

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№5 2016

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

Казань

2016

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №5 2016г. – Казань:
Научно-технический вестник Поволжья, 2016. – 242 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.; 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, 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

<i>Е.А. Вячкина, Е.В. Решетникова, Е.С. Вячкин</i> РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫПЛАТ ЗА ВЫБРОСЫ ПРИ ПОЖАРЕ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ	11
<i>Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, В.А. Шакура, Е.В. Ильченко</i> КОЛЕБАНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В АНИЗОТРОПНОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ	15
<i>В.В. Дружинин</i> ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ СУММ ОБОБЩЕННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ПРОГРЕССИЙ	18
<i>М.В. Крючков</i> АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ФИНАНСОВЫХ СТРАТЕГИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО	21
<i>А.В. Михайлов, В.Л. Шаблов</i> НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ КУЛОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В СИСТЕМАХ НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТИЦ	25
<i>В.Ш. Ройтенберг</i> О БИФУРКАЦИЯХ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ СТЫКА ЛИНИЙ РАЗРЫВА ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ	30

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Г.Н. Демиденко, Д.В. Евдокимова, А.В. Забруская, А.В. Быков</i> ПЛАТИНА, СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ, В ЖИДКОФАЗНОМ ГИДРИРОВАНИИ АРЕНОВ	34
<i>Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева</i> ИЗУЧЕНИЕ БИОКАТАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА ГИДРОЛИЗА ТОРФА ВЕРХОВОГО ТИПА	37
<i>Ю.В. Луговой, К.В. Чалов, Э.М. Сульман</i> ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ НА ПРОЦЕСС ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА	40
<i>Н.Н. Маркузина</i> ЭЛЕКТРОДНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОНОПРОВОДЯЩИЙ ПОЛИМЕР ПОЛИ(3-ОКТИЛТИОФЕН)	43
<i>Г.В. Самойлова, Г.Н. Демиденко, Л.Ж. Никошвили, А.В. Быков</i> ПРИРОДА АКТИВНОЙ ФАЗЫ ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЖИДКОФАЗНОГО СИНТЕЗА N-МЕТИЛАНИЛИНА	46
<i>К.В. Чалов, Ю.В. Луговой, Ю.Ю. Косивцов, Э.М. Сульман</i> ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПРИСУТСТВИИ ХЛОРИДА КОБАЛЬТА	49
<i>Е.И. Шиманская, А.А. Степачёва, А.М. Сульман, Э.М. Сульман, М.Г. Сульман</i> КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ГИДРОПЕРЕРАБОТКА АНИЗОЛА И ОПИЛОК ХВОЙНЫХ ПОРОД	53

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>В.И. Амтилов</i> ДИДАКТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	56
<i>А.П. Буйносов</i> ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛОКОМОТИВА В СЕРВИСНОМ ДЕПО	59
<i>А.П. Буйносов, Н.Г. Фетисова</i> ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПРУЖИН В РЕССОРНОМ ПОДВЕШИВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ ЛОКОМОТИВОВ	62

А.П. Буйносов, И.С. Цихалевский	ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ РАЗВЕСКИ ТЕЛЕЖКИ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА	65
А.В. Варенцов, С.М. Дмитриев, Д.Н. Солнцев, А.Е. Хробостов	ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАССЕТНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ ПЛАВУЧЕЙ АЭС	69
С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА RWR	72
С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, Д.В. Максянин, В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов	ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР	75
С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, И.А. Малышева, А.Н. Пронин, О.Б. Солдаткин, А.Е. Хробостов	РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГБЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «КАНАЛ»	78
С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов	ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА-12 PLUS	82
С.М. Дмитриев, И.В. Каратушина, И.Ю. Ляхов, А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ В ТВС-КВАДРАТ	85
С.М. Дмитриев, А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, М.А. Легчанов, А. В. Котин	ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ANSYS CFX И ЛОГОС ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ВНУТРЕННЕЙ СПИРАЛЬНОНАВИТОЙ ТРУБОЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ	88
А.А. Добров, К.А. Мартынова, А.Е. Хробостов	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРА RWR С ПРИМЕНЕНИЕМ КОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ	92
А.А. Добров, Ю.А. Фадеева, А.Е. Хробостов	МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА RWR С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD-КОДОВ	95
Г.В. Ильиных, О.Ю. Сметанников	МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАЛОЖЕНИЯ СЕТКИ	98
А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.А. Федулов, А.Е. Чигринский	АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДА РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ РКМ-45	102
А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов, А.В. Котин, Е.В. Пликин, Е.С. Кречетов, Л.Н. Храпунова	ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	106
И.М. Пышный	ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПУТЕМ ЛУБРИКАЦИИ	109
И.М. Пышный	ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ	113
В.В. Семашко, Л.В. Судник, Д.Ю. Мазалов, В.С. Ивашко	ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН МЕТОДАМИ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ	117

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных, Т.А. Смертина	МНОГОУРОВНЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АРМИРУЮЩЕГО КАРКАСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ	120
А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев, А.В. Котин, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев	ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ	124
А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев, А.В. Котин, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, М.А. Легчанов	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ	128
А.Е. Хробостов, А.В. Варенцов, Н.С. Волков, Н.П. Курбатова, А.Н. Терехин	ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ	132

05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов	АДАПТАЦИЯ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕШЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНЫМ УСТАНОВКАМ	136
А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФфуЗИИ СОЛЕВОЙ ПРИМЕСИ В ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	139
Д.С. Мукатин, И.В. Нелин, Д.А. Смирнов	СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЧЕРЕДОВАНИЕ СВЁРТОЧНЫХ КОДОВ	143
А.Е. Терлыч, И.И. Аликина	РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ	147
В.Н. Хмельёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, В.А. Шакура, Е.В. Ильченко	ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ КАВИТАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ АБСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	151
В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, В.А. Нестеров, Р.Н. Голых	СПОСОБ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ	154
В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова, А.А. Нестеров	ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ	157

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

И.З. Ахметзянов, В.С. Каримов	АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КВАЗИАДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВХОДУ ПРИ НЕДОСТУПНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ	160
-------------------------------	---	-----

<i>А.В. Бабушкина, В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков</i> НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МОДЕЛЬНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОМПРЕССОРЕ	163
<i>Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, Д.В. Тундыков</i> ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ПЛИС	166
<i>Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин</i> МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕДУКТИВНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ЗАКЛЮЧЕНИЙ В ИСЧИСЛЕНИИ ПРЕДИКАТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ	170
<i>Л.В. Галина, Д. А. Проскурин, А.С. Русяев</i> ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ	178
<i>В.Г. Дегтярь, В.И. Пегов, А.Д. Чешко</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ВОДЕ	181
<i>А.А. Денисевич, Е.В. Ефремов, М.И. Грачев</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ТАБЛЕТОК ПРИ ФАБРИКАЦИИ СНУП-ТОПЛИВА	189
<i>С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, Р.В. Бульбович</i> ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА В ЗАМКНУТОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ	192
<i>В.С. Каримов, В.Б. Рождественская</i> ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА И АНАЛИЗА ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ	196
<i>В.В. Киселев, Л.Г. Бабушкина, В.Д. Володин, А.А. Шаронов</i> ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННОГО БЛОКА КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ	199
<i>Э.Ю. Курчатov, Д.Е. Чикрин, П.А. Кокунин, Д.В. Бережной, И.Г. Галиуллин, А.Н. Степанов, Н.В. Харченко</i> РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В СУПЕРМАХОВИКАХ	202
<i>Э.Ю. Курчатov, Д.Е. Чикрин, П.А. Кокунин, Д.В. Бережной, И.Г. Галиуллин, А.Н. Степанов, Н.В. Харченко</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМ С ВЫСОКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К КАЧЕСТВУ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ	206
<i>Т.И. Синельникова, Н.А. Швецова</i> РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СИСТЕМОЛОГИИ ЭПИСТЕМОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПОРОЖДАЮЩИХ СИСТЕМ	209
<i>Е.В. Спиридонова</i> КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ ПОСТАНОВКЕ	212
<i>А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЗОРОВ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В FSI ПОСТАНОВКЕ	216
<i>В.А. Щапов</i> SCIMQ: ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСА ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ	219
<i>О.В. Щекочихин, В.В. Шведенко, П.В. Шведенко</i> ОНТОЛОГИЯ ПОНЯТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОВЕДЕНИЕМ	223
АННОТАЦИИ	226

THE RELEASE MAINTENANCE

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

<i>E.A. Vyachkina, E.V. Reshetnikova, E.S. Vyachkin</i> IMPLEMENTATION OF PAYMENT METHODS OF CALCULATION FOR EMISSIONS FROM FIRE IN BUILDING OBJECTS	11
<i>R.N. Golykh, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, V.A. Shakura, E.V. Ilchenko</i> OSCILLATIONS OF GASEOUS BUBBLE IN NON-ISOTROPIC HIGH VISCOUS LIQUID UNDER HIGH-FREQUENCY ACOUSTIC FIELDS INFLUENCE	15
<i>V.V. Druzhinin</i> THE INTEGRAL FORMULA FOR SUMS OF GENERALIZED ARITHMETIC PROGRESSIONS	18
<i>M.V. Kryuchkov</i> CHECKING OF CALCULATION OF EFFICIENCY INDICATOR FOR SOME FINANCIAL STRATEGIES BY MONTE CARLO METHOD	21
<i>A.V. Mikhailov, V.L. Shablov</i> TIME-DEPENDENT PERTURBATION THEORY FOR COULOMB SCATTERING IN FEW PARTICLE SYSTEMS	25
<i>V.Sh. Roitenberg</i> ON BIFURCATIONS IN A NEIGHBORHOOD OF JOINING POINT OF LINES OF DISCONTINUITY OF A VECTOR FIELD	30

02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES

<i>G.N. Demidenko, D.V. Evdokimova, A.V. Zabrusskaya, A.V. Bykov</i> PLATINUM STABILIZED IN POLYMERIC MATRIX IN LIQUID-PHASE ARENE HYDROGENATION	34
<i>N.V. Lakina, V.Ju. Doluda, V.G. Matveeva</i> THE STUDY OF THE BIOCATALYTIC METHOD OF HYDROLYSIS OF THE PEAT TYPE	37
<i>Yu.V. Lugovoy, K.V. Chalov, E.M. Sulman</i> INFLUENCE OF METAL COMPOUNDS ON PROCESS OF PEAT THERMOCHEMICAL PROCESSING	40
<i>N.N. Markuzina</i> ELECTRODE PROPERTIES OF SOLID-CONTACT ELECTROCHEMICAL SENSORS CONTAINING ELECTROCONDUCTIVE POLYMER POLY (3-OKTYLTHIOPHENE)	43
<i>G.V. Samoilova, G.N. Demidenko, L.Zh. Nikoshvili, A.V. Bykov</i> NATURE OF CATALYTIC PHASE OF POLYMER-STABILIZED RUTHENIUM-CONTAINING CATALYTIC SYSTEM OF LIQUID-PHASE N-METHYLANILINE SYNTHESIS	46
<i>K.V. Chalov, Yu.V. Lugovoy, Yu.Yu. Kosivtsov, E.M. Sulman</i> THERMOCATALYTIC DESTRUCTION OF OIL-CONTAINING WASTES IN THE PRESENCE OF COBALT CHLORIDE	49
<i>E.I. Shimanskaya, A.A. Stepacheva, A.M. Sulman, E.M. Sulman, M.G. Sulman</i> CATALYTIC HYDROPROCESSING OF ANISOLE AND SOFTWOOD SAWDUST	53

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

<i>V.I. Ampilov</i> DIDACTIC MODEL FOR TRAINING ON AIRCRAFT AGGREGATES MAINTENANCE PROCEDURE	56
<i>A.P. Buinosov</i> EXPRESS PRELIMINARY TREATMENT OF THE ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE LOCOMOTIVE IN SERVICE DEPOT	59
<i>A.P. Buinosov, N.G. Fetisova</i> OPTIONS OF USE AND CALCULATION OF COIL SCREW SPRINGS IN SPRING SUSPENSION OF MODERN LOCOMOTIVES	62

A.P. Buinosov, I.S. Tsikhalevsky BASIC PRINCIPLES OF CALCULATION OF THE LONGITUDINAL WEIGHING OF THE CART OF THE MODERN ELECTROROLLING STOCK	65
A.V. Varentsov, S.M. Dmitriev, D.N. Solntsev, A.E. Khrobostov EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HYDRODYNAMICS OF COOLANT FLOW IN EXPERIMENTAL MODEL OF FUEL ASSEMBLY FOR REACTOR OF FLOATING NUCLEAR POWER PLANT	69
S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov, V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov THE EXPERIMENTAL RESEARCH COOLANT MIXING IN TVS-KVADRAT FOR PWR	72
S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, D.V. Maksyanin V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov INVESTIGATION OF FLUID FLOW TO THE COOLANT FLOW IN THE CORE OF WWER	75
S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, I.A. Malysheva, A.N. Pronin, O.B. Soldatkin, A.E. Khrobostov DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DISTRIBUTION OF AXIAL VELOCITY COOLANT FLOW IN THE FUEL ASSEMBLIES OF FLOATING POWER USING THE PROGRAM "KANAL"	78
S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, A.N. Pronin, A.E. Khrobostov RESEARCH MIXING A COOLANT IN THE REACTOR CORE WWER WITH TVSA-12 PLUS	82
S.M. Dmitriev, I.V. Karatushina, I.Yu. Lyahov, A.N. Pronin, A.E. Khrobostov EXPERIMENTAL RESEARCHES OF LOCAL MASS TRANSFER OF THE COOLANT FLOW BEHIND THE MIXING GRID IN TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLIES OF PWR REACTORS	85
S.M. Dmitriev, A.V. Mamayev, R.R. Ryazapov, A.E. Sobornov, M.A. Legchanov, A.V. Kotin APPLICATION OF SOFTWARE PACKAGES ANSYS CFX AND LOGOS FOR SWIRLING FLOW ANALYSIS IN AN ANNULUS WITH THE INNER SPIRAL WOUND TUBE OF HEAT EXCHANGERS LOW POWER NUCLEAR PLANT	88
A.A. Dobrov, K.A. Martynova, A.E. Khrobostov MODELING OF THERMAL PROCESSES IN THE PWR REACTOR FUEL ASSEMBLIES USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS CODES	92
A.A. Dobrov, Y.A. Fadeeva, A.E. Khrobostov MODELING OF HYDRAULIC PROCESSES IN THE PWR REACTOR FUEL ASSEMBLIES USING CFD CODES	95
G.V. Ilinykh, O.Yu. Smetannikov MODELING OF GEAR PUMP WORK USING IMMERSED SOLID METHOD	98
A.I. Karamyshev, I.I. Nekrasov, V.S. Parshin, A.A. Fedulov, A.E. Chigrinskiy THE ANALYSIS OF MOVEMENT IRREGULARITY AND THE DEFINITION OF DYNAMIC LOADS IN ELEMENTS OF THE RADIAL-FORGING MACHINE DRIVE	102
A.V. Mamayev, R.R. Ryazapov, A.E. Sobornov, A.V. Kotin, E.V. Pliikin, E.S. Krechetov, L.N. Khrapunova DAMAGE LEVEL CONTROL OF ENGINEERING MATERIALS OF UNITS OF NUCLEAR PROPULSION AT TEMPERATURE PULSATIONS BY ACOUSTIC METHOD	106
I.M. Pishniy LIFE EXTENSION OF RUNNING PARTS OF LOCOMOTIVES BY MEANS LUBRICATION	109
I.M. Pishniy LIFE EXTENSION OF RUNNING PARTS OF LOCOMOTIVE BY THE SOLID STICKS	113
V.V. Semashko, L.V. Sudnik, D.IU. Mazalov, V.S. Ivashko INCREASE OF OPERATING PARAMETERS OF WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MASHINES BY PULSE HARDENING METHODS	117
O.Yu. Smetannikov, G.V. Ilinykh, T.A. Smertina MULTILEVEL RESEARCH OF FILTRATION PROPERTIES OF FIBER REINFORCED POLYMERS	120
A.E. Sobornov, S.M. Dmitriev, A.V. Kotin, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev NUMERICAL EVALUATION OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION EFFICIENCY IN NPP CHANNELS WITH TWISTED METALLIC BANDS	124

<i>A.E. Sobornov, S.M. Dmitriev, A.V. Kotin, R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, M.A. Legchanov</i> EXPERIMENTAL EVALUATION OF HEAT TRANSFER INTENSIFICATION EFFICIENCY IN NPP CHANNELS WITH DIFFERENT TWISTED METALLIC BANDS	128
<i>A.E. Khrobostov, A.V. Varentsov, N.S. Volkov, N.P. Kurbatova, A.N. Terechin</i> EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL HYDRODYNAMICS OF THE COOLANT IN THE FUEL ASSEMBLY OF SQUARE PWR WHEN SETTING MIXING DISTANTSIONNAYA LATTICES WITH VARIOUS TYPES OF DEFLECTORS	132

05.11.00 — TECHNICAL SCIENCES — INSTRUMENTATION, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING DEVICES

<i>A.A. Barinov, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov</i> MATRIX CONDUCTOMETRY METHOD ADAPTION TO INVESTIGATION OF TURBULENT COOLANT FLOW MIXING AS APPLIED TO NUCLEAR POWER UNITS	136
<i>A.A. Barinov, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION RESULTS OF SALT ADDITIVE TURBULENT DIFFUSION IN COOLANT FLOW USING SPATIAL CONDUCTOMETRY SENSORS	139
<i>D.A. Mukatin, I.V. Nelin, D.A. Smirnov</i> COMMUNICATION SYSTEM USING THE ALTERNATION OF CONVOLUTIONAL CODES	143
<i>A.E. Terlich, I.I. Alikina</i> CALCULATION OF THE ELECTRIC CAPACITY OF THE POWER CABLE WITH SECTOR CORES	147
<i>V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, V.A. Shakura, E.V. Ilchenko</i> EVALUATION OF OPTIMUM CONSTRUCTION OF ULTRASONIC RADIATOR FOR CAVITATION AND ACOUSTIC INTENSIFICATION OF ABSORPTION PROCESSES BY METHODS OF COMPUTER MODELING	151
<i>V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov, R.N. Golykh</i> THE PROCESS OF CAVITATION SPRAYING VISCOUS LIQUIDS	154
<i>V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh, K.V. Shalunova, A.A. Nesterov</i> STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ANISOTROPY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL ON THE DISTRIBUTION OF ULTRASONIC VIBRATIONS DISK RADIATORS	157

05.13.00 — TECHNICAL SCIENCES — COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>I.Z. Ahmetzyanov, V.S. Karimov</i> ANALYTICAL SYNTHESIS OF THE QUASIADAPTIVE CONTROL SYSTEM OF THE MULTIVARIABLE PLANT WITH DELAYS IN THE INPUT AT INACCESSIBILITY TO MEASUREMENT OF THE VECTOR OF THE STATE	160
<i>A.V. Babushkina, V.Ya. Modorskii, A.F. Shmakov</i> NUMERICAL MODELING OF GASDYNAMIC PROCESSES AND PROCESSES OF DEFORMATION IN COMPRESSOR OF MODEL TEST BENCH OF THE GAS-DISTRIBUTING UNIT	163
<i>N.N. Besspalov, Y.V. Goryachkin, D.V. Tundukov</i> SOFTWARE IMPLEMENTATION CONTROL PULSE VOLTAGE OF SQUARE WAVE FPGA	166
<i>D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin</i> THE PARALLEL METHOD INFERENCE IN PREDICATE CALCULUS WITH FACTS DETERMINATION	170
<i>L.V. Galina, D.A. Proskurin, A.S. Rusyaev</i> THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN ASSESSING THE EFFICIENCY OF HIGHLY AUTOMATED PRODUCTION SYSTEMS	178

V.G. Degtiar, V.I. Pegov, A.D. Cheshko INVESTIGATION OF IGNITION OF A SUBMERGED JET ENGINE	181
A.A. Denisevich, E.V. Efremov, M.I. Grachev MATHEMATICAL MODEL OF TABLET PRESSING PROCESS IN FABRICATION OF MNUP-FUEL	189
S.L. Kalyulin, V.Ya. Modorskii, R.V. Bulbovich NUMERICAL SIMULATION OF GAS-DYNAMIC FLOW IN A SMALL-SIZED WIND TUNNEL	192
V.S. Karimov, V.B. Rozhdestvenskaya INTELLECTUAL SEARCH ALGORITHM AND ANALYSIS OF TEXT INFORMATION ON THE INTERNET	196
V.V. Kiselev, L.G. Babushkina, V.D. Volodin, A.A. Sharonov SWITCHING CENTER SOFTWARE OF CRANE MANIPULATOR	199
E.Yu. Kurchatov, D.E. Chickrin, P.A. Kokunin, D.V. Berezhnoi, I.G. Galiullin, A.N. Stepanov, N.V. Kharchenko CALCULATION OF STRESSES IN SUPERFLYWHEEL	202
E.Yu. Kurchatov, D.E. Chickrin, P.A. Kokunin, D.V. Berezhnoi, I.G. Galiullin, A.N. Stepanov, N.V. Kharchenko IMPROVING THE EFFICIENCY OF POWER SYSTEMS WITH HIGH DEMANDS ON QUALITY OF POWER SUPPLY	206
T.I. Sinelnikova, N.A. Shvetsova REALIZATION OF SYSTEM SCIENCE METHODS OF EPISTEMOLOGICAL LEVEL OF GENERATIVE SYSTEMS	209
E.V. Spiridonova QUALITATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL SOLUTIONS OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS THEORY OF CRACKS IN THE MIXED STATEMENT	212
A.F. Shmakov, V.Ya. Modorskiy RESEARCH GAPS IN LABYRINTH SEAL FROM THE ACTIONS GASDYNAMIC AND THERMAL LOADS IN FSI FORMULATION	216
V.A. Shchapov SCIMQ: TECHNOLOGIES FOR INTENSIVE DATA FLOW PROCESSING SERVICES	219
O.V. Schekochikhin, V.V. Shvedenko, P.V. Shvedenko ONTOLOGY CONCEPTS OF INFORMATION SYSTEM BEHAVIOR	223
ABSTRACTS	226

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.00

Е.А. Вячкина, Е.В. Решетникова, Е.С. Вячкин

НФИ КемГУ, Новокузнецк, SedovaEA@yandex.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫПЛАТ ЗА ВЫБРОСЫ ПРИ ПОЖАРЕ В СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТАХ

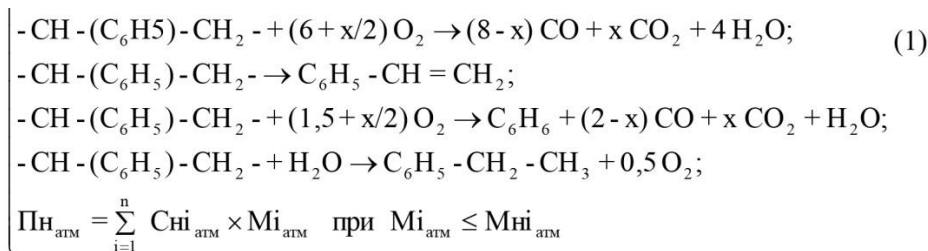
Рассматривается реализация методики расчета выплат при пожаре. Методика, полученная авторами в работе [1], содержит физическую и химическую составляющую, а также часть, отвечающую за расчет выплат за загрязнение. В работе проведена её проверка на тестовом примере.

