flight. On Earth and in space there are situations when it is necessary to take a decision in the situ. In this case, it is necessary to develop a decision support system for different medical situations. For space problems, such systems are being developed for manned interplanetary flights. Leading area for Space Medicine and the population of Russia is the diseases of the cardiovascular system.

В.Х. Май, Н.Н. Черникова, А.И. Сердюк

О НОВОМ ПОДХОДЕ К РАЗРАБОТКЕ САПР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ключевые слова: машиностроение, технология, автоматизация проектирования, САПР ТП.

Разработан новый подход к созданию систем автоматизированного проектирования технологических процессов (САПР ТП) механической обработки. Подход включает формализованное описание интеллектуальных и типовых задач, решаемых инженером – технологом. Разработана опытная версия САПР, осуществляющая структурно-параметрический синтез технологических процессов.

V.H. May, N.N. Chernikova, A.I. Serdyuk

A NEW APPROACH TO CAD DESIGN TECHNOLOGICAL PROCESSES OF MACHINING

Keywords: engineering, technology, design automation, CAD

A new approach to the creation of computer-aided design of technological processes machining. The approach includes a formalized description of the intellectual and typical problems solved engineer - technologist. A pilot version of the CAD undertaking structural and parametric synthesis processes.

А.А. Мальцев, И.А. Мальцев

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ СХЕМЫ СВЕТОДИОДА МЕТОДОМ МНОГОВАРИАНТНОГО АНАЛИЗА

Ключевые слова: тепловое сопротивление переход-корпус, эквивалентная тепловая схема светодиода, метод многовариантного анализа.

В статье рассмотрены особенности моделирования эквивалентной тепловой схемы светодиода для нестационарного теплового процесса, методом многовариантного анализа.

A.A. Maltsev, I.A. Maltsev

ANALYSIS OF THERMAL EQUIVALENT CIRCUITS LED BY MULTIVARIATE ANALYSIS

Keywords: thermal resistance junction to case, the equivalent thermal circuit LED method of multivariate analysis.

The article describes the features of modeling the equivalent thermal circuit LEDs for non-stationary process, by multivariate analysis.

В.Ю. Мельцов, А.С. Куваев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССОРА С БЛОКОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ УНИФИКАЦИИ

Ключевые слова: машина логического вывода, исполнительный процессор, блок унификации, ПЛИС.

В работе представлено описание процесса разработки исполнительной подсистемы машины логического вывода. Рассмотрена детализированная структура исполнительного процессора, а также структура блока унификации с последовательным сопоставлением термов. Приведены результаты численных экспериментов.

V.U. Meltsov, A.S. Kuvaev

DESIGN EXECUTIVE PROCESSOR WITH SUCCESSIVE BLOCKS UNIFICATION

Keywords: Inference engine, executive processor, unification unit, FPGA.

The paper describes the development process of the executive subsystem inference engine. We consider *the detailed structure of the executive processor and a structure of unification unit with consistent comparison of terms. We presents the results of numerical experiments.*

Е.В. Мехоношина, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров, А.И Плотников

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТКИ КОМПРЕССОРА В АЭРОУПРУГОЙ ПОСТАНОВКЕ

Ключевые слова: компрессор, газодинамический поток, напряженно-деформированное состояние, связанная задача аэроупругости.

Решается задача по оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) лопатки компрессора в потоке газа с

E.V. Mekhonoshina. V.Ya. Modorskii, V.Yu. Petrov, A.I. Plotnikov

NUMERICAL EVALUATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPRESSOR BLADE IN THE AEROELASTIC FORMULATION

Keywords: compressor, gas-dynamic flow, stress-strain state, fluid–structure interaction.

This paper presents the results of evaluation of the stress-strain state of the compressor blades in the flow of gas, taking into account the work of the guide apparatus. It realizes related

учетом работы направляющего аппарата. Реализуется связанная постановка задачи. Обнаружен эффект возрастания напряжений в лопатке, в аэроупругой постановке по сравнению с нестационарным расчетом напряженно-деформированного состояния.

formulation of the problem. The effect of increasing stress in the blade found in the formulation of the aeroelastic compared with the calculation of time-dependent stress-strain state.

И.Ш. Мустафин, А.В. Волков, А.А. Попов
АНАЛИЗ КОММУТАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ В СИЛОВЫХ КЛЮЧАХ ИНВЕРТОРА

Ключевые слова: регулируемый электропривод, энергетические показатели, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, алгоритм управления.