Ключевые слова: химический состав, математическая модель, выбросы, скорость, температура.

Введение. Имеющиеся методики расчета выбросов в атмосферу не позволяют провести расчет таковых при бытовом пожаре, так как необходимо учитывать не только составляющие строительных конструкций, но и температуру процесса горения, место очага возгорания и взаимные химические реакции. Такой учет возможен только в случае решения связанной термо-химической задачи, включающей часть по расчету выплат.

Математическая модель расчета выплат при пожаре. Ранее в работе [1] авторами получена математическая модель расчета выплат при пожаре. Модель содержит три составляющих. Часть модели, отвечающая за расчет физических параметров пожара, основана на зональном методе и включает расчет температуры, проёмности, пожарной нагрузки и объема сгораемого кислорода. Та часть, которая отвечает за выбросы, разработана совместно с научным сотрудником Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, кандидатом технических наук Петровым Р. В. и содержит уравнения реакций горения основных составляющих строительных и отделочных материалов. Последняя часть модели содержит уравнения расчета выплат, основанные на источниках [2, 3]. Итоговый вид математической модели представлен системой (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\max} - T_0 = 224 * q_k^{0,528}; \\ T_{\max} = 940 e^{4,7 * 10^{-3} (q - 30)}; \\ q_k = \frac{\sum P_i * Q_{H_i}^p}{(6S - A) * Q_{H_0}^p}; \\ q_{кп.р.} = \frac{4500 * \Pi^3}{1 + 500 * \Pi^3} + \frac{V^{0,333}}{6 * V_0}; \\ \Pi = \frac{\sum A_i h^{0,5}}{V^{0,667}}; \\ \Pi = \frac{\sum A_i h^{0,5}}{S}; \\ \Pi = \frac{\sum V_i P_i}{\sum P_i}; \\ V = a \cdot b \cdot h; \\ V_0 = 0,21 * V; \\ C_6H_{10}O_5 + (3 + x/2) O_2 \rightarrow (6 - x) CO + x CO_2 + 5 H_2O; \\ CH - (C_6H_5) - CH_2 - + (0,5 + x/2) O_2 \rightarrow C_6H_5 - CH_3 + (1 - x) CO + x CO_2; \\ -CH - (C_6H_5) - CH_2 - + H_2O \rightarrow C_6H_5 - CH_2 - CH_3 + 0,5 O_2; \\ -CH_2 - CHCl - + (2 + x/2) O_2 \rightarrow (2 - x) CO + x CO_2 + H_2O + HCl; \end{array} \right. \quad (1)$$



Разработка программы для расчета выплат за загрязнение окружающей среды при пожаре. Интерфейс программы представлен на рисунке 1. В главное окно программы должны быть введены данные о размерах помещения, месте начала возгорания, начальной температуре, времени пожара. Обязательно должен быть правильно указан экономический регион. Проемность помещения и высоту проемов пользователю необходимо будет рассчитать исходя из плана помещения. В раздел Материал необходимо будет внести количество материала, находящегося в помещении. В правую таблицу главного окна вводятся данные о веществах, по которым заданы предельно допустимые выбросы, лимиты или информация о количестве выбросов сделанных ранее. После введения всех необходимых данных результаты расчета выплат по каждому опасному веществу отдельно и итоговая сумма выплат за загрязнение окружающей среды при пожаре выводится в виде таблицы.

Тестирование программы расчета выплат. В качестве тестового примера возьмем помещение, высота которого $a=5$ м, длина $b=30$ м, ширина $c=70$ м. Площадь проемов помещения $A=250 \text{ м}^2$, а их высота - $h=4$ м. Начальную температуру зададим 30°C . Длительность пожара - $t_n=30$ мин. Будем считать, что в помещении находится 20 т древесины, 40 т ПВХ и 20 т пенопласта.

Проведем расчет примера, используя математическую модель расчета платы за выбросы. Определим физические параметры пожара:

$$\begin{aligned}
 V &= a \times b \times c = 5 \times 30 \times 70 = 10500 \text{ м}^3, \\
 S &= b \times c = 30 \times 70 = 2100 \text{ м}^2. \\
 q &= \frac{\sum P_i}{S} = \frac{20000+40000+20000}{2100} = 38,09 \text{ кг/м}^2. \\
 \Pi &= \frac{\sum A_i \times h_i^{0,5}}{S} = \frac{250 \times \sqrt{4}}{2100} = 0,24 \text{ м}^{0,5}. \\
 V_0 &= \frac{\sum V_{0i} \times P_i}{\sum P_i} = \frac{4,2 \times 20000 + 5,4 \times 40000 + 8,44 \times 20000}{20000+40000+20000} = \frac{468800}{80000} = 5,86 \text{ м}^3. \\
 q_{\text{кр.к}} &= \frac{4500 \times \Pi^3}{1 + 500 \times \Pi^3} + \frac{V^{0,333}}{6 \times V_0} = \frac{4500 \times 0,24^3}{1 + 500 \times 0,24^3} + \frac{10500^{0,333}}{6 \times 5,86} = \frac{62,208}{7,912} + \frac{21,83}{35,16} = 7,86 + 0,62 \\
 &= 8,48 \text{ кг/м}^2 \\
 q_k &= \frac{\sum P_i \times Q_{H_i}^p}{(6 \times S - A) \times Q_{H_0}^p} = \frac{20000 \times 13,8 + 40000 \times 20 + 20000 \times 41,63}{(6 \times 10500^{0,667} - 250) \times 13,8} = \frac{1908600}{36375,72}, \\
 q_k &= 52,469 \text{ кг/м}^2.
 \end{aligned}$$

Файл Таблицы

Размеры помещения

Длина 30 м

Ширина 70 м

Высота 5 м

Размеры проемов

Площадь, кв.м 250

Высота, м 4

Возгорание произошло

☐ в углу помещения

☒ в центре помещения

☐ у стены помещения

Начальная температура 30 °C

Время пожара 30 мин

Экономический регион

Западно-Сибирский

☐ В городе

Материал	Масса, т
Древесина	20
ПВХ	40
Пенопласт	20

Вещество	Ранее выброшено (тонны)	Предельно-допустимо (тонны)	Лимит (тонны)
Углерода окись (углерода окиси)	3	5	7
Водород хлорист...	4	5	5

Расчет

Название загрязняющего вещества	Масса вещества, выброшенная в атмосферу (тонны)	Плата за выброс, руб
Углерода окись (углерода окиси)	31,12	1326,27
Водород хлористый (соляная кислота)	5,98	4507,02

Экспортировать в excel

Рис. 1 – Главное окно программы

Расчет температуры будет происходить для случая с пожаром регулируемым вентилиацией.

$$T_{max} = 940e^{4,7 \times 10^{-3}(q-30)} = 940e^{4,7 \times 10^{-3}(38,09-30)} = 940e^{4,7 \times 10^{-3} \times 8,09} = 940e^{0,038} = 976,429^\circ\text{K}$$

$$T_{max} = 976,429 - 273,15 = 703,279^\circ\text{C}.$$

Чтобы определить какие материалы сгорают, сравниваем температуры горения материалов с найденной максимальной температурой.

Находим выгоревшую массу произведением абсолютной массовой скорости на время пожара в секундах

$$M_{\text{выг.}} = V^{abc} \times t_n = 9,79 \times 1800 = 17623,62 \text{ кг}.$$

Далее, необходимо из общей выгоревшей массы выделить массы отдельных материалов.

Чтобы посчитать массу выделившихся из сгоревших материалов веществ нужны химические уравнения. Проведем расчет для ПВХ.

$$CO_2 = 1,4 \times 8811,81 = 12336,53 \text{ кг},$$

$$HCl = 0,2 \times 8811,81 = 1762,362 \text{ кг}.$$

Аналогичный расчет проводим для остальных материалов.

Объединяем массы по типам веществ и выделим из всех веществ те, за которые нужно платить. В нашем случае такими веществами являются CO (углерода окись) и HCl (водород хлористый).

Известно, что до пожара предприятие выбросило 3 т CO и 4 т HCl . Предельно допустимая норма выброса для CO - 5 т, для HCl - 5 т. Установлены лимиты для CO до 7 т, для HCl лимит не установлен. Выброс произошел в Западно-Сибирском экономическом районе, районный коэффициент равен 1,2. Коэффициент инфляции равен 2,67.

Проведем расчет платы за окись углерода в пределах лимитов и сверх них.

Проведем расчет платы за сверхлимитный выброс

$$\text{Пол атм} = 5 \times 5,164 \times 3 \times 1,2 \times 2,67 = 248,195 \text{ руб.}$$

Плата за выброс в пределах установленных лимитов.

$$\text{Пл атм} = 2 \times 3 \times 1,2 \times 2,67 = 19,224 \text{ руб.}$$

Рассчитывается плата за выброс в пределах нормативов:

$$\text{Пн атм} = 2 \times 0,6 \times 1,2 \times 2,67 = 3,8448 \text{ руб.}$$

Общая плата за загрязнение атмосферного воздуха окисью углерода

$$\text{П атм} = 3,8448 + 19,224 + 248,195 = 271,26 \text{ руб.}$$

Аналогично проведем расчет платы за водород хлористый, плата за выброс которого составит 719,49 руб.

Результат работы программы, представленный на рисунке 2, полностью совпадает с расчетами, проведенными в ручную.

Расчет платы за НВОС

Файл Таблицы

Размеры помещения

Длина 30 м

Ширина 70 м

Высота 5 м

Размеры проемов

Площадь, кв.м 250

Высота, м 2

Возгорание произошло

☒ в углу помещения

☐ в центре помещения

☐ у стены помещения

Начальная температура 30 °C

Время пожара 30 мин

Экономический регион

Западно-Сибирский

☐ В городе

Материал	Масса, т
Древесина	20
Пенопласт	20
ПВХ	40

Вещество	Ранее выброшено (тонны)	Предельно-допустимо (тонны)	Лимит (тонны)
Углерода окись (...)	3	5	7
Водород хлорист...	4	5	5

Расчет

Название загрязняющего вещества	Масса вещества, выброшенная в атмосферу (тонны)	Плата за выброс, руб
Углерода окись...	9,16	271,27
Водород хлорис...	1,76	719,85

Рис. 2 - Результат работы программы

Заключение. В работе проведена реализация математической модели расчета выплат за негативное воздействие на окружающую среду и её тестирование.

Список литературы

1. Вячкина, Е. А. Математическая модель расчета платы за выбросы при пожаре в строительных объектах [Текст] / Е. А. Вячкина [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016.-№3. – С. 13-16.
2. "Инструктивно-методические указания по взиманию платы за загрязнение окружающей природной среды" (утв. Минприроды РФ от 26.01.1993) (ред. от 15.02.2000, с изм. от 12.07.2011) (Зарегистрировано в Минюсте РФ 24.03.1993 N 190) [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_1867/.
3. Постановление Правительства РФ от 12.06.2003 N 344 (ред. от 24.12.2014) "О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, в том числе через централизованные системы водоотведения, размещение отходов производства и потребления" [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_42740/.

01.01.02

**Р.Н. Голых к.т.н., В.Н. Хмелёв д.т.н., А.В. Шалунов д.т.н.,
Р.С. Доровских, В.А. Шакура, Е.В. Ильченко**

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова»,
г. Бийск, grn@bti.secna.ru

КОЛЕБАНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В АНИЗОТРОПНОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта
№ 16-08-01298 а

В статье предложена физико-математическая модель колебаний пузырька в анизотропной высоковязкой жидкости. Модель основана на спектральном разложении тензора вязких напряжений по компонентам, характеризующим реологические свойства жидкости при сдвиге в разных направлениях. Анализ модели позволил выявить формы газового пузырька при различных параметрах акустического поля и реологических характеристиках жидкости.

Ключевые слова: анизотропия, вязкость, ультразвук, газовая полость.

Введение

Проблема моделирования колебаний газового пузырька в жидкости под воздействием акустических полей актуальна, в первую очередь, в областях ультразвуковой кавитационной обработки сред для выявления оптимальных режимов воздействия, процессах химических технологий с течениями пузырьковых сред и в материаловедении для анализа образования нежелательных газовых включений, снижающих прочность материалов.

На сегодняшний день наиболее полно исследована динамика газовой полости в изотропных жидкостях, т.е. вязкость которых не зависит от направления скорости сдвига [1–2]. Это вызвано тем, что модели газового пузырька в таких жидкостях являются наиболее простыми ввиду сферичности формы полости. Сферичность пузырька даёт возможность свести задачу к обыкновенному дифференциальному уравнению (ОДУ) относительно скалярной функции – радиуса пузырька от времени.

Однако для случая анизотропных жидкостей модели колебаний газовой полости на сегодняшний день отсутствуют. Это обусловлено тем, что в таких жидкостях пузырёк нарушает сферическую форму из-за разности сил вязких напряжений, действующих вблизи каждого участка стенки газовой полости. Поэтому разработка физико-математической модели колебаний газового пузырька в жидкостях с зависимостью вязкости от направления скорости сдвига является актуальной задачей.

Для расчёта колебаний пузырька были рассмотрены общие уравнения течения анизотропной высоковязкой среды (1–3) с граничными условиями на поверхности пузырька (4–5) [3]. Эти уравнения наряду со скоростью и давлением жидкости дополнительно включают в себя вектор ориентации макромолекул $\mathbf{B}$, который собственно и определяет зависимость вязкости от направления скорости сдвига.

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} \right] = \text{div} (-p \mathbf{I} + \mathbf{T}); \quad (1) \quad \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{B} = \lambda \left(\mathbf{D} \mathbf{B} - \left(\sum_{m,n=1}^3 D_{mn} B_m B_n \right) \mathbf{B} \right); \quad (2)$$

$$\sum_{i,j,k,l=1}^3 \tau_{ijkl}(\mathbf{B}) \mathbf{e}_{ij} \left(\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) T_{ij} \right) + \mathbf{T} = \sum_{i,j,k,l=1}^3 \eta_{ijkl}(\mathbf{B}) \mathbf{e}_{ij} \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_l} + \frac{\partial v_l}{\partial x_k} \right); \quad (3)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}; \quad (4)$$

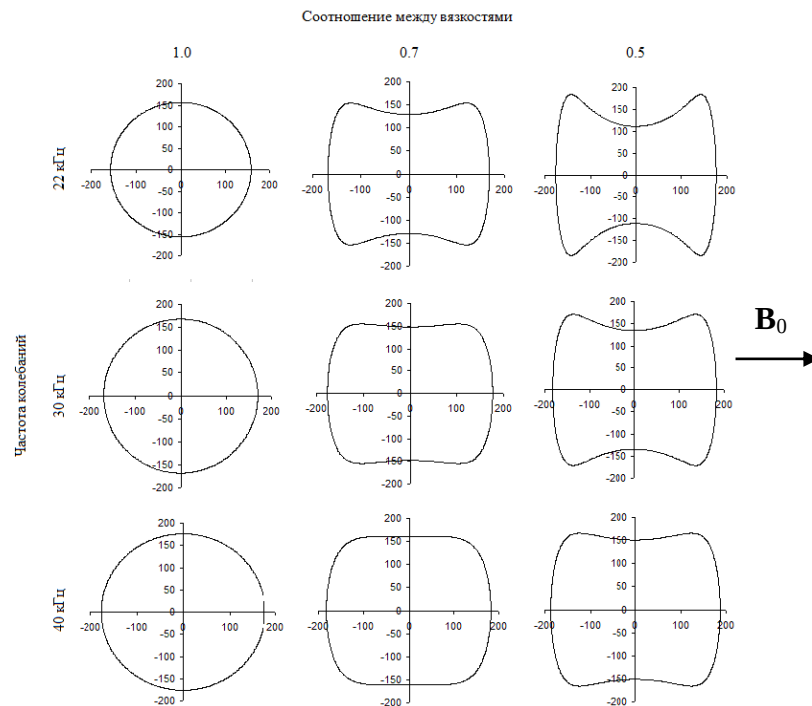
$$-\mathbf{T} \mathbf{n} + p \mathbf{n} = p_B \mathbf{n} - 2\sigma \mathbf{K} \mathbf{n}; \quad (5)$$

где $\mathbf{v}$ – вектор скорости движения жидкости, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; p – давление в жидкости, Па; $\mathbf{T}$ – тензор вязких напряжений в жидкости, Па; $\mathbf{D}$ – тензор скоростей деформации, с⁻¹; $\mathbf{B}$ – вектор ориентации макромолекул; p_B – давление газа внутри пузырька, Па; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; K – кривизна стенки пузырька, м⁻¹; $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки стенки газового пузырька, м; $\mathbf{n}$ – вектор внешней нормали к поверхности пузырька; η_{ijkl} – компонент тензора вязкости жидкости, Па·с; τ_{ijkl} – компонент тензора времен релаксации, с.

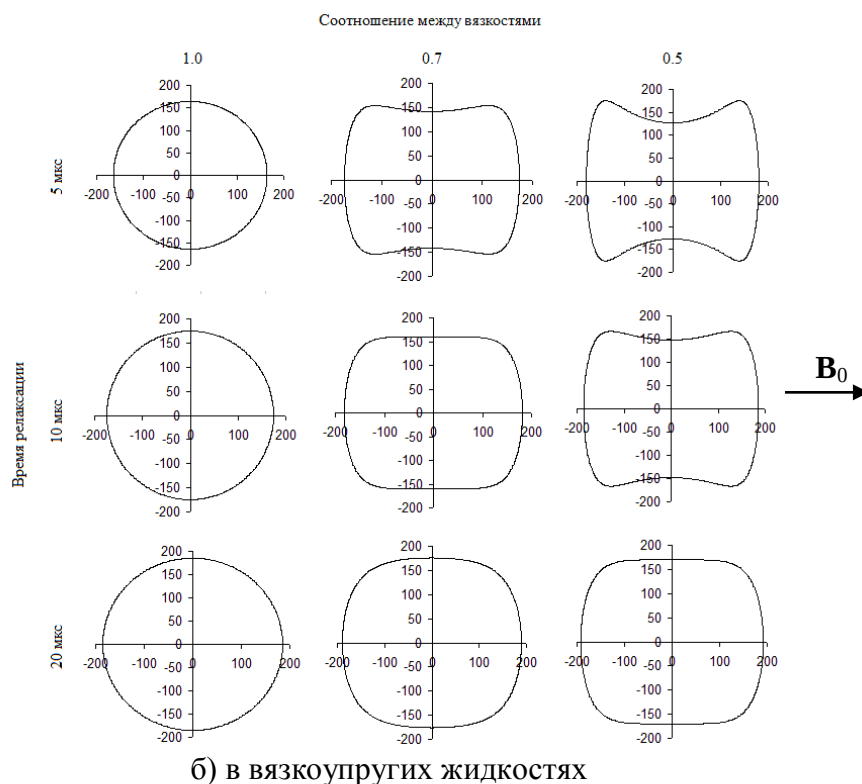
Поскольку конечно-элементное решение системы данных уравнений отличается значительной вычислительной трудоёмкостью, расчёт колебаний пузырька производился с помощью метода последовательных приближений формы стенок и характеристик течения жидкости по тензору вязкости η_{ijkl} , предложенного Голых Р.Н. и описанного в статье [3]. Кроме того, было дополнительно учтено, что согласно работам Голых Р.Н. [3] и Волкова В.С. [4] для большинства жидкостей тензор вязкости и тензор времен релаксации раскладывается на спектральные составляющие, пропорциональные вязкостям в продольном направлении (параллельном ориентации макромолекул, $\eta_{||}, \tau_{||}$) и в поперечном направлении (перпендикулярном ориентации макромолекул, $\eta_{\perp}, \tau_{\perp}$):

$$\eta_{ijkl} = \sum_{\alpha=1}^3 \eta_{\alpha} a_{ijkl}^{(\alpha)}; \tau_{ijkl} = \sum_{\alpha=1}^3 \tau_{\alpha} a_{ijkl}^{(\alpha)}; \eta_1 = \eta_2 = \eta_{\perp}; \eta_3 = \eta_{||}; \tau_1 = \tau_2 = \tau_{\perp}; \tau_3 = \tau_{||}. \quad (6)$$

На рисунке 1а представлены изменения формы газового пузырька при различных соотношениях между вязкостями жидкости в разных направлениях сдвига $\eta_{||}/\eta_{\perp}$ и частотах колебаний пузырька для случая, когда жидкость не обладает вязкоупругостью (тензор времен релаксации нулевой). Вязкость $\eta_{\perp}$ во всех расчётах была фиксированной и составляла 0,3 Па·с. На рисунке 1б представлены изменения формы газового пузырька при различных соотношениях между вязкостями жидкости в разных направлениях $\eta_{||}/\eta_{\perp}$ и временах релаксации вязкости для вязкоупругих жидкостей. Соотношения между вязкостями составляли 1.0, 0.7 и 0.5. Как следует из закона Ван дер Ваальса, они соответствуют среднеквадратичным отклонениям углов вектора ориентации макромолекул 90°, 78° и 60° соответственно (при гауссовом распределении макромолекул по ориентациям и соотношении размеров макромолекулы, равном 2).



а) в жидкостях без вязкоупругости



б) в вязкоупругих жидкостях

Рисунок 1 – Изменение формы газового пузырька при различных параметрах воздействия и реологических свойствах жидкости (B_0 – вектор ориентации макромолекул)

Из анализа представленных рисунков следует, что увеличение соотношения между вязкостями в продольном и поперечном направлении приводит к усилению деформации кавитационного пузырька относительно сферической формы.

При этом кавитационный пузырёк имеет наибольшие размеры в продольном направлении, поскольку жидкость при сдвиге в данном направлении обладает наименьшей вязкостью.

Таким образом, в результате выполнения работы предложена физико-математическая модель, которая позволяет рассчитать форму газового пузырька в анизотропной высоковязкой жидкости в зависимости от параметров акустического поля и реологических свойств жидкости.

Список литературы

1. *Khmelev, V.N.* Determination of ultrasonic effect mode providing formation of cavitation area in high-viscous and non-newtonian liquids / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, S.S. Khmelev, K.A. Karzakova // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2014: Conference Proceedings. – 2014. – P. 203–207.
2. *Brujan, E.A.* Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids / E.A. Brujan, P.R. Williams // *Reology reviews*. – 2005. – P. 147–172.
3. *Golykh, R.N.* Gaseous bubble oscillations in anisotropic non-Newtonian fluids under influence of high-frequency acoustic field / R.N. Golykh // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 722. – Conf. 1. – 8 p.
4. *Volkov, V.S.* Spectral theory of anisotropic fluids / V.S. Volkov // *Polymer Science Series A*. – 2010. – Vol. 52. – Issue 11. – P. 1105–1113.

01.01.06

В.В. Дружинин д.ф.-м.н.

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

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ СУММ ОБОБЩЕННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ПРОГРЕССИЙ

Получена формула для расчета сумм с основаниями, образующих арифметические прогрессии, в одинаковых степенях. Приведены результаты для степеней от «1» до «4». Найдены дифференциальные и рекуррентные соотношения между такими суммами и указаны приложения.

Ключевые слова: сумма членов арифметической прогрессии, суммы одностепенных чисел, числа Бернулли.

Рассмотрим сумму следующего вида

$$S(n; m; t; 1) = \sum_{k=1}^n (1 + (k-1)m)^t = 1 + (1+m)^t + (1+2m)^t \dots \dots \dots + (1+(n-1)m)^t, \quad (1)$$

которую мы назовем суммой обобщенной арифметической прогрессии (СОАП), так как основания чисел в сумме образуют АП. Общие свойства таких сумм следующие: $S(n; m; 0; 1) = n$; $S(1; m; t; 1) = 1$. В (1) m произвольное число, t – неотрицательная целая степень. Теория расчета таких сумм имеет многовековую историю. При $m = 1$ ими занимался с 1617 г. Иоганн Фаульгарбер, который издал вначале книгу расчетов этих сумм со степенями до «11», а после издал вторую книгу со степенями до «17». Пьер Ферма для расчета таких сумм предложил методы квадрато-квадратов и кубо-кубов в письме Мерсенну. Основной вклад внес Якоб Бернулли, который ввел многочлены его имени. Позже Эйлер нашел производящую функцию для многочленов Бернулли, а Аппель указал на производные для них. Расчетом таких сумм занимался также Якоби и другие математики [1]. В современной литературе СОАП с $m = 1$ рассчитывается через многочлены Бернулли $B_t(n)$ по формуле

$$S(n; 1; t; 1) = \frac{1}{t+1} [B_{t+1}(n+1) - B_{t+1}]. \quad (2)$$

Сами эти многочлены находятся из разложения в степенной ряд производящей функции Эйлера

$$\frac{ke^{kn}}{e^k - 1} = \sum_{t=0}^{\infty} \frac{k^t}{t!} B_t(n). \quad (3)$$

B_t – числа Бернулли, $B_t = B_t(0)$. Для небольших значений $t \leq 10$ эти полиномы можно брать их таблиц [2]:

$$B_0(x) = 1; B_1(x) = x - \frac{1}{2}; B_2(x) = x^2 - x + \frac{1}{6}; B_3(x) = x^3 - \frac{3}{2}x^2 + \frac{1}{2}x;$$

$$B_4(x) = x^4 - 2x^3 + x^2 - \frac{1}{30}; B_5(x) = x^5 - \frac{5}{2}x^4 + \frac{5}{3}x^3 - \frac{1}{6}x.$$

Для больших значений t необходимо расписывать ряд (3) далее. При этом сведения для расчета сумм (1) с произвольной скважностью m с применением многочленов Бернулли отсутствуют. Нет также других простых подходов к их анализу. В предыдущей статье [3] мы предложили более быстрый путь таких расчетов, а в этой статье даем общую интегральную формулу, позволяющую находить такие суммы еще быстрее при произвольных n, m, t через интегралы

$$S(n; m; t+1; 1) = \left\{ m(t+1) \int_0^n S(\zeta; m; t; 1) d\zeta \right\} + n \left\{ 1 - m(t+1) \int_0^1 S(\zeta; m; t; 1) d\zeta \right\}. \quad (4)$$

Этой формулы нет в справочниках и монографиях [1,2,4,5]. Она получена нами из первых принципов точно методом математической индукции, и ее использование не требует знания многочленов Бернулли. Покажем действие этого соотношения для $m = 1$. Так как $S(n; 1; 0; 1) = n$, то

$$S(n; 1; 1; 1) = \sum_{k=1}^n k = \int_0^n \zeta d\zeta + n \left(1 - \int_0^1 \zeta d\zeta\right) = \frac{n^2}{2} + \frac{n}{2}; \quad (5)$$

$$S(n; 1; 2; 1) = \sum_{k=1}^n k^2 = 2 \int_0^n \left(\frac{\zeta^2}{2} + \frac{\zeta}{2}\right) d\zeta + n \left(1 - 2 \int_0^1 \left(\frac{\zeta^2}{2} + \frac{\zeta}{2}\right) d\zeta\right) = \frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6}. \quad (6)$$

Это общеизвестные равенства. Приведем некоторые конкретные формулы расчета СОАП по (4)

$$S(n; m; 1; 1) = \frac{mn^2}{2} + (2-m)\frac{n}{2}; \quad (7)$$

$$S(n; m; 2; 1) = \frac{m^2 n^3}{3} + m(2-m)\frac{n^2}{2} + \frac{(6-6m+m^2)}{6}n; \quad (8)$$

$$S(n; m; 3; 1) = \frac{m^3 n^4}{4} + m^2(2-m)\frac{n^3}{2} + \frac{m(6-6m+m^2)}{4}n^2 + \frac{(2-3m+m^2)}{2}n; \quad (9)$$

$$S(n; m; 4; 1) = \frac{m^4 n^5}{5} + m^3(2-m)\frac{n^4}{2} + \frac{m^2(6-6m+m^2)}{3}n^3 + \\ + m(2-3m+m^2)n^2 + \frac{(30-60m+30m^2-m^4)}{30}n. \quad (10)$$

Например, из (8) можно получить такое новое равенство при $m = \frac{1}{2}$ и $t = 2$

$$\sum_{k=1}^{n+1} \left(\frac{k}{2}\right)^2 = \frac{6+2n^3+9n^2+13n}{24}. \quad (11)$$

В $S(n; m; t; 1)$ первое слагаемое всегда равно $(m^t n^{t+1})/(t+1)$, второе – $(m^{t-1}(2-m)n^t)/2$, третье – $(t(m^{t-2}n^{t-1}))(6-6m+m^2)/12$. Если взять $m = 1$, то эти результаты совпадают с формулами Бернулли [2].

Далее запишем исследуемую сумму в виде полинома

$$S(n; m; t; 1) = \sum_{k=1}^{t+1} c_n(m; t; k) n^k. \quad (12)$$

Между коэффициентами $c_n(m; t; k)$ (6) из (4) вытекает следующее рекуррентное соотношение

$$c_n(m; t+1; k+1) = \frac{m(t+1)c_n(m; t; k)}{(k+1)}. \quad (13)$$

Последний коэффициент $c_n(m; t+1; 1)$ находится из равенства

$$c_n(m; t+1; 1) = 1 - \sum_{k=2}^{t+1} c_n(m; t+1; k). \quad (14)$$

Также из (4) следует дифференциальная рекуррентная связка

$$\frac{1}{m(t+1)} \left(\frac{\partial S(n; m; t+1; 1)}{\partial n} \right) \Big|_0^n = S(n; m; t; 1). \quad (15)$$

Формулы $S(n; m; t; 1)$ можно находить не только путем интегрирования, но также используя рекуррентные соотношения (13,14,15).

Суммы $S(n; m; t; 1)$ можно дифференцировать по переменной m . Производная по m -го порядка позволяет рассчитывать аналитически суммы вида

$$\sum_{k=2}^n (k-1)^p (1+(k-1)m)^{t-p} = \frac{(t-p)!}{t!} \cdot \frac{\partial^p S(n; m; t; 1)}{\partial m^p}. \quad (16)$$

Например, первая производная дает

$$\frac{\partial S(n; m; t; 1)}{\partial m} = t \sum_{k=2}^n (k-1)(1+(k-1)m)^{t-1}. \quad (17)$$

Действительно, при $m = 2, n = 4, t = 3$

$$3(3^2 + 2 \cdot 5^2 + 3 \cdot 7^2) = \frac{\partial S(4; m; 3; 1)}{\partial m} = \frac{3m^2 n^4}{4} + \\ + (4m - 3m^2) \frac{n^3}{2} + \frac{(6 - 12m + 3m^2)}{4} n^2 + \frac{(2m - 3)}{2} n = 618.$$

Суммы $S(n; m; t; 1)$ можно также интегрировать по переменной m . В результате получаем такое новое соотношение

$$m + \sum_{k=2}^n \left\{ \frac{[1+(k-1)m]^{t+1}-1}{(t+1)(k-1)} \right\} = \int_0^m S(n; \zeta; t; 1) d\zeta. \quad (18)$$

Например, взяв $m = 2, n = 3, t = 2$ и проинтегрировав $S(n; m; 3; 1)$ по m от нуля до « m », получаем прямым расчётом левой части число «31,33...», а в правой части функцию

$$\int_0^m S(n; \zeta; 3; 1) d\zeta = \frac{m^3 n^3}{9} + \frac{m^2 n^2}{2} - \frac{m^3 n^2}{6} + mn - \frac{m^2 n}{2} + \frac{m^3 n}{18},$$

которая дает то же самое число.

Полученные выше формулы для СОАП позволяют резко сократить компьютерные расчёты по большим суммам, аналитически работать с суммами нового вида, получать

формулы для знакопередающих сумм или сумм с заранее заданным порядком плюсов и минусов, анализировать суммы типа сумм последней теоремы Ферма и решать другие задачи. В качестве примера, приведем расчет знакопередающих $(+; -)$ сумм

$$T(2n; m; t; 1) = \sum_{k=0}^{2n-1} (-1)^k (1 + km)^t = 1 - (1 + m)^t + (1 + 2m)^t - \dots - (1 + (2n - 1)m)^t = 2S(n; 2m; t; 1) - S(2n; m; t; 1), \quad (19)$$

а именно

$$T(2n; m; 1; 1) = -mn; \quad (20)$$

$$T(2n; m; 2; 1) = -mn(2mn + 2 - m); \quad (21)$$

$$T(2n; m; 3; 1) = -mn[4m^2n^2 + 3mn(2 - m) - 3(m - 1)]; \quad (22)$$

$$T(2n; m; 4; 1) = -mn[8m^3n^3 + 8m^2n^2(2 - m) + 12mn(m - 1) + (m^3 - 6m + 4)]. \quad (23)$$

При наличии знакопеременных сумм, например, при знаках $(+; +; -)$ с периодом, получены такие формулы

$$P(3n; 1; 1; 1) = \frac{3n(n-1)}{2}; \quad (24)$$

$$P(3n; 1; 2; 1) = \frac{6n^3 - 9n^2 - 5n}{2}; \quad (25)$$

$$P(3n; 1; 3; 1) = \frac{27n^4 - 54n^3 - 45n^2}{4}. \quad (26)$$

С помощью формулы (2) решаются некоторые сложные диофантовы и алгебраические уравнения. Например, алгебраическое уравнение четвертого порядка

$$27x^4 - 18x^3 - 9x^2 + 4x - 1632 = 0 \quad (27)$$

по коэффициентам перед неизвестной совпадает с СОАП, и одно из решений находится сразу, $x = 3$.

При изучении решений диофантовых уравнений с большим числом неизвестных нами найдена длинная связка чисел типа сумм Ферма

$$2^3 + 3^3 + 5^3 + 7^3 + 8^3 + 9^3 + 10^3 + 16^3 + 34^3 + 60^3 = 64^3.$$

Автор благодарит редакцию журнала «Труды института математики и механики УрО РАН», признавшего формулы статьи верными и полученными впервые, а также чл.-корр. РАН Махнева А.А. за ознакомление с рукописью статьи и ценные замечания.

Список литературы

1. Прасолов В.В. Многочлены. МЦИМО, 2003 г., стр. 131.
2. Грэхем З., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика, М., «Мир», стр. 313, 1998.
3. Дружинин В.В., Лазарев А.А.// НТВП, №2, с.9-11, 2016.
4. Градштейн И.С., Рыжик И. М.. Таблицы интегралов, сумм, рядов и производений. ГИМФЛ, Москва, 1962. стр. 15-16.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике, наука, ГИМФЛ, М., 1974 г., стр. 31,135.

01.01.07

М.В. Крючков

Пермский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»,
кафедра высшей математики,
Пермь, mkryuchkov@hse.ru

АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ФИНАНСОВЫХ СТРАТЕГИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

В работе представлен анализ результатов численного расчета показателя эффективности по Байесу для некоторых финансовых стратегий, применяемых в сериях игр с природой. Реализовано большое число моделирований стохастического процесса игры, сформированных с вероятностными характеристиками совпадающими с аналогичными величинами рассматриваемой задачи. По результатам эксперимента сделаны выводы о близости эмпирического среднего выигрыша к его математическому ожиданию.

Ключевые слова: *метод Монте-Карло, финансовая стратегия, критерий Байеса, игры с природой.*

В работе [1] рассмотрена задача принятия решений в условиях риска: игроку известны возможные состояния природы, а также вероятности, с которыми природа эти состояния реализует; в ходе теоретического исследования некоторых стратегий (финансовых систем ставок) на малых игровых интервалах получены в явном виде формулы математического ожидания и дисперсий выигрышей. Описанный в работе [2] численный эксперимент расчета показателя эффективности рассматриваемых финансовых стратегий проводился для небольшого числа игр (20 серий по 3 игры), поскольку основная идея работы [1] заключалась в определении для стратегий зависимостей отклонений от ожидаемой прибыли и дисперсии.

Целью данной работы является определение близости эмпирического среднего выигрыша к его математическому ожиданию при проведении большого числа моделирований стохастического процесса игры. Общим названием группы таких подходов к исследованию является метод Монте-Карло. Прежде чем переходить к описанию эксперимента и его результатам сформулируем математическую постановку задачи.

Правила игры таковы: игрок называет некоторое положительное число x , после чего с вероятностью p получает выигрыш размером x единиц и с вероятностью $1-p$ проигрывает x . Размер ставки игрока ограничен суммой, называемой «банкроллом» - изначально имеющаяся сумма для ставок плюс-минус произошедшие выигрыши-проигрыши. Выигрышем считается разность между величинами банкролла в конечный и начальный момент. Математическое ожидание прибыли в одной такой игре находится по формуле $M[\xi] = x \cdot p + (-x) \cdot (1-p) = x \cdot (2p-1)$.

Любая стратегия X_i подразумевает некоторую ставку, а состояния природы Q_j можно обозначить вектором $\{Q_1, Q_0\} = \{1; 0\}$ соответствующего тому факту, что ставка либо выиграна (1) либо проиграна (0); природа реализует состояние Q_1 с вероятностью p , а Q_0 с $(1-p)$.

Введем дополнительные обозначения и запишем функцию выигрыша:

N - количество игр в серии; $X_1, \dots, X_m$ - множество стратегий; $\xi(n)$ - выигрыш в n -ой игре: дискретная случайная величина, принимающая значение $x_i(n)$ с вероятностью p и $-x_i(n)$ с вероятностью $(1-p)$, где $x_i(n)$ - размер ставки в n -ой игре, соответствующей стратегии X_i ; $BR(n)$ - величина банкролла после n игр: $BR(n) = BR(n-1) + \xi(n)$, $BR(0) = BR_0 = 1$.

U_i - функция выигрыша для стратегии X_i ; $U_i = BR(N) - BR_0$.

Перейдем к описанию исследуемых стратегий.

1. Постоянная ставка. Размер ставки x постоянен, не зависит от величины текущего банкролла и определяется таким образом, чтобы в любой момент игры величина банкролла позволяла сделать такую ставку. Обозначим эту стратегию X_1 . Размер ставки в n -ой игре для данной стратегии определяется формулой $x_1(n) = \text{Const} = \frac{BR_0}{N}$.

2. Фиксированный процент от банкролла. Размер ставки x составляет от текущего банкролла некоторый процент. Данная стратегия обозначена X_2 . Размер ставки в n -ой игре данной стратегии вычисляется $x_2(n) = \frac{BR(n-1)}{N}$.

3. Критерий Келли [3]. Для нашей задачи формула Келли дает рекомендацию, что оптимальной будет ставка размером в $(2p-1)$ имеющегося банкролла. Обозначим эту стратегию за X_3 . Размер ставки в n -ой игре для данной стратегии $x_3(n) = (2p-1) \cdot BR(n-1)$.

4. Метод Мартингейла [4]. Метод Мартингейла – система управления ставками в азартных играх, которая заключается в следующем: после каждого проигрыша игрок должен увеличивать ставку так, чтобы в случае выигрыша окупить все прошлые проигрыши в этой серии с небольшим выигрышем. Данная стратегия имеет обозначение X_4 . Размер ставки в n -ой игре для данной стратегии $x_4(n) = \frac{BR_0}{2^{N-1}} \cdot I_{M\xi}(n-1)$, где $I_{M\xi}(n)$ отвечает за выигрыш по

$$\text{ставке: } I_{M\xi}(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 1, & \xi(n) \geq 0 \\ 2 \cdot I_{M\xi}(n-1), & \xi(n) < 0 \end{cases}.$$

5. « k -агрессивная» стратегия. « k -агрессивная» стратегия является некоторым расширением метода Мартингейла – в случае выигрыша окупить не только прошлые проигрыши, но и получить доход в размере произведения количества игр на изначальную сумму ставки. «3-агрессивная» стратегия обозначена X_5 . Размер ставки в n -ой игре для «3-агрессивной»

стратегии находится $x_5(n) = \frac{BR_0}{2^{3+1}-3-2} \cdot I_{A\xi}(n-1)$, где $I_{A\xi}(n)$ отвечает за выигрыш по ставке:

$$I_{A\xi}(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 1, & \xi(n) \geq 0 \\ 2 \cdot I_{A\xi}(n-1) + 1, & \xi(n) < 0 \end{cases}.$$

6. Стратегия «All-in». Стратегия «All-in» или «Ва-Банк» подразумевает в каждой игре максимально возможную ставку. Данную стратегию обозначим X_8 . Размер ставки в n -ой игре $x_8(n) = BR(n-1)$.

Рассмотрим описанные выше стратегии для N последовательных игр. Состояния, которые последовательно реализует природа, описываются булевым N -компонентным вектором $\vec{Q} = \{Q_{s1}, Q_{s2}, \dots, Q_{sN}\}$, $Q_{si} \in \{Q_1, Q_0\}$; вероятность его возникновения рассчитывается по формуле $p(\vec{Q}) = p^m \cdot (1-p)^{N-m}$, где m - количество состояний Q_1 . Вектор ожидаемого выигрыша для рассматриваемых стратегий имеет компоненты, вычисляемые по формулам

$$M[U_i] = \sum_{k=1}^{2^N} \left(\left(\sum_{j=1}^N (x_j \cdot (2Q_{sj}^k - 1)) \right) \cdot p(\vec{Q}^k) \right), \text{ где } \vec{Q}^k - \text{ вектор } k\text{-ой уникальной реализации}$$

последовательных состояний природы из всевозможных ($k = \overline{1, 2^N}$); x_j - размер ставки, соответствующей стратегии X_i .

Таблица 1– Эффективность стратегий в серии из 3-х игр

	$M[U_i]$
X_1	$-1 + 2p$
X_2	$\frac{1}{27}(-19 + 24p + 24p^2 + 8p^3)$
X_3	$7 - 48p + 144p^2 - 256p^3 + 288p^4 - 192p^5 + 64p^6$
X_4	$\frac{1}{7}(-7 + 20p - 14p^2 + 4p^3)$
X_5	$\frac{1}{11}(-11 + 34p - 28p^2 + 8p^3)$
X_8	$-1 + 8p^3$

В таблице (табл. 1) представлены формулы нахождения показателя эффективности по Байесу для предложенных стратегий в серии из 3-х игр [1]. Для исследования близости эмпирического среднего результата к теоретическому предлагается следующий численный эксперимент: генерируется последовательность из N псевдослучайных значений – 0 и 1, причем 1 соответствует тому, что псевдослучайное равномерно распределенное на отрезке $[0;1)$ число меньше заданного $p^* = 0,7$. Общее количество испытаний разбивается на серии по 3 игры. Проводится игра (1 соответствует выигрышу, 0 – проигрышу) с применением описанных стратегий. Реализация данного эксперимента подробно описана в работе [2]. Вычисляется разность между эмпирическим значением U_i^* и теоретическим значением

$M[U_i]$ и ее абсолютное отклонение от ожидаемого значения: $\delta U_i^* = \frac{|U_i^* - M[U_i]|}{M[U_i]}$. При

генерации псевдослучайного вектора состояний природы неизбежны отклонения частоты появления состояния Q_1 от заданного значения $p^* = 0,7$. Введем для этой величины

обозначение $\delta p^* = \frac{\left| \frac{m}{N} - p^* \right|}{p^*}$. Стохастический процесс моделировался для значений $N=60$,

$N=120$, $N=600$, $N=6000$; теоретические значения $M[U_i]$ получены подстановкой значения $p^* = 0,7$ в соответствующие формулы (табл. 1). Приведем основные результаты эксперимента (табл. 2 и рис.1).

Таблица 2– Результаты стохастического процесса моделирования

		$N=60$			$N=120$			$N=600$		$N=6\ 000$	
	δp^*	0	2,381	11,91	1,19	5,952	8,333	0,476	4,048	0,024	0,19
X_1	δU_1^*	0	8,33	41,67	4,17	20,83	29,17	1,67	14,17	0,08	0,67
X_2	δU_2^*	0,91	10,66	51,07	9,03	20,21	28,53	1,69	20,73	0,13	0,36
X_3	δU_3^*	0,75	11,3	53,16	10,02	19,93	27,99	1,82	22	0,25	0,52
X_4	δU_4^*	5,82	14,02	25,66	10,71	24,01	0,53	8,13	20,63	1,134	3,04
X_5	δU_5^*	9,53	17,85	15,01	15,12	25,96	12,38	3,5	5,26	0,38	1,37
X_8	δU_8^*	3,21	19,72	72,02	19,72	14,68	19,72	3,21	33,49	1,38	2,52

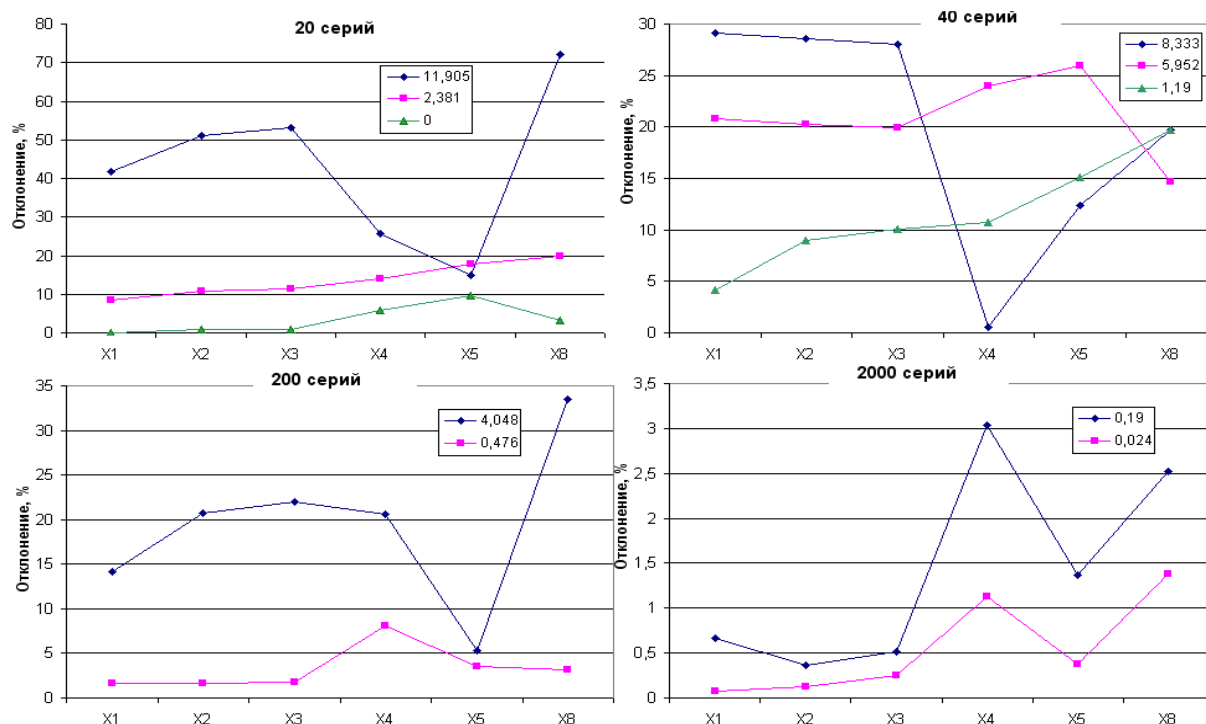


Рис. 1. Отклонение эмпирического среднего от математического ожидания выигрыша при разбивке на 3 игры для некоторых N .