В работе рассматривается актуальные вопросы повышения энергоэффективности регулируемых электроприводов. Одним из вариантов подобных систем является электропривод на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Рассматривается влияние коммутационных на энергетические показатели машинно-вентильного каскада.

I.Sh. Mustafin, A.V. Volkov, A.A. Popov
ANALYSIS SWITCHING LOSSES IN THE POWER SWITCHES INVERTER

Key words: regulated electric, energy performance, asynchronous motor, frequency converter, control algorithm.

The paper deals with current issues of energy efficiency variable speed drives. One of the variants of such systems is based on electric induction motor with squirrel-cage rotor. The influence of switching on the energy performance of the machine and the valve complex.

Р.В. Муцаев
ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ИНУЛИНА В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИФРУКТАНОВ

Ключевые слова: ультразвуковое излучение, полифруктаны, процесс экстрагирования.

Проведен анализ патентной и технической литературы, изучены способы получения полифруктанов из растительного сырья. Выявлены основные недостатки существующих способов. Предложена возможность интенсификации процесса экстрагирования при помощи использования ультразвукового излучения; проведены первые эксперименты.

R.V. Mucaev
DEFINITION OF RATIONAL REGIME PARAMETERS IN THE MANUFACTURE OF INULIN IN POLYFRUCTANES TECHNOLOGY

Keywords: ultrasonic radiation, polyfructans, extraction process.

The patent and technical literature has been analyzed, studied ways of getting polyfruktans from plant material. The main shortcomings of the existing methods have been found. We offered the opportunity to intensify the process of extraction by the use of ultrasonic radiation; The first experiments were conducted

А.И. Новиков
О ДИЛЕММЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ключевые слова: дилемма, автомобильные энергетические установки, экологическая безопасность, автомобильные топлива, эффективность эксплуатационных материалов, ресурсосбережение.

Получение эффективных, экологически безопасных и экономически оправданных результатов эксплуатации автомобильных энергетических установок в современных условиях возможно лишь путем применения в системе энергообразования альтернативных источников энергии и (или) улучшения свойств традиционных. В работе на основании теоретических и эмпирических данных предпринята попытка рассмотрения дилеммы.

A.I. Novikov
DILEMMA OF EFFICIENCY AND ENVIRONMENTAL SAFETY AUTOMOTIVE ENGINE

Keywords: dilemma, automotive power systems, environmental safety, road fuel efficiency of operational materials, resource conservation.

Preparation of effective, environmentally sound and economically viable operating results of automobile power plants in modern conditions is possible only through the application of the system of energy production of alternative energy sources and (or) to improve the properties of traditional. In work because of theoretical and empirical data attempted to address the dilemma.

А.Ю. Панов, М.С. Трофимова
К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ МЕТОДИКИ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ ВНЕДРЕНИЯ ПРОЦЕДУРЫ «ПЕРСПЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПРОИЗВОДСТВА»

Ключевые слова: автомобилестроение, перспективное планирование качества продукции, оценка рисков, информационный поток, DFD-диаграмма.

В работе рассмотрена проблема отечественных автомобилестроительных предприятий, возникающая при совершенствовании своей системы менеджмента качества (СМК) в соответствии с международными стандартами; представлены этапы методики эффективного управления проектом внедрения процедуры APQP.

A.Y. Panov, M.S. Trofimova
TO THE QUESTION OF THE DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE OF EFFECTIVE MANAGEMENT OF THE PROJECT OF INTRODUCTION OF THE PROCEDURE "ADVANCED PRODUCT QUALITY PLANNING"

Keywords: automotive industry, advanced product quality planning, technique, assessment of risks, information stream, DFD - diagram.

In work the problem of the domestic automobile building enterprises arising at improvement of the quality management system (QMS) according to the international standards is considered; stages of a technique of effective management of the project of introduction of the APQP procedure.

С.А. Панфилов, О.В. Кабанов, М.А. Бобров, А.С. Хрёмкин
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТОВ

Ключевые слова: алгоритм, теплопроводность,

S.A. Panfilov, O.V. Kabanov, M.A. Bobrov, A.S. Hremkin
DEVELOPMENT OF A METHOD FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF OBJECTS

Keywords: algorithm, thermal conductivity, energy method.

энергоэффективность, метод.

В данной статье проводится обзор современных методов определения теплофизических свойств (ТФС) материалов, и строительных объектов. Приводится классификация существующих методов. Предложен алгоритм для исследования ТФС объектов.

This article provides review of current methods for determining thermophysical properties (TFS) materials, and construction sites. A classification of existing methods of determining the TFS. The algorithm for the study of the TFS object.