Результаты эксперимента позволяют сделать некоторые выводы. Во-первых, с увеличением N растет близость расположения эмпирического среднего выигрыша к его теоретическому математическому ожиданию; при увеличении порядка количества проведенных экспериментов абсолютное отклонение реальных и модельных значений существенно падает (отчетливо видно с примерами из 200 и 2 000 серий). Во-вторых, сценарии, при которых наблюдались большие отклонения частоты появления состояния природы Q_1 от заданного значения $p^* = 0,7$, приводили к большим отклонениям и эмпирического выигрыша. Данные выводы в большинстве случаев справедливы в отношении всех рассматриваемых стратегий. При малых N (примеры 20 и 40 серий) существенные отклонения объясняются большим влиянием фактора случайности.

Полученные в ходе эксперимента данные, не противоречат общему смыслу закона больших чисел. Близость эмпирического среднего выигрыша к его математическому ожиданию подтверждает корректность формул расчета показателя эффективности по Байесу для рассматриваемых стратегий.

Список литературы

1. Крючков М.В., Русаков С.В. Расчет показателей эффективности некоторых стратегий в азартной игре // Математическая Теория Игр и её Приложения. 2015. Т. 7. N 2. С. 33-48.
2. Крючков М.В. Численный эксперимент расчета показателя эффективности финансовых стратегий. // Естественные и математические науки в современном мире. Сборник статей по материалам XLV международной научно-практической конференции. Новосибирск, 2016. С. 53-60.
3. Kelly J. L. Jr. A New Interpretation of Information Rate // Bell Systems Technical Journal. 1956. V. 35. P. 917-926.
4. Мартингейл. Метод мартингейла и антимартингейла [Электронный ресурс] // pro-ts.ru: Профессиональная школа трейдинга. URL: <http://pro-ts.ru/teoriya/upravlenie-kapitalom-foreks/55-martingeyl-metod-martingeyla-i-antimartingeyla> (дата обращения: 14.03.2014).

01.01.03

А.В. Михайлов, В.Л. Шаблов д.ф.-м.н.

Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского
ядерного университета МИФИ
г. Обнинск, Shablov@iate.obninsk.ru

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ КУЛОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В СИСТЕМАХ НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТИЦ

Разработан метод выделения кулоновских сингулярностей в членах ряда нестационарной теории возмущений для оператора эволюции в системе N заряженных частиц. Как следствие, получено разложение для амплитуды процесса развала в модифицированные борновские ряды, члены которых регулярны на энергетической поверхности, и новые приближения для волновой функции канала развала.

Ключевые слова: квантовая теория рассеяния, кулоновское взаимодействие, нестационарная теория возмущений, борновские ряды.

Как известно, теория возмущений является эффективным средством построения волновых функций и амплитуд рассеяния в системах квантовых частиц с короткодействующими парными потенциалами взаимодействия. Как правило, такой подход базируется на итерациях различных интегральных уравнений (обычно называемых интегральными уравнениями резольвентного типа), которым удовлетворяют волновые функции и Т-операторы рассеяния [1-5]. Если же между частицами действуют далекодействующие кулоновские силы, использование резольвентных уравнений и их итераций приводит к известным трудностям, заключающимся в появлении у матричных элементов Т-операторов рассеяния и членов рядов теории возмущений для них специфических (так называемых кулоновских) сингулярностей при выходе энергии системы на энергетическую поверхность [2,4-7]. Указанные сингулярности могут быть устранены как путем перестройки уравнения Липпмана-Швингера в стационарной теории рассеяния [5,8], так и путем перестройки разложения Дайсона для волновых операторов в нестационарной теории [7].

Настоящая статья посвящена разработке метода явного выделения кулоновских сингулярностей оператора эволюции многочастичной системы с чисто кулоновским взаимодействием

$$W(t) = e^{iHt} e^{-iH_0 t} \quad (1)$$

при $t \rightarrow \mp\infty$. В результате получены новые приближенные выражения для N частичных кулоновских волновых операторов соответствующих каналу N -частичного развала (или нулевому каналу реакции).

В работе используются традиционные для теории рассеяния обозначения, в частности, оператор H в (1) есть полный гамильтониан рассматриваемой N -частичной системы, в то время как H_0 есть свободный гамильтониан

$$H = H_0 + V, \quad V = \sum_{i < j}^N V_{ij} \quad (2)$$

Если V_{ij} есть короткодействующие потенциалы, выполняется асимптотическое условие [1,2,4]

$$\int_0^{\mp\infty} \|V_{ij} e^{-iH_0 t}\| dt < \infty \quad (3)$$

Как следствие, существуют волновые операторы, отвечающие нулевому каналу

$$\Omega_{\pm} = \lim_{t \rightarrow \mp\infty} W(t). \quad (4)$$

Выполнение асимптотического условия (3) приводит к факту, что каждое слагаемое $W^{(n)}(t)$ теории возмущений для оператора эволюции:

$$W(t) = \hat{I} + \sum_{n=1}^{\infty} W^{(n)}(t)$$

$$W^{(n)}(t) = (-i)^n \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} dt_2 \dots \int_0^{t_{n-1}} dt_n V(t_n) V(t_{n-1}) \dots V(t_1), \quad (5)$$

где $V(t) = e^{iH_0 t} V e^{-iH_0 t}$, сходится при $t \rightarrow \mp\infty$.

В случае системы нескольких заряженных частиц асимптотическое условие (3) не выполняется. В этом случае волновые операторы для свободного канала в формулировке Долларда определяются соотношением [1,4,6,9]

$$\Omega_{\pm} = \lim_{t \rightarrow \mp\infty} e^{iHt} e^{-iH_0 t - i \text{sign} t (\hat{\eta} \ln |t| + \hat{A})} \quad (6)$$

В (6) $\hat{\eta}$ в импульсном представлении есть оператор умножения на величину η , являющуюся кулоновским параметром системы:

$$\eta = \sum_{i>j}^N \eta_{ij} = \sum_{i<j}^N \frac{\lambda_{ij} \mu_{ij}}{k_{ij}} \quad (7)$$

и соответственно оператор $\hat{A}$ есть оператор умножения на величину A :

$$A = \sum_{i<j}^N \eta_{ij} \ln \frac{2k_{ij}^2}{\mu_{ij}} = \sum_{\alpha} A_{\alpha}, \quad (8)$$

где μ_{ij} есть приведенная масса пары ij , и α соответствует индексу этой пары ($\alpha = ij$). Формула (7) предполагает, что кулоновский потенциал в паре ij V_{ij}^c равен $\frac{\lambda_{ij}}{r_{ij}}$, где $\vec{r}_{ij} = \vec{r}_i - \vec{r}_j$ есть относительная координата пары ij , а $\vec{k}_{ij}$ есть относительный импульс этой пары.

Соотношение (6) показывает характер расходимости оператора эволюции $W(t)$ при больших t . Более того, соотношение (6) демонстрирует, как эта расходимость (кулоновская сингулярность) может быть устранена.

Для решения сформулированной проблемы поступим следующим образом. Рассмотрим оператор $W_{-}(t) = e^{-iHt} e^{iH_0 t}$, $t > 0$ вместо оператора $W(t)$. Разложение в ряд теории возмущений для $W_{-}(t)$ имеет вид

$$W_{-}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} W_{-}^{(n)}(t), \quad (9)$$

где

$$W_{-}^{(0)}(t) = \hat{I}$$

и

$$W_{-}^{(n)}(t) = (-i)^n \int_0^t dt_1 \int_0^{t_1} dt_2 \dots \int_0^{t_{n-1}} dt_n V(-t_n) V(-t_{n-1}) \dots V(-t_1) \quad (10)$$

Поведение $W_{-}^{(n)}(t)$ при больших t определяется поведением при таких t оператора $V(-t)$, которое, в свою очередь, связано со свойствами кулоновского взаимодействия. Указанное поведение можно описать, используя тождество Алсхолма [7]

$$e^{ih_0 t} \frac{1}{r} e^{-ih_0 t} = e^{-i \frac{mr^2}{2t}} \frac{1}{\frac{\hat{p}}{m} |t|} e^{i \frac{mr^2}{2t}} \quad (11)$$

где $h_0 = -\frac{1}{2m} \Delta$. Из (11) вытекает, что

$$e^{ih_0 t} \frac{1}{r} e^{-ih_0 t} - \frac{\hat{\eta}}{|t|} \xrightarrow{t \rightarrow \pm 0} 0, \quad (12)$$

где оператор $\hat{\eta}$ определен по аналогии с (7).

Представим каждый из парных потенциалов V_{ij} в виде

$$V_{ij} = V_{ij}^s + V_{ij}^c,$$

где V_{ij}^s есть короткодействующая часть потенциала V_{ij} . Последнее соотношение показывает, что оператор $V(-t)$ имеет вид

$$V(-t) = V^s(-t) + V^c(-t),$$

где $\int_0^t dt' V^s(-t')$ сходится при $t \rightarrow \infty$ вследствие асимптотического условия (3). Кроме того,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (V^c(-t) - U(t)) = 0, \quad (13)$$

где

$$U(t) = \sum_{\alpha} \frac{\hat{\eta}_{\alpha}}{t} \theta(t - t_{0\alpha}), t_0 > 0.$$

Более того, из тождества Алсхолма следует сходимость при $t \rightarrow \infty$ интеграла

$$\int_0^t dt' (V^c(-t') - U(t')), \quad (14)$$

так же, как и сходимость интеграла

$$-i \int_0^t dt' (V(-t') - U(t')). \quad (15)$$

Заметим, что сходимость интеграла (19) эквивалентна асимптотическому условию для кулоновских волновых операторов Долларда [1,4,9].

Дадим другое доказательство соотношений (13)-(15), не использующее тождества Алсхолма. С этой целью рассмотрим следующее выражение, отвечающее одному из парных кулоновских потенциалов:

$$I(t) = \langle \vec{r} | (V(-t) - U(t)) | \vec{k} \rangle.$$

Тогда

$$I(t) = \frac{\alpha}{2\pi^2} \int \frac{d\vec{k}'}{(2\pi)^{3/2}} \frac{e^{-iE't + iEt + i\vec{k}'\vec{r}}}{|\vec{k} - \vec{k}'|^2} - \frac{\alpha m}{kt} \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{(2\pi)^{3/2}} \theta(t - t_0),$$

где $E = \frac{k^2}{2m}$, $E' = \frac{k'^2}{2m}$. Выражение для $I(t)$ приводится к виду

$$I(t) = \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{(2\pi)^{3/2}} \left(\frac{\eta}{t} \left(\frac{1}{\left| \frac{\vec{r}m}{t} - \frac{\vec{k}}{k} \right|} - \theta(t - t_0) \right) + \frac{2\alpha}{\pi} \frac{1}{\left| \vec{r} - \frac{\vec{k}}{m}t \right|} \int_0^{\infty} dx \frac{\sin x}{x} \left(e^{-i \frac{x^2 t}{2m \left| \vec{r} - \frac{\vec{k}}{m}t \right|}} - 1 \right) \right)$$

Интеграл по x может быть выражен посредством гипергеометрических функций [10]:

$$I(t) = \frac{e^{i\vec{k}\vec{r}}}{(2\pi)^{3/2}} \left(\frac{\eta}{t} \left(\frac{1}{\left| \frac{\vec{r}m}{t} - \frac{\vec{k}}{k} \right|} - \theta(t - t_0) \right) - \frac{\alpha}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\left| \vec{r} - \frac{\vec{k}}{m}t \right|} e^{-u} \Psi\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; u\right) \right), \quad (16)$$

где $u = -i \frac{m}{2t} \left| \vec{r} - \frac{\vec{k}}{m}t \right|^2$ и $\Psi(a, c; u)$ есть функция Трикоми. При $|u| \rightarrow \infty$, $-\frac{3}{2}\pi < \arg(u) < \frac{3}{2}\pi$ её асимптотика имеет вид [10]:

$$\Psi\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; u\right) = \sum_{n=0}^N (-1)^n \frac{(1/2)^n}{u^{1/2+n}} + O(|u|^{-1/2-N-1}).$$

откуда непосредственно вытекают соотношения (13)-(15). Более того, из (16), в отличие от тождества Алсхолма, явно видна скорость сходимости интегралов (14)-(15).

Для изучения асимптотического поведения $W_-^{(n)}(t)$ воспользуемся соотношениями (13)-(15) и методом работы [7]. Обозначая интеграл (15) как $f_1(t)$, получим

$$W_-^{(1)}(t) = -i \int_0^t dt_1 (V(-t_1) - U(t_1)) - i \int_0^t dt_1 U(t_1) = f_1(t) - i \int_0^t dt U(t_1) \quad (17)$$

и $f_1(0) = 0$.

Второе слагаемое $W_-^{(2)}(t)$ может быть записано следующим образом

$$W_-^{(2)}(t) = -i \int_0^t dt_1 W_-^{(1)}(t_1) V(-t_1) = i \int_0^t dt_1 f_1(t_1) (V(-t_1) - U(t_1)) - \\ - i \int_0^t dt_1 f_1(t_1) U(t_1) + (-i)^2 \int_0^t dt_1 \left(\int_0^{t_1} dt_2 U(t_2) \right) U(t_1) \quad (18)$$

Выражение (18) может быть преобразовано в

$$W_-^{(2)}(t) = f_2(t) - i f_1(t) \int_0^t dt_1 U(t_1) + (-i)^2 \int_0^t dt_1 U(t_1) \int_0^{t_1} dt_2 U(t_2), \quad (19)$$

где функция $f_2(t)$ равна

$$f_2(t) = -i \int_0^t dt_1 f_1(t_1) (V(-t_1) - U(t_1)) + i \int_0^t dt_1 f_1'(t_1) \int_0^{t_1} dt_2 U(t_2). \quad (20)$$

Эти выражения показывают, что $f_2(0) = 0$ и $f_2(t)$ сходится при $t \rightarrow \infty$ вследствие (13)-(15).

Результаты (17)-(18) могут быть перенесены на случай произвольного $n > 2$:

$$W_-^{(n)}(t) = \sum_{k=0}^n f_k(t) F_{n-k}(t), \quad (21)$$

где $f_0(t) = F_0(t) = 1$, и

$$F_m(t) = (-i)^m \int_0^t dt_1 U(t_1) \int_0^{t_1} dt_2 U(t_2) \dots \int_0^{t_{m-1}} dt_m U(t_m) = \frac{(-i)^m}{m!} \left(\int_0^t dt_1 U(t_1) \right)^m \quad (22)$$

Функции $f_n(t)$ удовлетворяют следующему рекуррентному соотношению

$$f_{n+1}(t) = -i \int_0^t dt_1 \sum_{k=0}^n f_k(t_1) F_{n-k}(t_1) (V(-t_1) - U(t_1)) - \\ - \int_0^t dt_1 \sum_{k=0}^n f_k'(t_1) F_{n+1-k}(t_1), \quad (23)$$

так что $f_k(0) = 0$ для $k \geq 1$, и все $f_k(t)$ сходятся при $t \rightarrow \infty$.

Согласно (17)-(23), имеем

$$W_-(t) = \sum_{m=0}^{\infty} f_m(t) \times \sum_{n=0}^{\infty} F_n(t), \quad (24)$$

или

$$W_-(t) = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(t) e^{-i \int_0^t dt_1 U(t_1)}. \quad (25)$$

Соотношения (6) и (25) показывают, что волновой оператор Ω_+ равен

$$\Omega_+ = \left(\sum_{n=0}^{\infty} f_n(\infty) \right) e^{i\widehat{D}}, \quad (26)$$

где оператор $\widehat{D}$ определяется как $\sum_{\alpha} \hat{\eta}_{\alpha} \ln \frac{2\hat{k}_{\alpha}^2}{\mu_{\alpha}} t_{0\alpha}$.

Результат (26) изначально получен Зорбасом (см. [7]), причем в [7] все $t_{0\alpha}$ равны 1. Важно отметить, что соотношение (26) не зависит от N , и поэтому очень полезно для различных приближений.

Одно из таких приближений получается специальным выбором величин $t_{0\alpha}$, при котором $\frac{2k_\alpha^2}{\mu_\alpha} t_{0\alpha} = 1$. Тогда

$$\Omega_+ |\psi_0\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} f_n(\infty) |\psi_0\rangle. \quad (27)$$

Выделим в каждом $f_n(\infty)$ слагаемые, каждое из которых отвечает взаимодействию в определенной паре α , как это делается, например, при выделении парных амплитуд в интегральных уравнениях резольвентного типа [3,4,11]. Тогда оператор $f_n(\infty)$ окажется представленным в виде

$$f_n(\infty) = \sum_{\alpha} f_{\alpha n}(\infty) + \Delta f_n(\infty) \quad (n \geq 1). \quad (28)$$

Из (28) с учетом соотношения $\omega_{+\alpha} = \sum_n f_{\alpha n}(\infty)$ получим для волнового оператора следующее приближенное выражение

$$\sum_{\alpha} (\omega_{+\alpha} - (N_{\alpha} - 1)\hat{I}), \quad (29)$$

причем N_{α} есть число двухчастичных подсистем изучаемой системы N частиц. Результат (29) представляется очевидным, когда речь идет о системах с короткодействующими потенциалами, однако, как только что было установлено, он справедлив и при наличии кулоновского взаимодействия, хотя и полученный приближенный оператор не является асимптотически эквивалентным оператору Долларда. Приближение (29) является естественным обобщением метода двухчастичных искаженных волн на многочастичные системы с кулоновским взаимодействием.

Другой способ выделения кулоновских сингулярностей в операторе $W_-(t)$ заключается в использовании метода эффективных зарядов Петеркопа [12]. Соответствующее рассмотрение будет проведено в отдельной работе.

Список литературы

1. Тейлор Дж. Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений. – М., Мир, –1975. –565 с.
2. Меркурьев С.П., Фаддеев Л.Д. Квантовая теория рассеяния для систем нескольких частиц. – М., Наука, 1985. –400с.
3. Шмид Э., Цигельман Х. Проблема трех тел в квантовой механике. – М., Наука, 1979. –272 с.
4. Комаров В.В., Попова А.М., Шаблов В.Л. Динамика систем нескольких квантовых частиц. –М., изд-во Московского ун-та, 1996. –335 с.
5. Шаблов В.Л., Виноцкий П.С., Попов Ю.В., О. Чулуунбаатар, Кузаков К.А. Борновский ряд в теории ионизации атома электронным ударом // Физика элементарных частиц и атомного ядра. –2010. –т. 41. –Вып.2. –с. 607-650.
6. Chandler C. The coulomb problem a selective review // Nucl. Phys. A. –1981. –V. 353.–n.1,2.–p. 129-142.
7. Zorbas J. Perturbation theory for three-particle Coulomb scattering // Int. Jour. Theor. Phys. – 1981. –v.20. –n.12. –p.921-955.
8. Михайлов А.В., Шаблов В.Л. Модифицированные борновские ряды в квантовой задаче трех частиц с кулоновским взаимодействием // Научно-технический вестник Поволжья. –2012. –т.5. –с.32-40.
9. Dollard J. Asymptotic convergence and the Coulomb interaction// Jour. Math. Phys.-1964.- v.5.- p. 729-742.
10. Бейтмен Г., Эрдейи А. Высшие трансцендентные функции. т. 1. –М., Наука, 1973. –295 с.
11. Рид М., Саймон Б. Методы современной математической физики. Т.4. Анализ операторов. –М., Мир, 1982. –428 с.
12. Петеркоп Р.К. Теория ионизации атомов электронным ударом. –Рига, Зинатне, 1975. –190с.

01.01.02

В.Ш. Ройтенберг

Ярославский государственный технический университет,
кафедра высшей математики,
Ярославль, vroitenberg@mail.ru

О БИФУРКАЦИЯХ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ СТЫКА ЛИНИЙ РАЗРЫВА ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ

В статье изучаются бифуркации в типичных двухпараметрических семействах кусочно-гладких векторных полей на плоскости в окрестности особой точки на пересечении их линий разрыва. Описана бифуркационная диаграмма. В частности, найдены области параметров, для которых существует устойчивая периодическая траектория.

Ключевые слова: кусочно-гладкие векторные поля на плоскости, линии разрыва, особая точка, бифуркации.

Мы будем рассматривать кусочно-гладкие векторные поля на плоскости в окрестности особой точки O «на стыке» линий разрыва векторных полей. Исследованию устойчивости такой точки посвящено много работ. Ссылки можно найти в [1, с. 192]. В статьях автора [2 – 4] описаны бифуркации негрубых векторных полей, образующих в банаховом пространстве кусочно-гладких векторных полей подмногообразие коразмерности один, при которых особая точка O теряет устойчивость и из нее рождается устойчивая периодическая траектория. В настоящей работе изучаются бифуркации в окрестности точки O при типичных двухпараметрических деформациях кусочно-гладких векторных полей, образующих подмногообразие коразмерности два.

Подмножество $N \subset \mathbf{R}^2$ является C^k -многообразием с углами, если для каждой точки x^0 его границы ∂N существует такая окрестность U и C^k -диффеоморфизм $h: U \rightarrow \mathbf{R}^2$, $h(x^0) = (0, 0)$, что

или $h(U \cap N) = \{(x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2 : x_1 \geq 0\}$ (x^0 – 1-угловая точка),

или $h(U \cap N) = \{(x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2 : x_1 \geq 0, x_2 \geq 0\}$ (x^0 – 2-угловая точка).