П.В. Писарев, В.Я. Модорский

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ПЕРЕПУСКНОГО КАНАЛА И ОТНОШЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ ВЫХОДНЫХ СЕЧЕНИЙ НА КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХСТУПЕНЧАТОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ НАСОСЕ

Ключевые слова: двухступенчатый центробежный насос, перепускной канал, колебательные процессы, угол сдвига фаз.

В рамках данной работы проводиться исследование влияния длины перепускного канала и отношения площадей выходных сечений на колебательные процессы в двухступенчатом центробежном насосе. Выявлено, что длина соединительного канала влияет на угол сдвига фаз φ, а изменение площади выходного сечения первой ступени влияет на амплитуду колебательных процессов.

P.V. Pisarev, V.Ya. Modorskiy

ANALYSIS OF INFLUENCE OF LENGTH OF THE BYPASS AND RELATIONS OF THE AREAS OF OUTPUT SECTIONS ON OSCILLATORY PROCESSES IN THE TWO-LEVEL CENTRIFUGAL PUMP

Keywords: anadvukhstupenchaty centrifugal pump, bypass, oscillatory processes, corner of shift of phases.

Within this work to be conducted research of influence of length of a bypass and relation of the squares of output sections at oscillatory processes in the two-level centrifugal pump. It is revealed that length of the connecting channel influences a corner of shift of phases φ, and change of the area of output section of the first step influences amplitude of oscillatory processes.

П.В. Писарев, А.А. Паньков, А.Н. Аношкин

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ПОТЕРИ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В МОДЕЛЬНОМ КАНАЛЕ С РЕЗОНАТОРОМ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, резонатор Гельмгольца, коэффициент потери акустического давления, метод конечных элементов, численный анализ.

В рамках данной работы проводиться исследование влияния объема цилиндрического резонатора Гельмгольца на величину собственной частоты резонатора и значения коэффициента потери акустического давления в модельном канале. Проводиться анализ распределения акустического давления по продольному сечению модельного канала.

P.V. Pisarev, A.A. Pankov, A.N. Anoshkin

NUMERICAL CALCULATION OF SOUND PRESSURE LOSS IN MODEL CHANNEL WITH CYLINDRICAL HELMHOLTZ RESONATOR

Keywords: sound-absorbing constructions Helmholtz resonator, acoustic pressure loss coefficient, finite element method,

In the present paper was carried out research influence the volume of the cylindrical Helmholtz resonator on his natural frequency and the values acoustic pressure lost coefficient in model channel. Presents analyzing the distribution of acoustic pressure on the median longitudinal plane in the model channel.

А.Г. Поздеев, Ю.А. Кузнецова

РАЗМЫВ НИЖНИХ БЬЕФОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНЫМ ПОТОКОМ

Ключевые слова: гидротехническое сооружение, турбулентный поток, размыв, сопряжение бьефов, донный грунт, воронка размыва, MathCad.

На основании обобщения теории ламинарной осесимметричной струи на случай турбулентного движения получены зависимости для продольной и радиальной скоростей потока. Приведена MathCAD-программа расчета параметров размыва в нижнем бьефе за водосливной плотиной при переходе турбулентного потока от защищенной части флютбета к незакрепленному размываемому руслу.

A.G. Pozdeev, Yu.A. Kuznetsova

TURBULENT FLOW EROSION OF HYDRAULIC FACILITY TAILRACES

Keywords: hydraulic facility, turbulent flow, erosion, conjugation of races, bottom soil, erosion pool, MathCad.

On the basis of generalization of the laminar axisymmetric jet theory for the turbulent motion, the calculated dependencies for longitudinal and radial flow velocities are obtained. The MathCAD listing of calculation of parameters of erosion in the tailrace behind the spillway when the turbulent flow moves from the protected part of the apron to the unfixed erodible river bed.

М.В. Пономарёв

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ ГРАНИЧНОЙ МОДЕЛИ ИЗ ОБМЕННОГО ФАЙЛА STEP. ПОИСК СМЕЖНЫХ ГРАНЕЙ

Ключевые слова: STEP файл, автоматизированный анализ геометрических данных, граничная модель, программный модуль «STEP Analyzer», поиск смежных граней.

В работе представлены результаты изучения возможности и разработанные механизмы автоматизированного анализа геометрических данных граничной модели из обменного файла STEP. Описан разработанный программный модуль «STEP Analyzer» и принцип действия реализованных в нём алгоритмов поиска смежных граней.

M.V. Ponomarev

AUTOMATED ANALYSIS OF B-REP MODEL GEOMETRIC DATA FROM STEP EXCHANGE FILE. SEARCH OF ADJACENT FACES

Keywords: STEP file, automated analysis of geometric data, b-rep model, software module "STEP Analyzer", search of adjacent faces

This paper present the study results of feasibility and developed mechanism of the automated analysis of b-rep model geometric data from STEP exchange file. It was described the developed software module "STEP Analyzer" and operating principle of algorithm of searching adjacent faces.

А.П. Приходько

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НОВЫХ ГРУНТОАРМИРОВАННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ФОТОМЕТРИИ

Ключевые слова: грунтоармированная конструкций; армоленты; армированный массив; программа на ЭВМ; интерфейс; экспериментальные исследования; аппроксимация; линии тренда; эмпирические зависимости, метод фотометрии.

В работе рассмотрены вопросы применения грунтоармированных конструкций для усиления оснований. Дано описание экспериментальных исследований разработанного автором нового конструктивного решения грунтоармированного сооружения с применением метода фотометрии.

A.P. Prikhodko

THE RESULTS OF STUDIES OF THE SOIL REINFORCED BASES USING THE METHOD OF PHOTOMETRY

Keywords: soil reinforced structures; reinforced array; program on the computer; interface; experimental studies; approximation; trend line; empirical relationships.; photometry method.

The article deals with the application of the soil reinforced designs to enhance the grounds. The paper describes the experimental studies developed by the author of a new constructive solutions of the soil reinforced structures using the method of photometry.

Н.С. Сахарова

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГРУППЫ ЗАПРОСОВ К МОДЕЛИ МЕТАДАННЫХ

Ключевые слова: метамодель информационной системы, бизнес-процесс, группы запросов.

Рассмотрена алгебраическая система для описания модели метаданных информационной системы. Выделены группы запросов к объектам метамодели, позволяющие анализировать функционал бизнес-процессов информационной системы. Предложена совокупность предикатных формул для описания запросов на выборку компонентов бизнес-процессов информационной системы.

N.S. Sakharova

ANALYSIS OF INFORMATION SUPPORT BUSINESS PROCESSES USING GROUPS REQUEST TO THE METADATA MODEL

Keywords: meta-information system, business process, group requests.

The algebraic system metadata model to describe the information system. Groups of Object Request metamodel, allowing to analyze the functional business process information system. A set of predicate formulas to describe the components of the sample requests for business process information system.

Т.А. Смирнова, Ю.С. Бутько, С.Ю. Киселев, Н.В. Княгичева

АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПАРАМЕТРОВ СРЕДНЕТИПИЧНОЙ СТОПЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ФОРМЫ ОБУВИ ДЛЯ КАТАНИЯ НА РОЛИКОВЫХ КОНЬКАХ

Ключевые слова: роликовые коньки, антропометрические исследования, среднетипичная стопа, колодка, повышение комфорта.

В работе представлены результаты антропометрических исследований, определены параметры среднетипичной стопы для обеспечения рационального, научно-обоснованного внутриобувного пространства обуви для катания на роликовых коньках для молодых женщин в возрасте от 16 до 24 лет.

T.A. Smirnova, Y.S. Butko, S.Y. Kiselev, N.V. Knyagicheva

ANTHROPOMETRIC RESEARCH TO DETERMINE THE PARAMETERS OF AVERAGE TYPICAL FOOT FOR DESIGN OF INNER FORM OF SHOES FOR ROLLER-SKATES

Keywords: roller skates, anthropometric research, average typical foot, shoe last, increase level of comfort.

The article is dedicated to the anthropometric research, the determination of the parameters of average typical foot and design of shoe to provide rational, science-based fit inside the footwear for roller-skating of young women aged from 16 to 24 year.

В.А. Соловьев, М.Н. Морозова

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА КОЛОРИМЕТРА, ПОСТРОЕННОГО НА ПРИНЦИПАХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Ключевые слова: колориметр, искусственная нейронная сеть, синаптические коэффициенты, обучение.

В статье рассматривается метод обучения измерительной системы интегрального колориметра, построенного на принципах искусственных нейронных сетей, используемый как на стадии проектирования, так и в процессе производства и эксплуатации прибора. Так же приведены структуры искусственной нейронной сети, используемые для определения конструктивных параметров измерительной системы прибора и для ее обучения на этапах производства и эксплуатации.

V.A. Soloviev, M.N. Morozova

THE MEASURING SYSTEM OF THE COLORIMETER, BASED ON THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS PRINCIPLES

Keywords: colorimeter, an artificial neural network, synaptic coefficients, training.