Пусть $M \subset \mathbf{R}^2$ – компактное C^{r+1} -многообразие с углами ($r \geq 3$), $D = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ – разбиение M на компактные C^{r+1} -многообразия с углами, пересекающимися между собой только по границам: $M = M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_m$, $M_j \cap M_k = \partial M_j \cap \partial M_k$ при $j \neq k$. Кусочно-гладким векторным полем класса C^r на многообразии M с разбиением D назовем элемент $X = (X^1, X^2, \dots, X^m)$ банахова пространства $X^r(M, D) := X^r(M_1) \oplus \dots \oplus X^r(M_m)$, где $X^r(M_i)$ – банахово пространство векторных полей класса C^r на M_i с C^r -нормой. Его можно отождествить с классом таких векторных полей $\bar{X}: M \rightarrow TM$, что $\bar{X}(x) = X^i(x)$ в точках $x \in \text{int } M_i$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Векторные поля $\bar{X}$, вообще говоря, разрывные в точках $M \setminus \bigcup_{i=1}^m \text{int } M_i$. Траекториями векторного поля X и соответствующих разрывных векторных полей $\bar{X}$ следуя [1, с.95] будем называть траектории дифференциального включения $\dot{x} \in X^*(x)$, $x \in M$, где $X^*(x) = \{X^{(i)}(x)\}$ при $x \in \text{int } M_i$ и $X^*(x)$ – выпуклая оболочка векторов $X^{(i_1)}(x), \dots, X^{(i_s)}(x)$ при $x \in M_{i_1} \cap \dots \cap M_{i_s}$.

Пусть точка $O \in \text{int } M \setminus \bigcup_{i=1}^m \text{int } M_i$. Без ограничения общности можно считать, что элементы разбиения D пронумерованы так, что точка O принадлежит ∂M_i только для $i \in \{1, 2, \dots, n\}$, $n \leq m$. Пусть точка O является 1-угловой для M_1 и 2-угловой для M_i ,

$i \in \{2, \dots, n\}$. Тогда $n \geq 3$. Мы можем считать нумерацию $M_1, M_2, \dots, M_n$ выбранной так, что в C^{r+1} -координатах (x, y) в некоторой окрестности V^* точки O , точка O имеет координаты $(0, 0)$, $M_1 \cap V^*$ задается неравенствами $x^2 + y^2 < 1$, $y \leq 0$, $L_i := \partial M_i \cap \partial M_{i+1} \cap V^*$ при $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ и $L_i := \partial M_1 \cap \partial M_n \cap V^*$ при $i = n$ является образом при C^{r+1} -вложении $\eta_i: [0, 1] \rightarrow M$, $\eta_i(0) = O$, $\eta_i(s) = (s, 0)$, $\eta_n(s) = (-s, 0)$ (рис.1). Тогда $\partial M_1 \cap V^* = L_1 \cup L_n$, для $i \in \{2, \dots, n\}$ $\partial M_i \cap V^* = L_{i-1} \cup L_i$, а упорядоченная пара векторов $(\eta'_{i-1}(0), \eta'_i(0))$ положительно ориентирована.

Рассмотрим семейство векторных полей $X_\varepsilon = (X_\varepsilon^1, \dots, X_\varepsilon^m) \in X^r(M, D)$, зависящих от параметра ε , принадлежащего некоторой окрестности нуля E в двумерном евклидовом пространстве. Будем предполагать, что отображения $M_i \times E \ni (z, \varepsilon) \mapsto X_\varepsilon^i(z)$ принадлежат классу C^r и могут быть продолжены до C^r -отображений на $M \times E$.

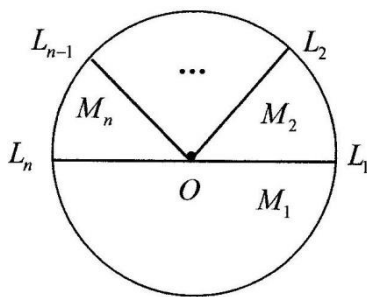


Рис. 1 – Окрестность точки O

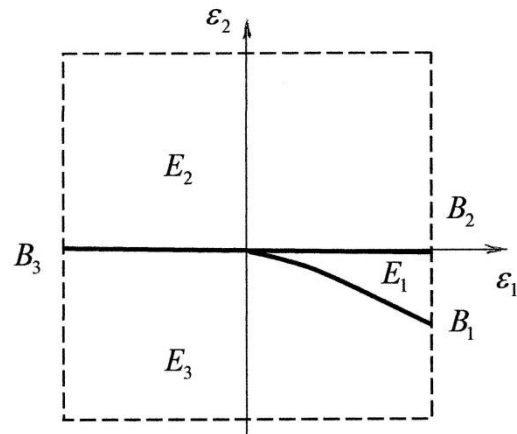


Рис. 2 – Бифуркационная диаграмма

Предположим, что для поля $X_0 = (X_0^1, \dots, X_0^m)$ выполняется условие

(У1) Для любого $i \in \{2, \dots, n\}$ обе пары векторов $(\eta'_{i-1}(0), X_0^i(O))$ и $(\eta'_i(0), X_0^i(O))$ положительно ориентированы.

Из условия (У1) и [5, с. 80–85] вытекает, что число $s_0 > 0$ и окрестность E_0 нуля в E можно выбрать так, что для любого $\varepsilon \in E_0$ определены отображения $\eta_{i-1}(s) \mapsto \eta_i(f_i(s, \varepsilon))$, $s \in [0, s_0]$, по траекториям векторных полей X_ε^i , $i \in \{2, \dots, n\}$, при этом $f_i(\cdot, \cdot)$ – функции класса C^r , $f_i(0, \varepsilon) = 0$, $(f_i)'_s(s, \varepsilon) > 0$. При достаточно малых $s_1 \in (0, s_0)$ и E_0 на $[0, s_1] \times E_0$ определена функция $f(s, \varepsilon) := f_n(\dots f_3(f_2(s, \varepsilon), \varepsilon), \dots, \varepsilon)$. Будем считать, что

(У2) $f'_s(0, 0) = 1$.

В координатах (x, y) $X_\varepsilon^1(x, y) = P_1(x, y, \varepsilon)\partial/\partial x + Q_1(x, y, \varepsilon)\partial/\partial y$, где P_1 и Q_1 – C^r -функции на $\{(x, y): x^2 + y^2 < 1, y \leq 0\} \times E$. Пусть выполняются условия

(У3) $P_1(0, 0, 0) > 0$, $Q_1(0, 0, 0) = 0$, $Q'_{1x}(0, 0, 0) > 0$.

Выбрав окрестность E_0 достаточно малой, из (У3) по теореме о неявной функции получаем, что существует такая C^r -функция $v: E_0 \rightarrow \mathbf{R}$, что $v(0) = 0$, $\forall \varepsilon \in E_0$ $Q_1(v(\varepsilon), 0, \varepsilon) = 0$. Из [1, с. 175–176] следует, что при достаточно малом $\bar{u} > 0$ можно выбрать окрестность E_0 так, что $\forall \varepsilon \in E_0$ $v(\varepsilon) \in (-\bar{u}, \bar{u})$ и определена C^r -функция $g: [-\bar{u}, \bar{u}] \times E_0 \rightarrow \mathbf{R}$,

$$g(v(\varepsilon), \varepsilon) = v(\varepsilon), \quad g'_u(v(\varepsilon), \varepsilon) = -1, \quad g'_u(u, \varepsilon) < 0,$$

такая, что траектория поля X_ε^1 (соответственно, $-X_\varepsilon^1$), начинающаяся в точке с координатами $x = u$, $u \in (-\bar{u}, v(\varepsilon)]$ (соответственно, $u \in [v(\varepsilon), \bar{u})$), $y = 0$, кончается в точке с координатами $x = g(u, \varepsilon)$, $y = 0$. Предположим, что выполняются условия

$$(Y4) \quad a := g''_{uu}(0,0) + f''_{ss}(0,0) < 0$$

и

$$(Y5) \quad \text{векторы } f''_{s\varepsilon}(0,0) \text{ и } v'(0) \text{ линейно независимы.}$$

Нетрудно убедиться, что условия (Y1) – (Y4) задают в $X^r(M, D)$ подмногообразие коразмерности два, а условие (Y5) дает трансверсальность отображения $\varepsilon \mapsto X_\varepsilon$ к этому подмногообразию в точке $\varepsilon = 0$.

В силу (Y5) мы можем выбрать в некоторой окрестности E_* точки $0 \in E_0$ C^r -координаты $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$, $|\varepsilon_1| < \delta_*$, $|\varepsilon_2| < \delta_*$ так, что

$$\forall \varepsilon \in E_* \quad f'_s(0, \varepsilon) = 1 + \varepsilon_1, \quad v(\varepsilon) = \varepsilon_2.$$

Далее будем отождествлять точку $\varepsilon \in E_*$ с ее координатной строкой $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$.

Теорема. Пусть выполняются условия (Y1) – (Y5). Тогда для любой окрестности V_0 точки O существуют такие окрестность $V \subset V_0$ этой точки и число $\delta \in (0, \delta_*)$, что бифуркационная диаграмма семейства $X_\varepsilon|_V$, $\varepsilon \in (-\delta, \delta)^2$, представляет разбиение $(-\delta, \delta)^2$ на множества E_i , $i \in \{1, 2, 3\}$ и B_j , $j \in \{0, 1, 2, 3\}$ (см. рис.2), где

$$E_1 = \{\varepsilon : 0 < \varepsilon_1 < \delta, \gamma(\varepsilon_1) < \varepsilon_2 < 0\},$$

$$\gamma : (0, \delta) \rightarrow (-\delta, 0), \quad \gamma \in C^1, \quad \gamma(+0) = \gamma'(+0) = 0,$$

$$E_2 = (-\delta, \delta) \times (0, \delta), \quad E_3 = (-\delta, 0] \times (-\delta, 0) \cup \{\varepsilon : 0 < \varepsilon_1 < \delta, -\delta < \varepsilon_2 < \gamma(\varepsilon_1)\},$$

$$B_0 = \{0\}, \quad B_1 = \{\varepsilon : 0 < \varepsilon_1 < \delta, \varepsilon_2 = \gamma(\varepsilon_1)\}, \quad B_2 = (0, \delta) \times \{0\}, \quad B_3 = (-\delta, 0) \times \{0\}.$$

Векторные поля $X_\varepsilon|_V$ грубые при $\varepsilon \in E_i$, $i \in \{1, 2, 3\}$ и имеют первую степень негрубости при $\varepsilon \in B_j$, $j \in \{1, 2, 3\}$.

Структура фазовых портретов векторных полей $X_\varepsilon|_V$ изображена на рис. 3 (положительные полутраектории, начинающиеся в точках окрестности V , не выходят из V).

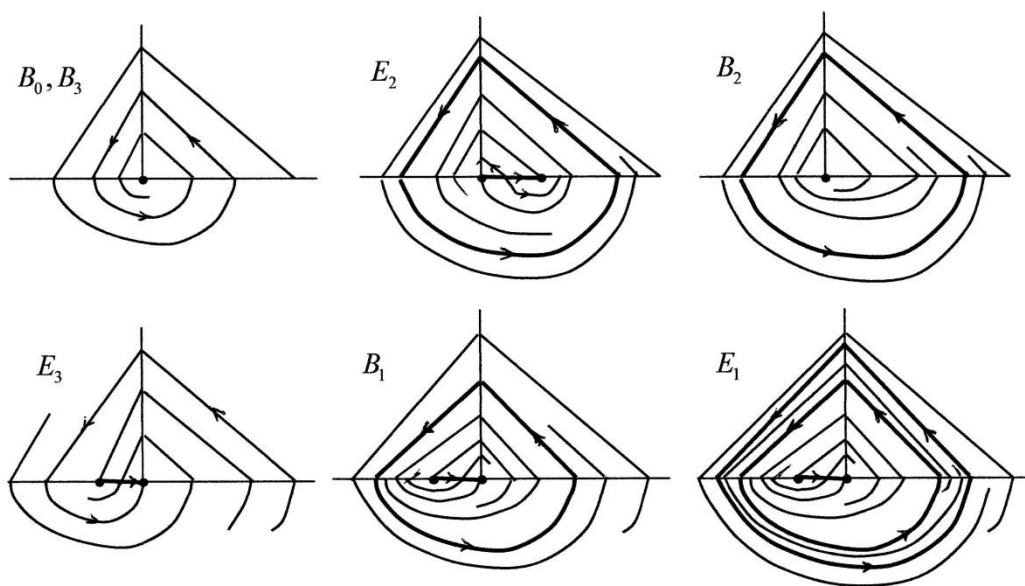


Рис. 3 – Фазовые портреты векторных полей $X_\varepsilon|_V$, $m=3$

Список литературы

1. Филиппов А.Ф. Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985. 224 с.
2. Ройтенберг В.Ш. О рождении периодических траекторий из особой точки кусочно-гладкого векторного поля // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2015, № 7-1. С. 11-16.
3. Ройтенберг В.Ш. О рождении периодической траектории из точки пересечения линий разрыва векторного поля // Вестник Адыгейского государственного ун-та. Серия: Естественно-математические и технические науки. 2016, Вып. 2. С. 34-38.
4. Ройтенберг В.Ш. О рождении периодической траектории из точки стыка линий разрыва кусочно-гладкого векторного поля // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. Сб. трудов XXIX Междунар. науч. конференции. 2016, Т. 3. Саратов: Изд-во СГТУ. С. 14-17.
5. Андронов А.А. и др. Качественная теория динамических систем второго порядка. М.: Наука, 1966. 568 с.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)

02.00.00

Г.Н. Демиденко к.х.н, Д.В. Евдокимова, А.В. Забрусская, А.В. Быков к.х.н.

Тверской государственный технический университет, кафедра Биотехнологии и химии,
Тверь, xt345@mail.ru

**ПЛАТИНА, СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ В ПОЛИМЕРНОЙ МАТРИЦЕ, В
ЖИДКОФАЗНОМ ГИДРИРОВАНИИ АРЕНОВ**

В статье рассмотрены результаты каталитического тестирования жидкофазного гидрирования бензола и анилина на платиновом катализаторе, стабилизированном в стирол-дивинилбензольной матрице. Показана высокая активность и селективность реакции с участием каталитической системы.

Ключевые слова: *жидкофазное гидрирование, полимерстабилизированный катализатор, платина.*

Реакции восстановления ароматического ядра находят широкое применение в современной химической промышленности. Так, продукт восстановления анилина - циклогексиламин - и его производные применяются в синтезе мономеров, ускорителей вулканизации, ингибиторов коррозии металлов, в качестве инсектицидов и используются в синтезах фармацевтических субстанций [1-3]. Продукт восстановления бензола – циклогексан – находит применение в синтезе капролактама и широко используется в качестве растворителя. Для обоих процессов реализованы как газофазный, так и жидкофазный синтезы. И, если процесс гидрирования бензола осложнен изомеризацией продукта в метилциклопентан на оксидных и цеолитных носителях каталитических систем, то в случае восстановления анилина до циклогексиламина образуется значительное количество побочных продуктов: дициклогексиламин, N-фенилциклогексиламин, дифениламин, аммиак, а при высоких температурах - циклогексан и бензол [4], при этом условия синтеза сильно варьируются в зависимости от применяемой каталитической системы [4-7].

Для подавления таких процессов нами предлагается каталитическая система на основе платины, стабилизированной в промышленном стирол-дивинилбензольном полимере марки MN270, а целью исследования является установление возможности и перспективность использования таких систем в указанных реакциях.

1 Методы и методики**1.1 Каталитический эксперимент**

В реактор-автоклав загружали предварительно восстановленный катализатор, взвешенный с точностью до $1 \cdot 10^{-4}$ г. Добавляли расчётное количество субстрата и 40 мл гексана, после чего реактор герметизировали, продували азотом, устанавливали выбранную скорость перемешивания и грели под давлением азота (5 МПа для бензола, 2 МПа для анилина). После достижения температуры реакции атмосферу азота заменяли водородом, устанавливали необходимое давление и проводили реакцию, отбирая в установленное время 8 проб.

1.2 Методика анализа катализата

Анализ катализата проводили с применением метода газовой хроматомасс-спектрометрии на хроматомасс-спектрометре PQ-2010s, оснащённом капиллярной колонкой HP-1MS по следующей температурной программе: 50°C (8 мин) → 260°C (15°C/мин) → 260°C (9 мин). Температуры испарителя и интерфейса хроматограф-масс-спектрометр составляли 200°C. Газ-носитель: гелий. Линейная скорость газа-носителя 1 см/мин. При анализе катализата гидрирования бензола проба дополнительно разбавлялась в соотношении 1:5.

1.3 Методика синтеза катализатора

Каталитическая система 1%Pt/MN270 получена пропиткой порошка полимера MN270 (Purolite Inc.) по влагоемкости водным раствором платиновой кислоты, после чего

катализатор сушили при 70 °С и восстанавливали при 300 °С в токе водорода (100 мл/мин) в течении трех часов.

2 Результаты

В ходе исследования катализата реакции гидрирования бензола, установлено, что бензол количественно превращается в циклогексан, в то время как анилин претерпевает ряд превращений в целевой продукт - циклогексиламин - и побочные продукты: N-фенилциклогексиламин, дициклогексиламин и следовые количества дифениламина.

Для тестирования выбранной каталитической системы в реакции гидрирования бензола до циклогексана варьировали следующие условия: температура от 210 до 260 °С, исходная концентрация бензола 0.03 – 0.54 моль/л, давление водорода 5 МПа; для тестирования в реакции гидрирования анилина до циклогексиламина и дициклогексиламина: 140 – 190 °С, 0.14 – 0.52 моль(анилин)/л, 2 МПа, соответственно.

В ходе исследования реакции гидрирования бензола было установлено, что побочных продуктов, возникающих в результате изомеризации циклогексана в метилциклопентан не образуется, а поскольку платина - эффективный катализатор восстановления двойных углерод-углеродных связей, то восстановление промежуточного продукта – циклогексена - происходило настолько быстро, что анализ катализата методом газовой хроматомасс-спектрометрии его наличия не выявил.

Варьирование температуры реакции показало (табл. 1), что приведенная скорость процесса при 20% конверсии бензола увеличивается при повышении температуры реакции до 230 °С, после чего снижается, что, очевидно, объясняется изменением поведения растворителя вблизи температуры кипения.

Таблица 1 - Зависимость приведенной скорости гидрирования бензола от температуры

Температура, °С	Скорость, моль(бензол)/моль(Pt)·мин
210	10.67
220	18.5
230	37.1
240	25.0
250	13.2
260	3.5

Зависимость приведенной скорости процесса от начальной концентрации бензола при 230 °С имеет максимум при 0.3 моль(бензол)/л и достигает значения 95.6 моль/моль·мин (рис. 1).

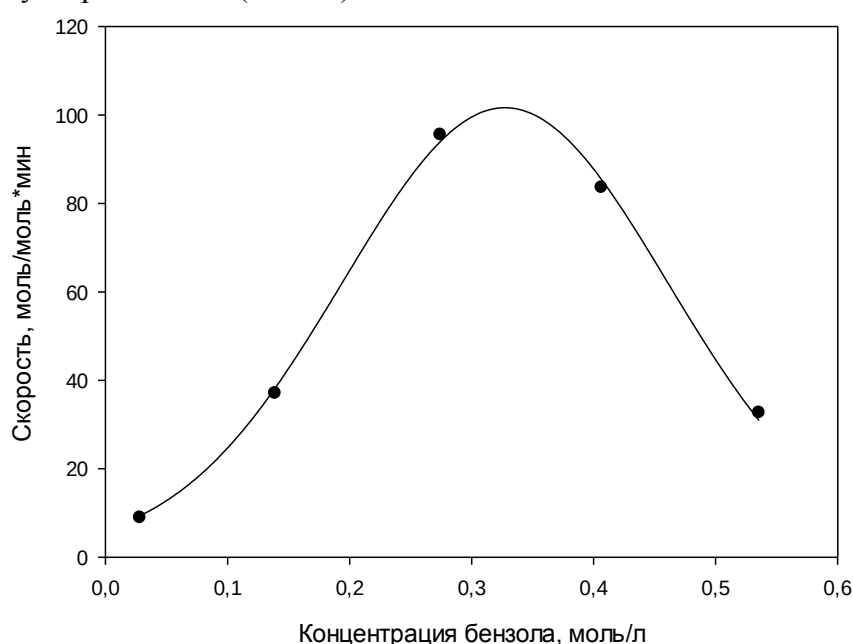


Рис. 1. - Зависимость приведенной скорости гидрирования бензола от концентрации бензола в гексане

Жидкофазное гидрирование бензола без использования растворителя при сохранении остальных условий: 0.1000 г 1%Pt/MN270, 230 °С и 5 МПа позволяет вести процесс с приведенной скоростью 108.9 моль/моль·мин.

Тестирование каталитической системы 1%Pt/MN270 в реакции гидрирования ароматического кольца анилина показало, что с ростом температуры реакции (табл. 2) приведенная скорость процесса увеличивается до 37.1 моль(анилин)/(моль(Pt)·мин) при 170 °С, после чего скорость процесса снижается, в то время как селективность по циклогексиламину непрерывно снижается с ростом температуры.

Увеличение начальной концентрации субстрата также приводит к понижению селективности по циклогексиламину.

Таблица 2 - Зависимость приведенной скорости и селективности по циклогексиламину при различных температурах процесса

Температура, °С	Скорость, моль(анилин)/(моль(Pt)·мин)	Селективность, %
140	9.1	58.9
150	22.0	66.1
160	33.9	45.1
170	37.1	53.5
180	32.9	41.6
190	14.4	41.6

Таким образом, в работе показано, что процессы восстановления ароматического ядра бензола и анилина могут быть эффективно проведены при использовании предложенной каталитической системы 1%Pt/MN270 на базе ароматической стирол-дивинилбензольной матрицы, а предполагаемых процессов разрушения и деградации каталитической системы на основе кинетических данных и исследований в повторных циклах не установлено.

Работа выполнена при финансовой поддержке российского фонда фундаментальных исследований (контракт 16-08-00355).

Список литературы

1. Králik M., Turáková M., Mačák I., Wenchich Š. // J. Chem. Chem. Eng. 6 (2012) 1074-1082
2. Pexidr V., Pašek J., Dvořák B., Soukup M. CS180353 (B3), Nov 30, 1977.
3. Pašek J., Lubojacký J., Pavlas P., Bancir K., Marek, J., Rozínek, R. CS193908 for (B1), Nov 30, 1979.
4. Mačák I., Uhlár J., Štefanko, M. ZoD 08/200/Kr/07/10, č. obj. 6110080609, Jun 10, 2011.
5. Uhlár J., Mačák I., Štefanko, M., Králik, M., Horák, J., Chovanec, Š. WO2012018310 (A1) for Duslo, Sep 2, 2012.
6. Biedermann W., Koller H. US 4,057,513 for BAYER AG, Aug 11, 1977.
7. Toman P., Wenchich Š., Uhlár J. // Chemzi. 2011, 7(13), 128-129.