The authors suggest the method for learning integrated colorimeter measurement system by means of artificial neural networks principles. This method used on the design stage and the device production and operation process. The authors developed the artificial neural network structure that is used to determine the measuring system design parameters of the device and for artificial neural networks learning on the production and operation stages.

А.В. Степенькин, И.В. Шинаков, А.В. Жданов

КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛАСТИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА РВМ

Ключевые слова: роликовинтовой механизм (РВМ), эластичный элемент, конечно-элементный анализ.

В статье приводятся результаты конечно-элементный анализа эластичного элемента роликовинтового механизма.

A.V. Stepenkin, I.V. Shinakov, A.V. Zhdanov

FINITE ELEMENT ANALYSIS ELASTIC MEMBER OF ROLLER SCREW MECHANISM

Keywords: roller screw mechanism, elastic element, finite element analysis

The article presents the results of finite element analysis of the elastic element Roller. Resilient elements that are intended for

Эластичные элементы, которые предназначены для выборки зазоров, перераспределения нагрузки по виткам резьбы, уменьшения проскальзывания между резьбовыми элементами, повышения жесткости и кинематической точности.

sampling gaps load redistribution of the threads decrease slippage between the thread elements stiffening and kinematic precision.

Д.А. Страбыкин, Д.В. Вожегов, А.И. Симонов
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЛОГИЧЕСКОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ АБДУКТИВНОГО ВЫВОДА

Ключевые слова: интеллектуальная система, логическое прогнозирование, абдуктивный вывод.

В работе даётся содержательная постановка задачи прогнозирования развития ситуаций. Приводится описание задачи прогнозирования развития ситуаций как задачи логического вывода. Предлагается система прогнозирования на основе абдуктивного вывода.

D.A. Strabykin, D.V. Vozhegov, A.I. Simonov
INTELLIGENT SYSTEM OF LOGIC FORECASTING OF SITUATIONS DEVELOPMENT BASED ON THE ABDUCTIVE LOGICAL INFERENCE

Keywords: intelligent system, logic forecasting, abductive logical inference.

This work gives a substantial statement of a problem of logic forecasting of situations development. The article gives a description of the problem of logic forecasting as a problem of logical inference. The forecasting system based on the abductive logical inference is offered.

Н.А. Труфанов, Л.Р.Шаяхметова
ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СЛИТКА

Ключевые слова: численное моделирование, стальной слиток, сифонная заливка, кристаллизация, конвекция расплава.

В работе представлены результаты компьютерного анализа нестационарных трехмерных сопряженных гидродинамических и тепловых процессов при заливке и кристаллизации слитка с учетом естественной конвекции в процессе охлаждения. На основе численного моделирования изучена эволюция температурных полей в процессе кристаллизации слитка, представлено удовлетворительное подтверждение их значений путем сравнения экспериментально измеренных температур на наружной поверхности формы с расчетными значениями.

N.A. Trufanov, L.R. Shayahmetova
NUMERICALLY-EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE INGOT CRYSTALLIZATION PROCESS

Keywords: *numerical modeling, steel casting, bottom casting, crystallization, melt convection.*

The results of computer-aided analysis of 3D transient coupled hydrodynamic-heat processes arising during filling and crystallization of casting with considering free convection in cooling are presented. On basis of numerical modeling the temperature fields evolution in the process of casting solidification is investigated and it's sufficient evidence gained by comparing the experimental temperature data measured on the mold outer surface with computed values is shown.

О.П. Уварова
ДЕЯТЕЛЬНОЕ СОУЧАСТИЕ В АРХИТЕКТУРНО-ЛАНДШАФТНОМ ФОРМИРОВАНИИ ОТКРЫТЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В СТРУКТУРЕ ЖИЛОЙ ЗАСТРОЙКИ

Ключевые слова: соучастие, партиципация, архитектура соучастия, демократическая архитектура, открытые городские пространства.

В ситуации преобладания в жилой застройке современного российского города массовой архитектуры середины прошлого века с присущими ей негативными характеристиками открытые пространства несут в себе наибольший потенциал для улучшения качеств среды. В статье рассматривается специфика соучастного формирования открытых городских пространств в структуре сложившейся жилой застройки, вводится понятие деятельного соучастия, очерчиваются его особенности и положение в теории архитектуры, предлагаются рекомендации по совершенствованию этого явления, дающие возможность в дальнейшем разработать оптимальные программы развития городской среды с участием обитателей в диалоге с профессионалами и властями.

O.P. Uvarova
MAKING PARTICIPATION IN ARCHITECTURE AND LANDSCAPE FORMATION OF URBAN OPEN SPACES IN RESIDENTIAL STRUCTURE

Keywords: participation, participatory design, democratic architecture, urban open space.

In a situation of predominance of last century mass housing estate with its negative features in a modern Russian city, open spaces present the greatest potential for improving the quality of the environment. In the article the specifics of the participatory forming of the open urban spaces in the existing housing estate is considered. Also the concept of the productive participation is introduced, its characteristics and position in the theory of architecture are outlined, recommendations for optimizing of this phenomenon are offered, on the basis of which it is possible to further work out the optimal programs of the urban environment development with the participation of the inhabitants in a dialogue with the professionals and the authorities.

Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

Ключевые слова: численное моделирование, газодинамический расчет, термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье.

В рамках исследований был предложен альтернативный вариант генератора электрической энергии для элетрохимзащиты трубопроводов с минимальной

D.I. Fedorovtsev, P.V. Pisarev
THE NUMERICAL MODELING OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE COMBUSTION CHAMBER OF THE THERMOELECTRIC GENERATOR

Keywords: numerical simulation, gas-dynamic calculation, thermoelectric converter, Peltier element.

As part of the research an alternative version of a thermoelectric generator for electrochemical protection of oil and gas pipelines with a minimum maintenance cost at constant output characteristics is proposed. The proposed solution is based on the Peltier thermoelectric generator

стоимостью обслуживания при неизменных выходных характеристиках. В работе представлены физическая и математическая модели, разработана методика численного расчета, проведено численное моделирование отвода тепла в термоэлектрическом преобразователе энергии в связанной постановке. Численный эксперимент проводился с использованием многопроцессорного программного комплекса ANSYS CFX.

modules. Peltier element is a thermoelectric converter, the operating principle of which is the appearance of an electromotive force in a closed circuit of the semiconductor junction provided that the temperature difference in the field of contacts. The paper presents the physical and mathematical models, a method of numerical calculation module termotransferring solid model, the numerical simulation of heat dissipation in the thermoelectric energy converter in a related statement is developed. We obtained and analyzed the results of numerical calculation. The numerical calculation was performed using multiprocessor software package ANSYS CFX.

Д.И. Федоровцев, П.В. Писарев
РАЗРАБОТКА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТА ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМЗАЩИТЫ ГАЗОПРОВОДОВ

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, элемент Пельтье, электрохимзащита газотрубопровода.

В рамках исследований был предложен альтернативный вариант генератора электрической энергии для элетрохимзащиты трубопроводов с минимальной стоимостью обслуживания при неизменных выходных характеристиках. В работе описан принцип работы термопреобразователя энергии на основе элемента Пельтье, предложена общая конструкция корпуса камеры термопреобразования и генераторной установки.

D.I. Fedorovtsev, P.V. Pisarev
THE DEVELOPMENT OF THE THERMOELECTRIC ENERGY CONVERTER BASED ON THE PELTIER ELEMENT FOR ELECTROCHEMICAL PROTECTION OF GAS PIPELINE

Keywords: thermoelectric energy generator, Peltier element, electrochemical protection of gas pipline.

As part of the research an alternative version of a thermoelectric generator for electrochemical protection of oil and gas pipelines with a minimum maintenance cost at constant output characteristics is proposed. The principle of the thermoelectric energy generator based on the Peltier element is described and the general construction of the termotransfer camera housing and generator erection are proposed.

Р.М. Хусаинов, И.И. Мубаракшин, А.Р. Сабиров
ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НА ВЕРТИКАЛЬНО-ФРЕЗЕРНЫХ СТАНКАХ

Ключевые слова: металлорежущие станки, конечно-элементный анализ, жесткость, UNIGRAPHICS NX.

В статье рассматриваются особенности расчетно-экспериментального исследования статических упругих деформаций при обработке на вертикально-фрезерных станках. Обращается внимание на особенности построения расчетных моделей металлорежущих станков, методы экспериментальной проверки. Анализируется влияние упругих деформаций на погрешности обработки.

R.M. Khusainov, I.I. Mubarakshin, A.R. Sabirov
RESEARCHING THE ELASTIC DEFORMATIONS DURING THE PROCESSING ON VERTICAL MILLING MACHINE

Keywords: machine tools, finite element analysis, rigidity, UNIGRAPHICS NX.

This article deals with the features of the computational and experimental researching of the elastic deformations during the processing on vertical milling machines. It draws attention to the characteristics of building computational models of machine tools and methods of experimental verification. It analyzes the influence of elastic deformation on the errors during the processing.