02.00.10

Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева

Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии,
Тверь, lakina@yandex.ru

ИЗУЧЕНИЕ БИОКАТАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА ГИДРОЛИЗА ТОРФА ВЕРХОВОГО ТИПА

В статье представлены результаты достаточно высокой активности отечественного мультиферментного препарата Целловиридин для гидролиза, предварительно обработанных H_2SO_4 , образцов торфа верхового типа. Показана высокая эффективность делигнифицирующей обработки образцов торфа 90% H_2SO_4 . Актуальность данного биохимического процесса состоит в использовании продуктов гидролиза торфа – моносахаридов как источников получения биоэтанола.

Ключевые слова: целлюлозолигниновое сырье, химический гидролиз, ферментативный гидролиз, D-глюкоза, биоэтанол.

Торф, древесина, отходы сельхозпроизводства, зеленые культуры и коммунально-бытовые твердые отходы рассматриваются в качестве источников получения этанола. ЦЛ-материалы в основном состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. После преобразования целлюлозы в глюкозу, глюкозу легко ферментировать дрожжами до этанола. Биотопливо второго поколения, получаемое из непищевых источников углеводов и целлюлозолигнинового (ЦЛ) сырья, может стать реальной альтернативой нефтяным дистиллятам и природному газу [1-3].

Реакции полного гидролиза полисахаридов древесины можно представить следующим уравнением (условным для пентозанов) представленным на схеме 1:

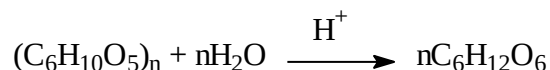


Схема 1 - Реакция полного гидролиза полисахаридов древесины

Перспективной альтернативой химического гидролиза ЦЛ-сырья является биотехнологический способ гидролитической переработки ЦЛ-сырья, который включает применение как микроорганизмов, так и отдельных ферментов [4,5].

В данной работе изучалась эффективность процесса предобработки 20%, 40% и 90% раствором серной кислоты образцов торфа. На последующем этапе биотрансформации образцов торфа и древесных опилок изучалась эффективность отечественного ферментного препарата Целловиридин, представляющий собой концентрат культуральной жидкости штаммов гриба *Trichoderma viride*. Препарат содержит комплекс целлюлолитических ферментов, включающий гемицеллюлазы, ксиланазы, β -глюкозидазы и другие ферменты, способные гидролизовать растительные полисахариды с образованием различных видов олигосахаридов, редуцирующих сахаров, в том числе и глюкозы. Эффективность процесса гидролиза оценивалась по количеству образовавшейся D-глюкозы.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовался верховой торф 30% влажности и 15% степени разложения, торф отбирался с месторождения Васильевский мох, Калининского района, Тверской области. Для предобработки образцов торфа использовалась H_2SO_4 (х.ч., 20%, 40%, 90%). Препарат ферментный Целловиридин Г20х по ТУ 64-13-11-87.

Степень гидролитической эффективности применяемого метода переработки целлюлозолигнинового сырья оценивали методом отбора проб, определяя содержание редуцирующих веществ (РВ) и глюкозы.

Анализ пробы проводили методом жидкофазной хроматографии (анализатор UltiMate 3000) с использованием рефрактометрического детектора.

Проведение химического гидролиза

Для этого 10 г торфа (древесных опилок) в 1.5 л (20%, 40% и 90%) раствора серной кислоты выдерживали 2 часа при $T=160^{\circ}\text{C}$. По окончании выдержки охлаждали, фильтровали, промывали образцы на стеклянном фильтре водой.

Проведение ферментативного гидролиза

В коническую колбу емкостью 500 см³ помещали 10 г ЦЛ-сырья, 200 см³ ацетатного буфера ($\text{pH} = 4.7$), в котором растворен ферментный препарат Целловиридин. Образец ферментировали в течение 24 ч при $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и интенсивном перемешивании. По окончании процесса остаток отфильтровывали под вакуумом, отжимали и высушивали.

Результаты и их обсуждение

Из результатов, представленных в таблице 1 видно, что содержание глюкозы и редуцирующих веществ (РВ) в гидролизате исходного торфа меньше, чем в предобработанных образцах. Данный факт можно объяснить наличием большого содержания лигнина, входящего в состав защитной матрицы торфяных волокон, в которую погружены целлюлозные фибриллы. Однако необходимо отметить, что образец торфа №4, предобработанный 90% H_2SO_4 , содержит наибольшее количество глюкозы, чем остальные образцы ЦЛ-сырья.

Таблица 1- Зависимость выхода глюкозы и редуцирующих веществ от способа предобработки

№ и вид образца	Масса навески, г	Массовая доля лигнина, %	Масса глюкозы в гидролизате, мг/мл	Масса РВ в гидролизате, мг/мл
1. Торф верхового типа	10	40.01	1.6	7.4
2. Торф, 20% H_2SO_4	10	61.50	3.1	6.2
3. Торф, 40% H_2SO_4	10	22.40	8.1	19.7
4. Торф, 90% H_2SO_4	10	14.20	13.0	12.2

Для изучения зависимости выхода глюкозы от массы ферментного препарата Целловиридин образцы №1 и №4 были подвергнуты ферментации с помощью препарата Целловиридин в течение 24 часов, используя метод ВЭЖХ, рассчитывали содержание глюкозы (С, мг/мл). Полученные результаты представлены в виде диаграмм на рис.2.

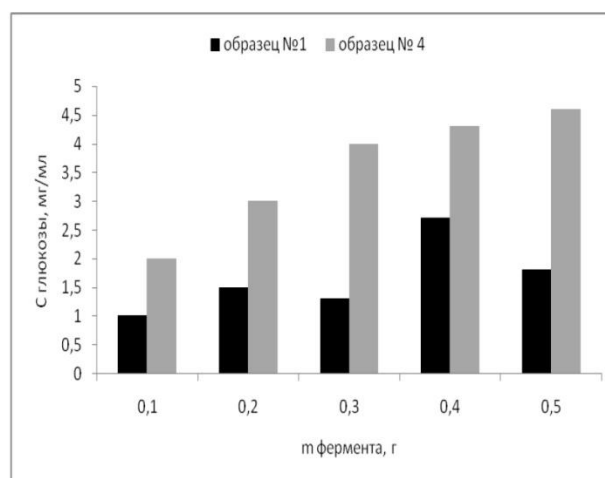


Рис.1. Зависимость выхода глюкозы от массы ферментного препарата Целловиридин

Полученные данные, указывают на то, что увеличение массы ферментного препарата в 5 раз приводит к увеличению концентрации глюкозы в гидролизатах образца №1 и №4. Однако, наибольшая концентрация глюкозы наблюдалась в гидролизате, полученном при обработке 90% H_2SO_4 . Этот факт можно объяснить, что предобработка максимально освобождает ЦЛС от лигнина и максимально разрыхляет волокна, тем самым позволяет получать качественный субстрат для ферментативного гидролиза.

Выводы:

На основании проведенных исследований и полученных данных можно сделать следующие выводы:

- 1) Полученные данные о механизмах трансформации целлюлозолигнинового сырья являются наиболее перспективными для развития методов получения биотоплив;
- 2) Предварительная предобработка ЦЛ-сырья 90% H_2SO_4 при $T=160^{\circ}C$ повышает эффективность ферментативного гидролиза, так как увеличивается степень деструкции целлюлозы и ее доступность для активных центров целлюлолитических ферментов;
- 3) Показана достаточно высокая активность отечественного мультиферментного препарата Целловиридин по отношению к сложному по химическому составу субстрату торф.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ №16-08-00158.

Список литературы

1. Ахметзянов А.М., Гаврилов В.И. и др. // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2009. Т.52. Вып.11. С. 119-122.
2. Губина С.М., Стокозенко В.Г. // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2008. Т.51. Вып.5. С.75-77.
3. Долуда В.Ю., Макеева О.Ю. и др. // Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2013. Т.56. Вып.8. С. 97-101.
4. Громов Н.В., Таран О.П., Сорокина К.Н. и др. // Катализ в промышленности. 2016. Т. 16. № 1. С. 74-83.
5. Синицын А.П., Короткова О.Г., Синицына О.А. и др. // Катализ в промышленности. 2015. Т. 15. №6. С. 78-83.

02.00.04

Ю.В. Луговой к.т.н., К.В. Чалов к.х.н., Э.М. Сульман д.х.н.

Тверской государственный технический университет,
кафедра Биотехнологии и химии,
Тверь, pn-just@yandex.ru

ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ НА ПРОЦЕСС ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА

Представлены результаты исследования газообразных продуктов процесса термохимической переработки торфа в присутствии NaOH, KOH, Ca(OH)₂, NaCl, MgCl₂, AlCl₃. Температура термохимического процесса переработки изменялись в пределах от 550 до 700°C. Концентрация катализатора варьировалась в интервале от 1 до 10% масс. Показано влияние исследуемых соединений на конверсию торфа, состав и теплоценность газообразных продуктов.

Ключевые слова: торф, термохимическая переработка, соединения металлов, газообразные продукты.

Исследование термохимической переработки торфа с получением горючих газов и твердых углеродных сорбентов является актуальным, поскольку процесс протекает достаточно интенсивно в среднетемпературном интервале за счет присутствия кислорода воздуха [1]. Использование катализаторов различного рода [1, 2] может увеличивать теплотворную способность получаемых горючих газов, что в ряде технологических решений может способствовать снижению энергоемкости процесса переработки.

Цель данной работы – исследование влияния соединений различного кислотного-основного характера на протекание процесса термохимической переработки фрезерного торфа с получением горючих газов и углеродных сорбентов.

Экспериментальная часть

Эксперимент проводился на лабораторной установке периодического действия, которая состоит из: реактора со стационарным слоем, выполненного из нержавеющей стали; воздушного насоса; капельной ловушки и фильтра для смол, содержащихся в получаемом газе. Обогрев реактора осуществлялся электрической печью управляемой терморегулятором посредством термопары. Температура термохимического процесса переработки торфа выбрана на основе литературных данных [2, 3] и изменялись в пределах от 550 до 700°C. В качестве сырья для исследования был взят образец фрезерного торфа фракцией от 1 до 2 мм. Зольность и влажность торфа составляла 17,2 и 8,78 % масс. соотв., при степени разложения торфа 30%. Масса навески пробы в эксперименте составляла 3 г, время проведения процесса составляло 15 минут. В качестве окислительного агента использовался атмосферный воздух, который подавался вниз реактора со скоростью от 0,9 до 2,8 л/мин.

Для исследования интенсивности процесса термохимической переработки торфа в присутствии катализаторов были выбраны следующие соединения различного кислотного-основного характера: NaOH, KOH, Ca(OH)₂, NaCl, MgCl₂, AlCl₃. Концентрация катализатора варьировалась в интервале от 1 до 10% масс. Внесение катализатора в состав пробы осуществлялся механическим способом, а также пропиткой водным раствором заданной концентрации.

Теплота сгорания и состав газообразных продуктов термохимического процесса переработки торфа определялись с помощью газовых хроматографов Кристаллюкс 4000 и Газохром 2000.

Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты по термохимической переработки торфа без добавок показали, что максимальное значение горючих газов достигалось при температуре 650 °C и скорости воздушного дутья 2,2 л/мин. Влияние исследуемых в работе веществ на конверсию торфа представлено на рисунке 1.

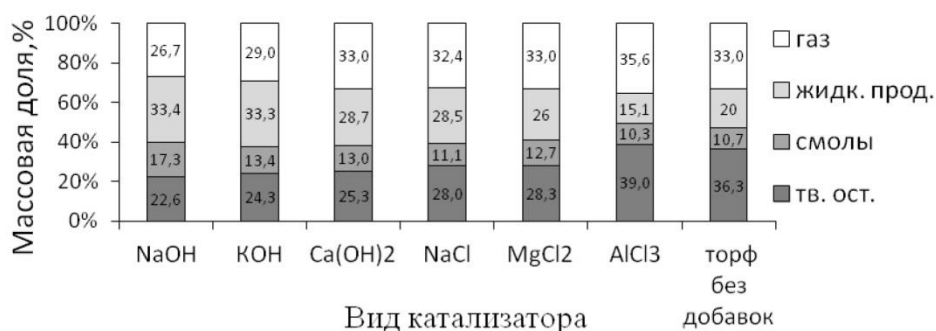


Рисунок 1 – Зависимость массовой доли продуктов от вида катализатора

Как видно из представленных на рисунке 1 данных, при добавлении гидроксидов натрия, калия и кальция происходило снижение массы газообразных и твердых продуктов за счет увеличения массы смол и жидких продуктов, по сравнению с образцом торфа без добавок. В ряду $\text{NaOH} \rightarrow \text{KOH} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ происходило относительное увеличение массы газообразных и твердых продуктов при снижении массы жидких продуктов и смол. В случае добавления к пробе хлоридов натрия и магния следует отметить некоторое увеличение массы жидких продуктов и смол по сравнению с образцом торфа без добавок.

В ряду $\text{NaCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 \rightarrow \text{AlCl}_3$ слева направо происходит увеличение массы газообразных продуктов и снижение массы жидких продуктов и смол по сравнению с использованием гидроксидов металлов. Наибольшее количество газообразных и твердых продуктов, а также минимальное количество смол и жидких продуктов образовывалось при использовании хлорида алюминия, что является положительным аспектом, поскольку наибольшую ценность с практической точки зрения имеют именно эти продукты.

При использовании хлорида алюминия происходило снижение массы жидких продуктов в 1,32 раза по сравнению с опытом без добавок. Скорее всего, в присутствии хлорида алюминия более интенсивно протекают процессы термоокислительной деструкции жидкой фракции с образованием твердых и газообразных продуктов. Так использование хлорида алюминия в качестве добавки приводит к увеличению массы газообразных и твердых продуктов в 1,079 и 1,074 раз соответственно.

Исследование влияния на конверсию торфа концентрации и способа внесения хлорида алюминия представлено на рисунке 2.

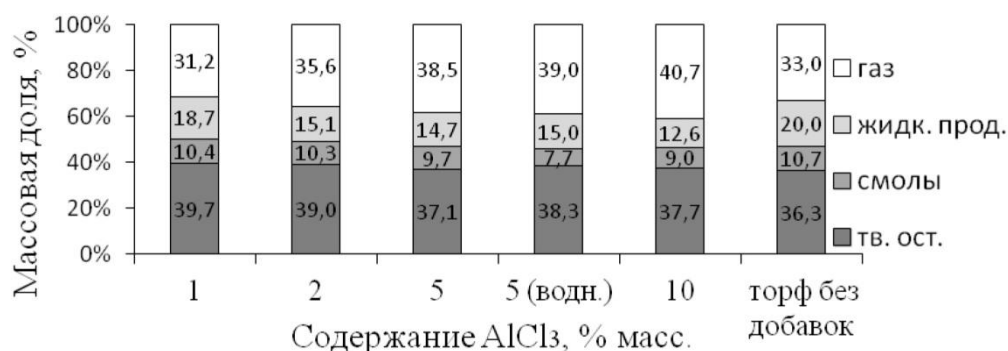


Рисунок 2 – Влияние концентрации хлорида алюминия в пробе на массовую долю продуктов

Использование хлорида алюминия в качестве добавки к торфу приводило не только к увеличению массы газообразных продуктов термохимической переработки, но и изменению состава газа и, следовательно, теплотворной способности получаемых газообразных продуктов (см. рисунок 3).

При внесении в состав торфа хлорида алюминия происходило увеличение концентрации углеводородов $\text{C}_1\text{-C}_3$, а также водорода в составе газообразных продуктов. Использование хлорида алюминия также приводит к увеличению концентрации диоксида углерода, что вероятно связано с более глубоким и интенсивным распадом кислородсодержащих функциональных групп, входящих в состав торфяного сырья.

Увеличение концентрации вышеупомянутых компонентов в целом приводит к снижению содержания азота, подающегося в реактор при воздушном дутье.

Как видно из данных представленных на рисунке 3, способ внесения хлорида алюминия в образец пробы оказывал существенно влияние на теплоту сгорания газообразных продуктов. Следует отметить, что при водной пропитке образца торфа раствором хлорида алюминия полученные после экспериментов газообразные продукты содержали большее количество горючих компонентов и, следовательно, обладали большей теплоценностью.

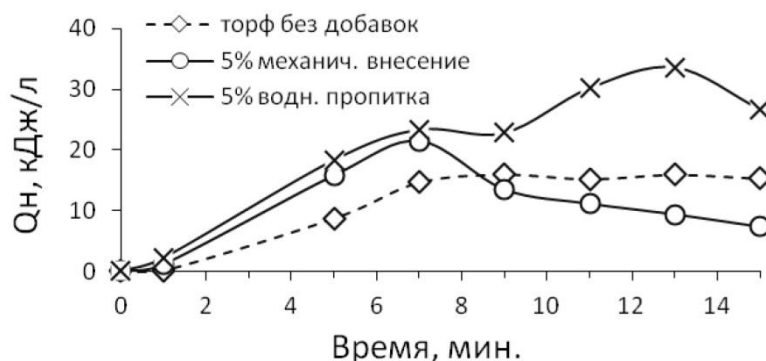


Рисунок 3 – Кинетика теплоценности газообразных продуктов для опытов с различным способом внесения хлорида алюминия и образцом торфа без добавок

Данный факт, возможно, связан с тем, что при водной пропитке образца торфа происходит гидролиз хлорида алюминия с образованием соляной кислоты, способствующей распаду компонентов торфа.

Поэтому в процессе могут участвовать не только апротонные кислотные центры хлорида алюминия, но и кислотные центры Бренстеда, что, скорее всего, приводит к увеличению интенсивности протекания процесса термоокислительной деструкции. Незначительная потеря активности хлорида алюминия с течением времени связана с возгонкой хлорида алюминия при температуре выше 183 °С и его выносом из зоны реакции. Использование водной пропитки торфа раствором катализатора экономически не целесообразно за счет высокой энергоемкости стадии сушки от внесенной с раствором влаги, поэтому внесение порошкового хлорида алюминия является более рациональным способом.

Работа была выполнена в рамках проектов RFMEFI57414X0075 и 15-08-01752 (РФФИ).

Список литературы

- 1 *Dickerson Th., Soria J. Catalytic Fast Pyrolysis: A Review, Energies 2013, 6, 514-538.*
- 2 *Williams P. T., Nugrand N. Biomass for Energy and Industry. 10th European Conference and Exhibition, Germany, 8-11 June, 2011; p 1589.*
- 3 *Раковский В.Е., Пигулевская Л.В. Химия и генезис торфа / В.Е. Раковский, Л.В. Пигулевская — М.: Недра, 1978 — 230 с.;*

02.00.05

Н.Н. Маркузина

Военный институт (Железнодорожных войск и военных сообщений),
кафедра общенаучных дисциплин,
Санкт-Петербург, nnn_vty@mail.ru

ЭЛЕКТРОДНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОКОНТАКТНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОНОПРОВОДЯЩИЙ ПОЛИМЕР ПОЛИ(3-ОКТИЛТИОФЕН)

Разработаны калийселективные и барийселективные твердоконтактные электрохимические сенсоры на основе поли(3-октилтиофена) в качестве ионоэлектронного трансдьюсера. Исследованы основные характеристики твердоконтактных электрохимических сенсоров: пределы выполнения электродной функции, селективность, стабильность электродного потенциала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электронопроводящий полимер поли(3-октилтиофен) можно успешно применять для стабилизации потенциала твердоконтактных электрохимических сенсоров.

Ключевые слова: *твердоконтактные электрохимические сенсоры, электронопроводящие полимеры, электродная функция, селективность, стабильность электродного потенциала.*

В последнее время для потенциометрического анализа состава водных растворов применяют твердоконтактные электрохимические сенсоры (ТЭС). Такие сенсоры обладают рядом преимуществ по сравнению с сенсорами классического типа, поскольку отсутствие внутреннего раствора упрощает транспортировку ТЭС и делает возможным их использование в различных условиях, в том числе и полевых. Однако твердоконтактные сенсоры имеют существенный недостаток - нестабильность электродного потенциала во времени, в связи с чем возникает необходимость в проведении калибровки таких сенсоров перед каждым измерением. В последнее время для стабилизации электродного потенциала ТЭС на границе мембрана/токоотвод применяют различные растворимые электронопроводящие полимеры (ЭП). Такие полимеры использовались в составе ТЭС, селективных к ионам некоторых металлов [1]-[3]. Электронная проводимость ЭП обусловлена подвижностью делокализованных π -электронов в сопряженной структуре электронопроводящего полимера.

В данной работе был исследован электронопроводящий полимер поли(3-октилтиофен) (РОТ). Недопированный РОТ растворим в большинстве органических растворителей. В недопированной форме поли(3-октилтиофен) является полупроводником р-типа и дает неселективный катионный отклик к ионам некоторых щелочных и щелочноземельных металлов [4]. В качестве твердоконтактных сенсоров были изучены калийселективные и барийселективные электроды.

Экспериментальная часть

Калийселективная мембранная композиция имела следующий состав: электродноактивное вещество - валиномицин ($2,5 \cdot 10^{-3}$ моль/кг), обменник - тетрапарахлорфенилборат калия (10^{-3} моль/кг), пластификатор - диоктилфталат (ДОФ), матрица - поливинилхлорид (ПВХ). Соотношение ПВХ к ДОФ было равно 1:3. Данные компоненты мембраны были растворены в тетрагидрофуране (ТГФ).

Состав барийселективной мембранной композиции: электродноактивное вещество - комплекс Ва-НПАВ-(ТФБ)₂ (0,05 моль/кг), где в качестве НПАВ использовался нонилфенол с 20 оксиэтильными фрагментами, пластификатор - орто-нитрофенилоктиловый эфир (о-НФОЭ), матрицей мембраны служил поливинилхлорид. Соотношение ПВХ и пластификатора было 1:3. Данные компоненты мембраны также были растворены в ТГФ.

Мембранная композиция переходного слоя содержала калийселективную или барийселективную мембранную композицию с добавкой электронопроводящего полимера

поли(3-октилтиофена) в количестве 1% (масс.) по отношению к соответствующей мембранной композиции.

Твердоконтактный сенсор представлял собой следующую конструкцию [5]. На графитовый стержень наносили подложку из электропроводящего композита (ЭК) состава: ПВХ : технический углерод (сажа) : пластификатор в соотношении 1:1:0,5. Далее последовательно наносили ионоселективную двухслойную мембрану. Внутренний слой, контактирующий с подложкой, получали нанесением 200 мкл композиции переходного слоя. Внешний слой, контактирующий с раствором, состоял из мембранной композиции без поли(3-октилтиофена), и наносился поверх внутреннего слоя после его высыхания. Толщины слоев были одинаковы и составляли около 200 мкм. Изготовленные таким образом ТЭС замачивали и хранили в растворе соответствующих хлоридов концентрации 0,01 моль/л.

Электродные свойства твердоконтактных сенсоров изучали путем измерения электродвижущей силы (ЭДС) гальванических элементов с переносом, при этом для получения сравнительных результатов параллельно проводились измерения для соответствующих сенсоров с внутренним жидкостным заполнением.