М.А. Черноскутов, М.Л. Гольдштейн
АНАЛИЗ ОБЪЕМА ПЕРЕДАВАЕМЫХ СООБЩЕНИЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОМ АЛГОРИТМЕ ПОИСКА В ШИРИНУ НА ГРАФЕ

Ключевые слова: поиск в ширину, параллельные вычисления, передача сообщений, битовая маска.

Представлен анализ объема передаваемых сообщений в двух различных реализациях параллельного алгоритма поиска в ширину на графе. Первая из реализаций представляет собой поиск в ширину с точечными обменами данных. Вторая реализация – поиск в ширину с "обратным" направлением обхода и синхронизацией данных посредством битовой маски. Показано, что использование первой реализации обладает большими накладными расходами на промежуточных итерациях, в то время как вторая реализация демонстрирует умеренный объем накладных расходов на протяжении всего времени исполнения алгоритма.

M.A. Chernoskutov, M.L. Goldshtein
ANALYSIS OF AMOUNT OF DATA TRANSFER IN PARALLEL BREADTH-FIRST SEARCH ALGORITHM

Keywords: breadth-first search, parallel computing, data transfer, bitmap.

Paper describes analysis of data transfer in two different implementations of breadth-first search. First is top-down and second is bottom-up implementation. It is shown that first implementation reveals rather big data transfer overheads in its intermediate iterations while second implementation reveals more balanced and acceptable amount of data transfer.

А.В. Широков, С.М. Козырева, Л.О. Широкова
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ ПРОДУКТОВ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Ключевые слова: обогатительные добавки, комбинированный порошок столовой свеклы (КПС), качество хлебобулочных изделий.

A.V. Shirokov, C.M. Kozyreva, L.O. Shirokova
STUDY OF COMBINED POWDER PRODUCTS BASED ON RECYCLED RAW MATERIALS ON THE QUALITY OF BAKERY PRODUCTS

Keywords: enrichment supplements, combined beet powder (CBP), the quality of bakery products.

The paper presents the results of a study physiological enrichment of bakery products and food ingredients (additives

В работе представлены результаты исследования обогащения хлебобулочных изделий физиологическими пищевыми ингредиентами (добавками из растительного сырья) на основе – комбинированного порошка столовой свеклы (КПС), содержащего функциональные пищевые вещества растительного и животного происхождения.

from vegetable raw materials) based on a combined beet powder (CBP) containing functional food substances of plant and animal origin.

С.А. Шишлов, С.В. Щитов
ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛОСЫ ПРИ ПУНКТИРНО-ПОЛОСНОМ СПОСОБЕ ПОСЕВА СОИ

Ключевые слова: соя, ячейка, высевающий диск, пунктирно-полосный способ посева.

В статье рассматривается распределение семян сои высевающим аппаратом, содержащим вертикальный диск с ячейками, расположенными под углом к плоскости его вращения. Приводятся результаты теоретических исследований движения единичного зерна сои при высеве его из ячейки, расположенной под углом к плоскости вращения высевающего диска. Представлены некоторые результаты лабораторных исследований.

S.A. Shishlov, S.V. Schitov
THE FORMATION OF BANDS WHEN USED DOTTED-BAND METHOD OF SOWING SOYA

Keywords: soya, cell, sowing disc, dotted-band method of sowing.

The article discusses the distribution to the seeds of soybean seed metering apparatus, comprising a vertical disc with cells arranged at an angle to the plane of its rotation. Shows the results of theoretical studies of motion single grain soybean when sowing from the cell positioned at an angle to the plane of rotation of the seed disc. Presents some results of laboratory research.

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский, В.Ю. Петров
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В КОМПРЕССОРЕ МОДЕЛЬНОГО СТЕНДА ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩЕГО АГРЕГАТА

Ключевые слова: газоперекачивающие агрегат, ANSYS CFX, ANSYS Workbench, тепловой анализ, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование.

В данной работе представлены результаты численного моделирования газодинамических процессов и процессов деформирования, протекающих в компрессоре модельного стенда газоперекачивающего агрегата. Получены поля давлений и температур, а также компонент напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом импортированных газодинамических и тепловых нагрузок. Проанализированы перемещения в зоне лабиринтных уплотнений у рабочего колеса компрессора.