Результаты и обсуждение

В данной работе были изучены важнейшие характеристики твердоконтактных электрохимических сенсоров: электродная функция, селективность в присутствии мешающих катионов-конкурентов, стабильность электродного потенциала.

Прежде всего, в работе были исследованы электродные функции (K^+ - и Ba^{2+} -функции) твердоконтактных электрохимических сенсоров в чистых растворах соответствующих солей (KCl и $BaCl_2$). Для K^+ -ТЭС диапазон K^+ -функции составил 10^{-1} - 10^{-5} моль/л, угловой коэффициент 57 мВ/рК, для Ba^{2+} -ТЭС диапазон Ba^{2+} -функции составил 10^{-1} - 10^{-5} моль/л, угловой коэффициент 28 мВ/рBa. Аналогичные результаты были получены и для соответствующих сенсоров с внутренним жидкостным заполнением. Необходимо отметить, что K^+ -функция и Ba^{2+} -функция ТЭС сохранялась в течение всего периода наблюдения, который соответствовал трем месяцам.

В данной работе была изучена селективность соответствующих твердоконтактных электрохимических сенсоров к калию и барию в присутствии мешающих катионов-конкурентов. Исследование проводили методом бионных потенциалов в 0,1 моль/л растворах соответствующих хлоридов. Коэффициенты селективности рассчитывали по уравнению Никольского. Коэффициенты селективности калий-ТЭС ($lg_{K/Me}$) приведены в таблице 1. Коэффициенты селективности барий-ТЭС ($lg_{Ba/Me}$) приведены в таблице 2.

Таблица 1- Селективность ($lg_{K/Me}$) K^+ -ТЭС

время (сутки)	$lg_{K/Me}$ для следующих Me^{Z+}				
	Na^+	NH_4^+	H^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
K^+ -сенсор с внутренним жидкостным заполнением					
	-3,81	-1,93	-4,52	-4,10	-5,14
K^+ -твердоконтактный сенсор					
1	-4,02	-1,71	-3,61	-4,02	-4,85
10	-3,83	-1,66	-3,35	-3,82	-4,53
21	-3,31	-1,51	-2,99	-2,85	-3,52
35	-3,30	-1,50	-2,73	-2,79	-3,49
89	-3,29	-1,49	-1,65	-2,67	-3,36

Таблица 2- Селективность ($\lg_{Ba/Me}$) Ba^{2+} -ТЭС

время сутки	$\lg_{Ba/Me}$ для следующих Me^{Z+}				
	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Sr^{2+}
Ba^{2+} -сенсор с внутренним жидкостным заполнением					
	-0,24	-0,06	-2,26	-2,08	-1,69
Ba^{2+} -твердоконтактный сенсор					
1	-0,25	-0,06	-2,29	-2,15	-1,71
10	-0,21	-0,01	-2,27	-2,07	-1,66
21	-0,14	0,09	-2,19	-1,99	-1,60
35	-0,05	0,16	-2,11	-1,88	-1,49
89	0,12	0,23	-1,98	-1,58	-1,28

Из представленных результатов видно, что твердоконтактные электрохимические сенсоры по своей селективности не уступали соответствующим сенсорам с внутренним жидкостным заполнением. Однако следует отметить, что с течением времени селективность K^+ -ТЭС и Ba^{2+} -ТЭС к соответствующим ионам уменьшалась. Возможно, наблюдаемое падение селективности связано с диффузией электродноактивных веществ из внешнего слоя мембраны в подложку, содержащую пластификатор. Аналогичные результаты были получены нами ранее для литийселективных сенсоров на основе другого электропроводящего полимера - полианилина [5].

Кроме того, в работе была исследована стабильность электродных потенциалов ТЭС в растворах соответствующих хлоридов концентрации 0,01 моль/л. Полученные данные свидетельствовали о том, что как для калийселективных ТЭС, так и для барийселективных ТЭС в течение первых трех недель наблюдалось значительное уменьшение электродного потенциала (6 мВ/сут). По истечении этого срока потенциал относительно стабилизировался: дрейф потенциала составил 1 мВ/сут в течение всего времени наблюдения (3 месяца).

Таким образом, на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод, что разработанные калийселективные и барийселективные твердоконтактные сенсоры на основе поли(3-октилтиофена) по своим основным характеристикам (пределу выполнения электродной функции, селективности, стабильности электродного потенциала) практически не отличаются от соответствующих сенсоров с внутренним жидкостным заполнением. Следовательно, поли(3-октилтиофен) можно успешно применять для стабилизации потенциала твердоконтактных электрохимических сенсоров.

Список литературы

1. Ari Ivaska. Analytical Applications of Conducting Polymers // Electroanalysis. 1991. V. 3. P. 247-254.
2. Johan Bobacka, Tom Lindfors, Mary McCarrick, Ari Ivaska, Andrzej Levenstam. Single-Piece All-Solid-State Ion-Selective Electrode // Analytical Chemistry. 1995. V. 67, №. 20. P. 3819-3824.
3. Tom Lindfors, Pia Sjoberg, Johan Bobacka, Andrzej Levenstam, Ari Ivaska. Characterization of a single-piece all-solid-state lithium-selective electrode based on soluble conducting polyaniline // Analytica Chimica Acta. 1999. V. 385. P. 163-173.
4. Johan Bobacka, Mary McCarrick, Andrzej Levenstam, Ari Ivaska. All solid-state Poly(vinylchloride) Membrane Ion-selective Electrodes With Poly(3-octylthiophene) Solid Internal Contact // Analyst. 1994. V. 119. P. 1985-1991.
5. Маркузина Н.Н., Дмитриева И.В. Литийселективные твердоконтактные электроды на основе электропроводящего полимера полианилина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. №9. С.49-53.

02.00.00

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

Тверской государственный технический университет, кафедра Биотехнологии и химии,
Тверь, BykovAV@yandex.ru

ПРИРОДА АКТИВНОЙ ФАЗЫ ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЖИДКОФАЗНОГО СИНТЕЗА N-МЕТИЛАНИЛИНА

В статье рассмотрены результаты физико-химического исследования рутениевой полимерстабилизированной каталитической системы восстановительного N-алкилирования анилина формальденидом в присутствии водорода. Методами ИК-спектроскопии, рентгенофотозлектронной спектроскопии и термогравиметрии определена стабильность полимерной матрицы и состав активной фазы катализатора.

Ключевые слова: *восстановительное N-алкилирование, полимерстабилизированный катализатор, активная фаза.*

Введение

Одним из базовых типов химических реакций построения углеродного скелета органической молекулы являются реакции N-алкилирования. Алкилирующими агентами таких реакций выступают галогенпроизводные, непредельные соединения, спирты, простые и сложные эфиры, альдегиды, а на основе самих реакций получают лекарственные субстанции, синтоны тонкого органического синтеза, функциональные добавки к полимерам, маслам и высокооктановые добавки к топливу [1].

Целью настоящей работы является исследование стабильности рутений содержащей каталитической системы на основе промышленного стирол-дивинилбензольного сорбента марки MN100, используемой в реакции восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом в присутствии водорода [2].

1 Методы и методики

1.1 Термогравиметрия

Термогравиметрический анализ порошка MN100 проведен с использованием термовесов TG 209 F1 Iris (Netzsch GmbH, Германия) по температурной программе 30 °C(10 мин)→10 °C/мин(600 °C) в среде аргона, как инертной среде.

1.2 Инфракрасная спектроскопия диффузного отражения

Порошок катализатора помещался в стальную открытую кювету приставки диффузного отражения DRS-8000 инфракрасного спектрометра с Фурье преобразованием IR-Prestige-21 (Shimadzu, Япония). Регистрация спектров проводилась в диапазоне 5000-300 см⁻¹.

1.3 Рентгенофотозлектронная спектроскопия

Фотозлектронные спектры были получены с предварительно дегазированных в вакууме образцов с помощью модернизированного электронного спектрометра ЭС-2403 СКБ АП РАН, оснащенный анализатором энергии PHOIBOS 100-5MCD (производство SpecsGmbH, Германия) и рентгеновским источником MgKα/AlKα XR-50 (производство SpecsGmbH, Германия).

Для фотозлектронного возбуждения использовалось характеристическое излучение MgKα мощностью 250 Вт. Спектры записаны при давлении не выше 3·10⁻⁶ Па. Обзорные спектры были получены в диапазоне 1100-0 эВ с шагом по энергии 0.5 эВ и выдержкой в точке 0.4 с. Спектры высокого разрешения получены с шагом по энергии 0.05 эВ; энергия пропускания анализатора составляла 7 эВ. Для анализа спектров был применен программный пакет CasaXPS.

1.4 Методика восстановления катализатора

Порошок катализатора восстанавливался при температуре 300 °C в токе водорода 100 мл/мин, после чего остывал в токе водорода и продувался азотом.

2 Результаты

Синтез каталитической системы Ru/MN100 выполнен согласно [2], и на основе предыдущих исследований [2, 3] установлено, что процесс восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом активной протекает в том случае, если каталитическая система подвергается предварительному восстановлению водородом в газовой фазе. Однако, известно, что температурная стабильность полимеров, в том числе, трехмерных полимерных сеток, ограничена и часто является причиной ухудшения эксплуатационных качеств каталитических систем, базирующихся на полимерных носителях. В связи с этим были проведены термогравиметрические исследования полимерной матрицы-носителя (промышленный сорбент MN100). При этом установлено, нагрев полимера от 30 до 300 °С сопровождается потерей массы менее 1.5%, что связано с десорбцией воды и абсорбированных газов. Деструкция полимерной матрицы начинается при температуре выше 350 °С с максимумом скорости деструкции 14 %/мин при 450 °С. Таким образом, можно заключить, что в ходе восстановления каталитической системы в токе водорода при 300 °С полимерная матрица не претерпевает существенных изменений вследствие воздействия высоких температур.

В случае газофазного восстановления водородом возможно не только повреждение полимера вследствие разрыва цепей, но и гидрирование кратных связей и ароматических колец в его составе, если формируется каталитическая фаза гидрирования. Для исследования такого процесса были проведены исследования полимера и восстановленного катализатора методом инфракрасной спектроскопии диффузного отражения. ИК-спектры исходного полимера и восстановленного катализатора представлены на рисунке 1. Как следует из анализа интенсивностей полос в диапазоне волновых чисел 3100-2900 см⁻¹, взаимное отношение интенсивностей полос 3018, 3045 и 3084 см⁻¹, относящихся к валентным С-Н колебаниям бензольных колец, к интенсивностям 2924 и 2855 см⁻¹, относящихся к валентным С-Н колебаниям в алкановой цепочке полимера не изменилось, в связи с чем можно заключить, что в ходе газофазного восстановления каталитической системы водородом не произошло сколь-нибудь существенного гидрирования бензольных колец полимерной матрицы.

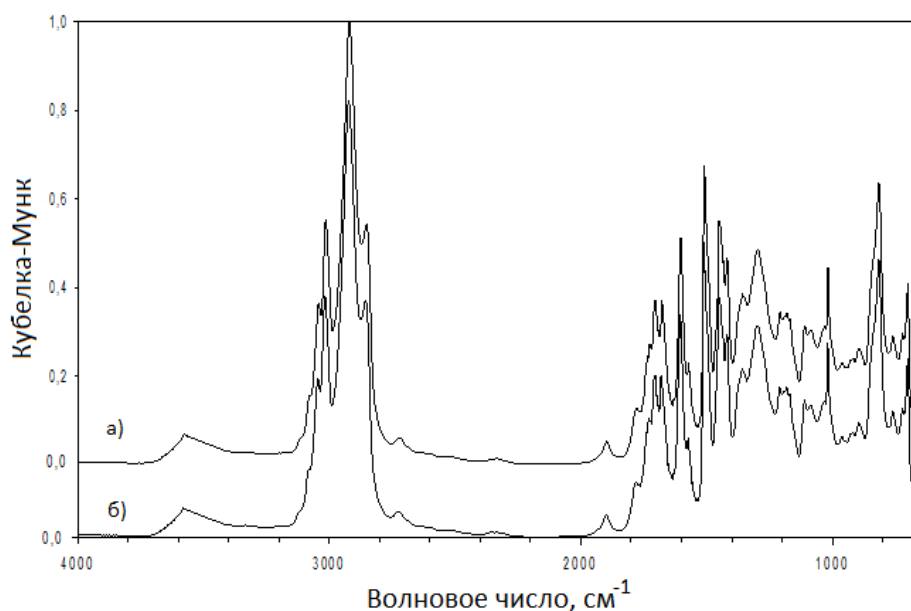


Рис. 1. – Нормализованный ИК-спектр диффузного отражения исходного полимера (а) и восстановленного катализатора (б)

Для определения изменений в составе поверхности каталитической системы и идентификации поверхностной фазы, в состав которой входит рутений, был проведен анализ методом рентгенофотоэлектронной спектроскопии восстановленной каталитической системы и системы после реакции.

Фотоэлектронные спектры полос Ru 3d и C 1s исследованных систем представлены на рисунке 2. Элементный состав поверхности представлен в таблице 1.

Как следует из данных таблицы, на поверхности катализаторов обнаружены: углерод, азот, кислород, хлор и рутений. После проведения каталитического цикла на поверхности катализатора возрастает содержание азота и кислорода, что соответствует адсорбции продукта, этанола и воды на поверхности катализатора связанное с адсорбцией продуктов полимерной матрицей.

Таблица 1 – Состав поверхности каталитических систем

Восстановленная каталитическая система	Ru	C	O	N	Cl
До реакции	3.3	84.1	10.8	1.1	0.7
После реакции	2.7	77.8	16.2	2.5	0.7

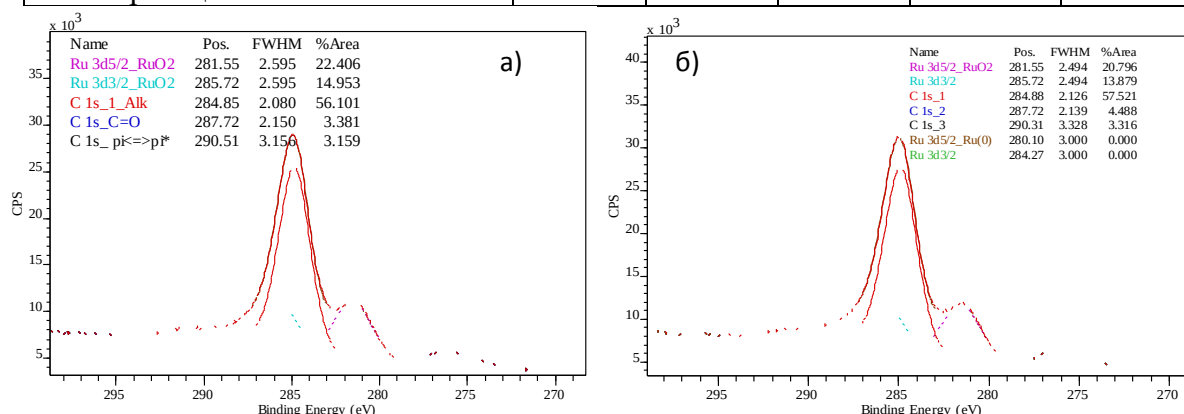


Рис. 2. – Фотоэлектронный спектр высокого разрешения полос Ru 3d и C 1s исходного восстановленного катализатора (а) и катализатора после реакции (б)

Для установления природы активной фазы катализатора, формирующейся в ходе газофазного восстановления водородом при 300 °С из основного хлорида рутения (IV), и её превращений в ходе реакции был проведен анализ спектров высокого разрешения фотоэлектронных полос C 1s и Ru 3d. Для обеих систем было идентифицировано единственное химическое состояние рутения с энергией связи компоненты Ru 3d_{5/2}, равной 381.5±0.1 эВ, которое может быть отнесено к RuO₂ [4].

На основании приведенных данных можно заключить, что полимерная матрица в ходе восстановления при 300 °С в токе водорода остается стабильной. В ходе синтеза и восстановления каталитической системы из основного хлорида рутения (IV) формируется активная фаза в виде оксида рутения (IV), и, поскольку альтернативных фаз рутения на поверхности каталитической системы не обнаружено, катализатором реакции восстановительного N-алкилирования является RuO₂.

Работа выполнена при финансовой поддержке российского фонда фундаментальных исследований (контракт **15-08-01678**).

Список литературы

1. Barthlow, M. Pharmacy Times / M. Barthlow // Pharm. – 2011. – 429 p.
2. Быков А.В., Степанова Г.В., Атласкина Т.В. N-Алкилирование анилина формальдегидом с использованием металлов платиновой группы, стабилизированных в сверхсшитом полистироле// Успехи в химии и химической технологии. – 2015. – Том 29. С. 124-126.
3. Быков А.В., Демиденко Г.Н., Самойлова (Степанова) Г.В. Полимерстабилизированный рутениевый катализатор восстановительного N-алкилирования ароматических аминов // Символ науки. – 2015. – С. 54-55.
4. NIST X-ray Photoelectron Spectroscopy Database, Version 4.1 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, 2012); <http://srdata.nist.gov/xps/>

02.00.15

К.В. Чалов к.х.н., Ю.В. Луговой к.т.н., Ю.Ю. Косивцов д.т.н., Э.М. Сульман д.х.н.Тверской государственный технический университет, кафедра биотехнологии и химии,
Тверь, tschalov_k@mail.ru**ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПРИСУТСТВИИ ХЛОРИДА КОБАЛЬТА**

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического пиролиза нефтесодержащих отходов в присутствии хлорида кобальта. Представлены результаты термогравиметрического анализа процесса. Определена оптимальная концентрация катализатора.

Ключевые слова: *каталитический пиролиз, нефтесодержащие отходы, хлориды металлов, газообразные углеводороды.*

Нефтесодержащие отходы (нефтешламы) являются крупнотоннажными, образование которых происходит на всех этапах добычи, переработки и транспортировки нефти, что говорит о распространенности и актуальности проблемы, требующей наискорейшего решения [1].

По данным BP Statistical Review of World Energy 2015 мировой объем добычи нефти увеличивается с каждым годом и к настоящему времени составляет порядка 4200 млн. тонн в год. При этом доля нефтесодержащих отходов образующихся при добыче и переработке может достигать 7-8% от общего объема добытой нефти. Существенные загрязнения окружающей среды происходят в результате разливов нефти, сброса сточных вод, сжигания или захоронения нефтяных отходов. Ежегодно десятки тысяч тонн нефтяных отходов складываются в шламонакопителях, что является свидетельством нерационального и неэффективного использования ископаемых топлив [2].

Нефтешламы главным образом состоят, из нефтепродуктов, воды и минеральных составляющих (песок, глина, окислы металлов и т. д.), что обуславливает их переменный состав и усложняет их утилизацию. Выбор метода переработки и обезвреживания нефтяных шламов в основном зависит от количества и природы содержащихся в шламе нефтепродуктов. Разработка экологически чистой технологии утилизации нефтешламов является актуальной практической задачей современности. [2,3].

Методы переработки с получением газообразных и жидких топлив посредством термической переработки являются более выгодным с экономической точки зрения. В процессе пиролиза нефтешламов возможно получать углеводороды, используемые как топливо или сырье для химической промышленности. По сравнению с другими методами термической переработки каталитический пиролиз имеет ряд преимуществ: относительно невысокие температуры проведения процесса (400 - 650 °C), низкую чувствительность к составу сырья и замкнутый цикл процесса переработки [4].

Экспериментальная часть

В настоящей работе исследован процесс каталитического пиролиза нефтесодержащих отходов с использованием хлорида кобальта. Модельный нефтешлам изготавливался из кварцевого песка (фракция 0,1-0,4мм) и нефти Каспийского месторождения в различных массовых соотношениях. Хлорид кобальта был взят в виде кристаллогидрата $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Процесс проводилось в реакторе со стационарным слоем в инертной среде в интервале температур 450 - 650 °C. Содержанием катализатора в нефтешламе варьировалось от 1 до 10 % (масс.) по отношению к массе нефтяной фракции. В ходе экспериментов определялись массы твердых, жидких и газообразных продуктов. Содержание газообразных компонентов (углеводороды $\text{C}_1\text{-C}_4$, CO , CO_2 и H_2) а также теплота сгорания пиролизного газа определялись на газовых хроматографах (Кристаллюкс 4000М, ГАЗОХРОМ 2000).

Для образцов нефтесодержащих отходов с массовым содержанием нефтяной фракции 20% без катализатора и с добавлением CoCl_2 5% (масс.) был проведен анализ на темровесах

TG 209 F1 (NETZSCH) со скоростью нагрева 10K/мин. Анализ проводился в токе аргона со скоростью 20 мл/мин.

Результаты и обсуждение

Предварительные исследования показали, что наибольшую эффективность среди катализаторов на основе хлоридов металлов в процессе пиролиза нефтешламов проявлял хлорид кобальта. При использовании хлорида кобальта наблюдалась наибольшая степень конверсии в жидкие и газообразные продукты. В работе изучено влияние концентрации данного катализатора в нефтешламе на массовое распределение продуктов пиролиза и найдено его оптимальное содержание в пробе. Результаты влияния концентрации катализатора на конверсию нефтешлама представлены на рисунке 1.

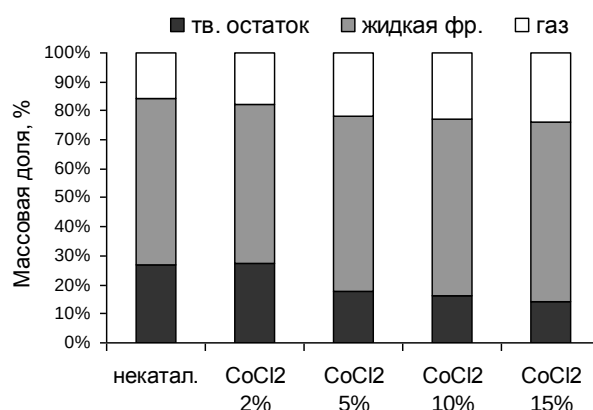


Рис. 1 Влияние содержание катализатора (% масс. от массы нефтяной фракции) на массовое распределение продуктов пиролиза нефтешламов при $T=500^\circ\text{C}$, содержании нефтяной фракции 20% масс.

При добавлении 2% хлорида кобальта не наблюдалось увеличения конверсии в жидкие и газообразные продукты. Внесение 5% CoCl_2 увеличивало долю жидких и газообразных продуктов на 15% по сравнению с некаталитическим процессом. В случае повышения содержания CoCl_2 в пробе с 5 % до 15% наблюдается незначительное уменьшения массы твердого остатка, и, следовательно, увеличение доли жидких продуктов, которое объясняется потерей кристаллизационной воды кристаллогидратом.

Зависимость объемов газообразных продуктов пиролиза от концентрации хлорида кобальта представлена на рис. 2. Как видно из представленных данных, значительный рост объемов углеводородной составляющей наблюдался при концентрации хлорида кобальта свыше 5% (масс.), а рост объема водорода происходит при добавлении 2% (масс.) хлорида кобальта. Содержание в пиролизном газе оксида углерода (II) и оксида углерода (IV) во всех опытах не превышало 2% от объема газообразных продуктов, что связано с низким содержанием кислорода в исходном нефтешламе.