A.F. Shmakov, V.Ya. Modorskiy, V.Yu. Petrov
NUMERICAL MODELING OF GASDYNAMIC PROCESSES AND PROCESSES OF DEFORMATION IN COMPRESSOR OF MODEL TEST BENCH OF THE GAS-DISTRIBUTING UNIT

Keywords: gas *compressor units, ANSYS CFX, ANSYS Workbench, thermal analysis, stress-strain state, numerical simulation*

In this work results of numerical modeling of the gasdynamic processes and processes of deformation proceeding in the compressor of the model test bench of the gas-distributing unit are provided. Fields of pressure and temperatures, and also component of the stress-strain state structure taking into account the imported gasdynamic and heat loads are received. Analyzed displacement zone labyrinth seals in the compressor impeller.

Б.В. Шогенов, А.М. Казиев, А.И. Сижажев, А.С. Ципинов
ОПТИМИЗАЦИЯ ШУМООБРАЗОВАНИЯ В ПЕРЕДАЧАХ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ МЕТОДОМ МНОГОФАКТОРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Ключевые слова: шум, вибрация, зубчато-ременная передача, оптимизация.

В работе проведены исследования по снижению уровня шума в передаче с гибким звеном. Выбраны оптимальные режимы работы зубчато-ременной передачи (ЗРП) методом активного многофакторного планирования. Получено уравнение регрессии для ремня с круговой формой зубьев.

B.V. Shogenov, A.M. Kaziev, A.B. Sizhazhev, A.S. Tsipinov
OPTIMIZATION OF NOISE GENERATION IN THE PROGRAMS WITH A FLEXIBLE CONNECTION METHOD OF MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANNING

Keywords: noise, vibration, toothed belt drive optimization.

The paper studied to reduce the noise level in the transmission of the flexible link. Optimal modes toothed belt drive (ZRP) by multivariate active planning. Regression equations for a belt with a circular shape of the teeth.

А.В. Шорохова
АЛГОРИТМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ С ПОСЛЕДУЮЩЕЙ РЕКУЛЬТИВАЦИЕЙ НАРУШЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНОВ

Ключевые слова: алгоритм, моделирование, отходы, угольные предприятия, рекреационные зоны.

В работе представлен алгоритм моделирования процессов переработки отходов с последующей рекультивацией нарушенных территорий, позволяющий выбрать наиболее приемлемый вариант из ряда альтернативных, опирающийся на экономические показатели оценки инвестиционной привлекательности проектов. Предложенный алгоритм позволяет учитывать экологические интересы общества за счет приведения экологических параметров рассматриваемых проектов в соответствие с нормативами.

A.V. Shorokhova
ALGORITHM MODELLING OF PROCESSES OF PROCESSING OF WASTE WITH THE SUBSEQUENT RECULTIVATION OF THE BROKEN TERRITORIES OF COAL-MINING REGIONS

Keywords: algorithm, modeling, waste, coal enterprises, recreational zones.

In work the algorithm of modeling of processes of processing of waste with the subsequent recultivation of the broken territories allowing to choose the most acceptable option from a row alternative, leaning on economic indicators of an assessment of investment appeal of projects is presented. The offered algorithm allows to consider ecological interests of society due to reduction of ecological parameters of the considered projects in compliance with standards.

Д.В. Штых, И.В. Шинаков, В.В. Морозов

АНАЛИЗ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РОЛИКОВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Ключевые слова: роликовинтовой механизм (РВМ), математическая модель, теоретические исследования, критерии сравнения моделей.

В статье рассматриваются математические модели роликовинтовых механизмов (РВМ). Определены упрощения и допущения, систематизированы характерные особенности моделей, выделены общие проблемы. Сформулированы требования к математической модели РВМ.

D.V. Shtih, I.V. Shinakov, V.V. Morozov

ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF ROLLER SCREW MECHANISMS

Keywords: roller screw mechanism (RSM), a mathematical model, theoretical studies, the criteria for comparison of models.

The article deals with mathematical models of roller screw mechanisms (RSM). Identified simplification and assumptions systematized characteristics of the models highlighted common problems. The requirements to the mathematical model of RSM

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья" ООО "Научно-технический вестник Поволжья" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Н А У Ч Н О - Т Е Х Н И Ч Е С К И Й В Е С Т Н И К П О В О Л Ж Ь Я

№5 2015

Направления:

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ
ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

www.ntvp.ru

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 10.10.2015 Формат 60 х 84 1/8. Печать цифровая.

20,6 усл.печ.л. 23,7 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1865.

Учредитель: ООО "Научно-технический вестник Поволжья"
420111, Республика Татарстан, Казань,
ул. Университетская, д.22, оф. 310
Адрес редакции, издателя и типографии совпадают с адресом учредителя
Цена свободная.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

факс:(843) 238-32-08

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»