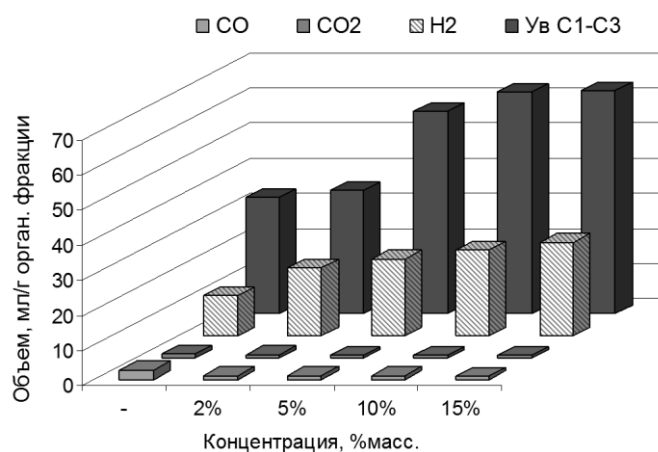
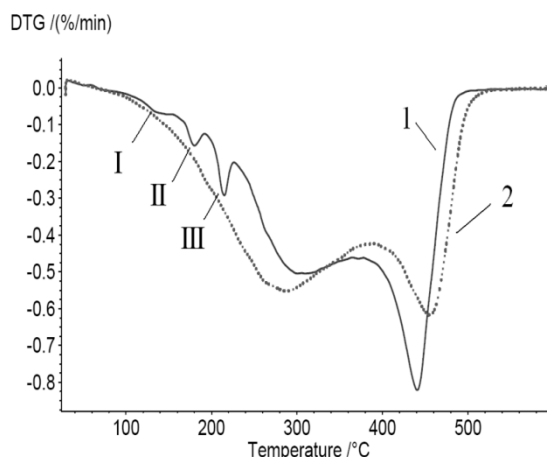


Рисунок 2 Зависимость объемов газообразных продуктов пиролиза от концентрации хлорида кобальта при температуре 500°C .

Исходя из представленных данных, можно сделать вывод о том, что оптимальным содержанием катализатора является 5% (масс.) из расчета на массу нефтяной фракции.

Методом термогравиметрического анализа (ТГА) исследовалось влияние хлорида кобальта на термостойкость нефтешлама (рис. 3). В процессе пиролиза, вносимый хлорид кобальта увеличивает свою каталитическую активность с потерей кристаллизационной воды, что связано с возрастанием кислотности катализатора при прокаливании. Процессу потери кристаллизационной воды соответствуют три пика (I – 124; II – 190; III – 215 °C;) потери массы для образца нефтешлама с содержанием хлорида кобальта 5% (кривая 1) [5].



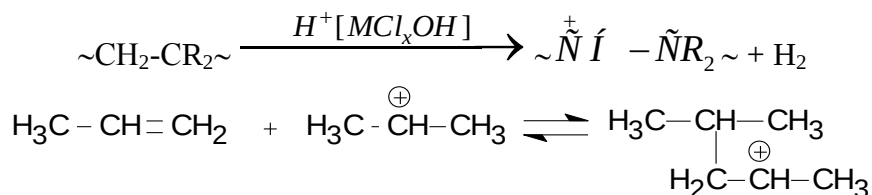
1- катализатор $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; 2 – некаталитический

Рис. 3 Дифференциальный вид кривых ТГА для исследуемых образцов при скорости нагрева 10 К / мин в координатах dm/dt от температуры.

Как видно из дифференциальных кривых, образцы имеют два спаренных пика потери массы. Для каталитического процесса пик соответствующий возгонке легкой фракции нефти располагается на графике позже, чем для некаталитического процесса, а пик соответствующий разрушению тяжелой фракции нефти для каталитического процесса раньше, в отличие от образца без использования катализатора. Данный эффект, скорее всего, связан с тем, что температура проявления каталитической активности выше, чем температура возгонки легкой фракции нефти.

Максимальная скорость потери массы образца в случае применения катализатора соответствует температуре 440 °C, а для образца нефтешлама без использования катализатора - 465 °C. Применение хлорида кобальта снижает термическую устойчивость образца нефтешлама, что приводит к увеличению скорости деструкции, по сравнению с образцом без катализатора. Поэтому процесс термического разрушения образца с использованием хлорида кобальта занимает меньше времени по сравнению с образцом без катализатора в аналогичном температурном режиме.

Используемый в процессе пиролиза хлорид кобальта, проявляя кислотные свойства, может изменять механизм термодеструкции углеводородов с радикального на ионный по средствам образования карбокатионов, инициирующих процесс термодеструкции [6]:



Работа выполнена в рамках проектов RFMEFI57714X0149, финансируемого Министерством Образования и науки РФ и 15-08-02365, финансируемого РФФИ.

Список литературы

1. *Bokovikova T.N., Shperber D.R., Shperber E.R.* Application of oil-slimes in road base and surface construction // *NAFTA* 62. 2011. №11-12. С. 383-385.
2. *Курочкин А.К., Тамм Т.* Нефтешламы – ресурсное сырье для производства светлых моторных топлив и дорожных битумов // *Сфера нефтегаз, переработка нефти и газа*. 2010. № 4. С. 72-81.
3. *Ибатулин Р.Р., Мутин И.И., Исхакова М.Н., Сахабутдинов К.Г.* Исследование свойств нефтешламов и способы их утилизации // *Нефтяное хозяйство*. 2006. № 11. С. 116-118.
4. *Красногорская Н.Н., Магид А.Б., Трифонова Н.А.* Утилизация нефтяных шламов / Н.Н. Красногорская, // *Нефтегазовое дело*. 2004. Т.2. № 1. С. 217-222.
5. *Mishra S. K., Kanungo S. B.* Thermal dehydration and decomposition of cobalt chloride hydrate ($\text{CoCl}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) // *Journal of Thermal Analysis*. 1992. №. 38. P. 2437-2454.
6. *Minsker K.S., Ivanova S.R., Biglova R.Z.* Complexes of metal chlorides with proton donors - promising polyfunctional catalysts for electrophilic processes // *Russ. chem. rev.* 1995. 64 №5. P. 429-444.

02.00.03

**Е.И. Шиманская к.х.н., А.А. Степачёва к.х.н., А.М. Сульман,
Э.М. Сульман д.х.н., М.Г. Сульман д.х.н.**

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

КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ГИДРОПЕРЕРАБОТКА АНИЗОЛА И ОПИЛОК ХВОЙНЫХ ПОРОД

В данной статье коммерческий катализатор Pd/C и синтезированные образцы 5%-Pt/Al₂O₃ и 5%-Pt/MN-270 были использованы для гидропереработки лигнина для получения компонентов жидких топлив. Так как лигнин имеет очень сложную структуру, анизол использовался в качестве модельного соединения. Также был исследован процесс гидропереработки опилок хвойных пород. Было обнаружено, что использование Pt-содержащей каталитической системы на основе алюминия и коммерческого катализатора в случае гидропереработки анизола и опилок хвойных пород позволило получить фенольные соединения, а при использовании каталитической системы на основе сверхсшитого полистирола основным продуктом являлся циклоалкан.

Ключевые слова: лигнин, гидропереработка, деполимеризация, биотопливо.

Лигнин очень трудно поддается переработке из-за его сложного характера и нестабильности, заключающейся в необратимых изменениях свойств полимера в процессе термической или химической обработки. В настоящее время лигнин используется в качестве низкосортного котельного топлива [1]. Однако химическая структура лигнина предполагает, что он может быть хорошим источником химических веществ, если разбить его на более низкомолекулярные единицы [2]. Текущие исследования по переработке лигнина направлены на его термическую деструкцию (т.е. медленный и быстрый пиролиз и газификацию) [3]. Наряду с использованием горючих газообразных продуктов, термические методы приводят к образованию так называемых био-масел, т.е. сложных смесей, содержащих фенольные производные, ароматические углеводороды, олефины и т.д. Однако прямое использование био-масла не представляется возможным из-за высокого содержания кислорода и топливных свойств (плотность, содержание золы, значение тепла) [4]. В настоящее время растет интерес к комбинированным процессам превращения лигнина в жидкое топливо. Одним из таких процессов является гидроочистка. Обычно процесс гидропереработки лигнина включают в себя реакции сольволиза и гидрирования, которые проводятся в различных растворителях (особенно, в полярных) в присутствии катализаторов на основе металлов, таких как CoMo и NiMo, нанесенных на активированный уголь, платиновые катализаторы на основе алюминия, палладий, нанесенный на цеолит HZSM-5 и рутений, нанесенный на TiO₂ [6]. В данной работе в процессе гидроочистки лигнина были протестированы каталитические системы на основе алюминия и сверхсшитого полистирола, содержащие платину, платины и палладия каталитические системы, и коммерческий Pd/C.

Для приготовления катализаторов гексахлорплатиновая кислота (H₂PtCl₆) и тетрахлорпалладат натрия (Na₂PdCl₄) были использованы в качестве прекурсоров; сверхсшитый полистирол (MN-270, Purolite Ltd., UK) и гамма-оксид алюминия (γ-Al₂O₃, KhimMedServis, Russia) использовались в качестве носителя. Носитель со средним диаметром частиц 80 мкм был предварительно промыт водой и ацетоном и высушен под вакуумом. Затем он был обработан раствором прекурсора с требуемой концентрацией металла в комплексном растворителе тетрагидрофуран (ТГФ) – метанол – вода при комнатной температуре в течение 10 минут. Затем получившийся катализатор был высушен в течение 40 минут при 80 °С и промыт водным раствором гидрокарбоната натрия и водой до полного исчезновения хлорид-ионов в промывных водах. Промытый катализатор снова

был высушен в течение 90 минут при температуре 80 °С и восстановлен при температуре 300 °С в токе водорода в течение 3 часов. Данным методом были приготовлены следующие каталитические системы: Pt/MN-270, Pd/MN-270, Pt/Al₂O₃ и Pd/Al₂O₃ с рассчитанным количеством металла 5%.

Из-за сложного состава лигнина анизол, как один из основных мономеров лигнина, был выбран в качестве модельного соединения для предварительных экспериментов, чтобы определить возможные продукты гидропереработки лигнинсодержащего материала. Гидропереработку 30 мл анизола проводили в течение 4-х часов в шестиячеечном реакторе Parr Series 5000 Multiple Reactor System (далее – реактор), снабженном магнитной мешалкой в присутствии 0.1 г катализатора при температуре 250 °С и давлении водорода 1.0 МПа. Процесс гидроочистки проводили при постоянном перемешивании (1700 оборотов в минуту), чтобы исключить влияние внешней диффузии.

Из-за природы анизола, который можно использовать в качестве растворителя, не было необходимости в добавлении каких-либо растворителей, а, следовательно, влияние растворителей на реакцию исключалось. Следующие каталитические системы были использованы в процессе гидропереработки анизола: синтезированные Pt/Al₂O₃, Pd/Al₂O₃, Pt/MN-270, Pd/MN-270 и коммерческий Pd/C (Sigma-Aldrich, США). Сравнение активности катализаторов проводили с использованием значений скорости при конверсии 30%. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты каталитической гидропереработки анизола

Катализатор	Относительная скорость при 30% конверсии, с ⁻¹	Селективность, %	Конверсия при максимальной селективности, %
5%-Pd/C	3.47	68.9 ^a 29.8 ^b	90.1
5%-Pd/Al ₂ O ₃	1.57	38.6 ^a 56.8 ^b	98.1
5%-Pt/Al ₂ O ₃	2.91	34.2 ^a 63.6 ^b	99.5
5%-Pd/MN-270	3.06	85.0 ^a 11.8 ^b	88.5
5%-Pt/MN-270	3.50	91.0 ^a 7.4 ^b	89.9

^a по циклогексану, ^b по фенолу.

Как видно из таблицы 1, использование катализаторов на основе оксида алюминия приводит к образованию фенолов, в то время как в случае катализаторов, нанесенных на углерод и на сверхсшитый полистирол, основным продуктом был циклогексан. Среди других основных продуктов переработки анизола были о-крезол, 2,6-ксиленол, бензол и толуол.

Гидропереработку опилок хвойных пород проводили в течение 4 часов в реакторе в атмосфере водорода при следующих условиях: масса субстрата – 1.0 г, масса катализатора – 0.1 г, температура - 250 °С, парциальное давление водорода - 1 МПа, объем растворителя - 30 мл. Использовались следующие полярные растворители: 2-пропанол, вода и этанол. Конверсию субстрата рассчитывали в конце реакции основываясь на разнице между начальной массой субстрата и массой сухого остатка. Отбор проб во всех экспериментах производился каждые 30 минут. Анализ образцов проводили с использованием GC-2010 хроматографа и масс-спектрометра ГХМС-QP2010S (Shimadzu, Япония).

Сравнение каталитического действия синтезированных систем при гидроочистке опилок хвойных пород в среде пропанола-2 показал, что металлы платиновой группы, нанесенные на оксид алюминия, являются наиболее перспективными в одностадийном процессе. При использовании этих катализаторов наблюдалась самая высокая конверсия лигнинсодержащего сырья по сравнению с катализаторами на основе сверхсшитого

полистирола. Использование катализаторов на основе оксида алюминия приводит к образованию следующих продуктов: фенол, крезол, фурфуриловый спирт. В присутствии катализаторов на основе сверхсшитого полистирола были получены бензол, толуол, циклогексан и метоксициклогексан. При тестировании катализаторов на основе сверхсшитого полистирола самая высокая степень конверсии сырья (68%) была получена при использовании катализатора Pt/MN-270 с 60%-ным выходом бензола. Среди других продуктов были найдены толуол (18%), циклогексан (9%) и метоксициклогексан (3%). При использовании катализатора Pd/MN-270 была получена 52% конверсия. При тестировании катализаторов на основе оксида алюминия, наибольшая эффективность процесса была достигнута при использовании Pt/Al₂O₃ в качестве катализатора. В этом случае через четыре часа была достигнута 87% конверсия, а основными продуктами были фенол (35%), о-крезол (27%), п-крезол (26%), фурфуриловый спирт (13%). Использование катализатора Pd/Al₂O₃ приводит к незначительному снижению степени конверсии субстрата (64%). Основными продуктами были метоксициклогексан (42%) и фурфуриловый спирт (37%).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта 15-08-00245 А.

Список литературы

1. *Huber, G.W.* Synthesis of Transportation Fuels from Biomass [Text]/G.W. Huber, S. Iborra, A. Corma // Catalysts, and Engineering Chemical Review. 2006. – Vol. 106. – PP. 4044-4098.
2. *Kamm, B.* Principles of Biorefineries [Text]/ B. Kamm, M. Kamm, // Applied Microbiology and Biotechnology. 2004. –Vol. 64. – PP. 137-145.
3. *Bozell, J.J.* Extraordinary Transformations to Achieve the Synthesis of Remarkable Aromatic Compounds [Text] / Bozell, J.J. // Top. Curr. Chem. 2014, DOI: 10.1007/128_2014_535.
4. *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. – PP. 1–13.
5. *Horáček, J.* The catalytic degradation of lignin was also explored over sulfide catalysts [Text]/ J. Horáček, F. Homola, I. Kubicková, D. Kubicka, // Catalysis Today. 2012. –Vol. 179. – PP. 191–198.
6. *Saidi, M.* Upgrading Process of 4-Methylanisole as a Lignin-Derived Bio-Oil Catalyzed by Pt/ γ -Al₂O₃: Kinetic Investigation and Reaction Network Development[Text]/ M. Saidi, M.R. Rahimpour, S. Raeissi // Energy Fuels. 2015. – Vol. 29. – PP. 3335–3344.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.00

В.И. Ампилов

Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет),
аэрокосмический факультет, кафедра прикладной информатики,
Москва, via69@mail.ru

**ДИДАКТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ УЗЛОВ
ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

В статье рассмотрены возможности внедрения анимированных трёхмерных моделей в существующую интерактивную автоматизированную систему обучения ИАСО. Целью данного проекта является усовершенствование процесса обучения при подготовке инженерно-технического состава для обслуживания летной техники. Рассмотрены достоинства использования анимации, а также необходимые для реализации данной задачи программные средства.

Ключевые слова: обучение, система, компьютерная графика, анимация, модель.

Целью системы обучения является теоретическая подготовка специалистов разных профилей, а потому немаловажным является то, насколько подробно система позволяет изучать основные аспекты манипуляций, проводимых с объектом изучения. Эталонным можно считать взаимодействие человека с реальными физическими объектами. Однако такое взаимодействие невыгодно, так как влечет за собой значительные материальные и временные расходы и определённые риски. Поэтому главной задачей, которая стоит перед обучающей системой, является создание базы методических материалов и комфортной среды обучения.

Современная интерактивная автоматизированная система обучения (ИАСО) [1] успешно применяется для индивидуальной или групповой теоретической подготовки специалистов. Такая система позволяет смоделировать различные ситуации, возникающие при пилотировании или техническом обслуживании летательного аппарата (ЛА). Для инженерно-технического состава ИАСО содержит в себе базу данных практически всех узлов и элементов ЛА. Обучающийся получают информацию по обслуживанию основных узлов ЛА в виде слайдов, объясняющих алгоритм действий специалиста. Однако и такой подход не всегда позволяет быстро и чётко понять необходимое действие.

Необходимо решить задачу повышения наглядности и упрощения восприятия информации в процессе обучения. Для этого нужно разработать такую технологию, которая впишется в существующую систему и применение которой смогло бы повысить эффективность ИАСО в целом. Использование видеоматериалов позволяет существенно повысить качество дидактического материала, но их подготовка требует привлечения операторов, монтажеров и других специалистов. Альтернативой такому методу визуализации может стать применение компьютерной трёхмерной анимации. Все 3D модели являются точными копиями оригинальных деталей с соблюдением размеров, маркировки, раскраски и других необходимых требований нормативных документов, в том числе ГОСТ и ЕСКД.

Для рассматриваемой справочно-информационной системы трёхмерные модели создаются с помощью программы Solid Works. Широкий набор разнообразных инструментов позволяет представлять реальные объекты любых размеров и форм в трёхмерном виртуальном пространстве. При помощи специального плагина в Solid Works появляется возможность экспорта созданных трёхмерных моделей в другую среду моделирования 3DVIAComposer. Программа позволяет выводить 2D и 3D файлы по трёхмерным данным

различных CAD, а также обладает широким набором инструментов и других необходимых средств.

Во время разработки справочной системы, средствами Solid Works создаются трёхмерные модели, которые в дальнейшем экспортируются в 3DVIAComposer, где проходит их дальнейшая обработка. 3D модели приводятся к фотореалистичному виду, элементы модели раскрашиваются в нужные цвета, а также наносятся необходимые текстуры. Кроме создания фотореалистичного вида, программа 3DVIAComposer позволяет анимировать трёхмерные модели. Воспроизведение созданной анимации может производиться несколькими способами:

- с помощью встроенного проигрывателя 3DVIAComposer Player;
- экспортируя анимацию как видео файл. При этом в программе присутствует гибкая настройка видео формата и степени сжатия;
- экспортируя анимацию как набор последовательных изображений;
- экспорт в формате exe. Такой файл возможно, воспроизвести на любом современном компьютере. При этом программа формирует exe файл, который при распаковке запускает плеер и воспроизводит файл с моделью и созданной для неё анимацией;

Таким образом, гибкость программы позволяет создать различные типы выходных файлов анимации в зависимости от поставленной задачи.

Рассмотрим работу с 3DVIAComposer более подробно. Программа обладает возможностью работы с типами файлов наиболее популярных CAD- систем, таких как SolidWorks, 3DSMax, Parasolid и другие. Такая возможность позволяет производить сборки трёхмерных моделей из разных систем геометрического моделирования модель, то есть 3DVIAComposer является неким посредником между различными форматами 3D-данных.

Решая задачу формирования реалистических моделей объектов, необходимо добиться максимально точного отображения. Отображение модели напрямую влияет на её восприятие. В программе присутствует возможность выбора различных предустановленных режимов рендера, а именно: Smooth – режим сглаживания; Smooth with outline – режим сглаживания с отображением границ; Technical – режим технического изображения и другие

Комбинированное использование представленных режимов позволяет обучаемому быстро находить местоположение объекта в общей модели ЛА, а применение режимов 'flattechnical' или 'silhouette' целесообразно использовать при печати методических указаний и другой документации, не требующей высокого качества изображения.

Таким образом, имеется возможность приводить вид модели не только к фотореалистичному, но и к другим видам визуализации, позволяющим подробно изучать структуру модели.

Кроме свойств модели имеются общие свойства, такие как тип освещения, тени, задний план и другие. Источников света может быть один или несколько. Каждый источник света обладает параметрами яркости и направления света. Расположение также может быть произвольным. Причем правильное задание параметров освещения играет важную роль в восприятии модели как реального объекта.

При необходимости имеется возможность перемещения трёхмерных объектов в виртуальном пространстве, их вращения, а также масштабирования, что позволяет получить исчерпывающую визуальную информацию об объекте.

3DVIA Composer использует фреймовый интерфейс, при котором главный экран делится на окна, каждое из которых содержит в себе несколько вкладок. Например, одним из таких окон является таймлайн. Таймлайн это окно, представляющее собой линию времени. На таймлайне устанавливаются значки, которые управляют характеристиками модели в определенное время. Интерфейс содержит три вида значков для отображения разных свойств:

- Значки позиции/свойств – записывают положение выделенных элементов модели;
- Значки камеры – записывают положение обзора камеры;
- Значки “диггера” – записывают свойства выделенного элемента модели;

Кроме того, в этом окне расположены кнопки управления постановкой вышеуказанных значков, различные фильтры и инструменты воспроизведения анимации. При создании анимации в каждый промежуток времени, с помощью установки значков, фиксируется состояние объекта и его свойства.

Созданная средствами языка XHTML справочная система является конечным продуктом, представляющим возможность пользователю ознакомиться с виртуальной моделью.

Посредством скриптов в программе реализованы функции, позволяющие использовать основные возможности визуализации и воспроизведения анимации записанной в 3DVIA Composer и сохраненной в .smg файле (формат данных 3DVIA Composer). Таким образом, пользователь, в лице технолога, переходя по текстовым ссылкам, может поэтапно ознакомиться с основными нюансами, с которыми он столкнется при проведении любых эксплуатационных работ.

Помимо анимации справочная система содержит в себе текстовую информацию о количестве и типе оборудования, устанавливаемого на ЛА, а также список элементов и основных систем.

При переходе по соответствующим ссылкам программа выделяет нужный элемент, помогая тем самым определить его расположение. Такая система может функционировать самостоятельно вне пределов ИАСО. Однако в отсутствие ИАСО, она является лишь справочной и не позволяет полноценно вести процесс обучения, а имеет ознакомительный формат.

Интеграция справочной системы в существующую обучающую систему значительно повысит эффективность обучения. В результате внедрения данной системы в ИАСО, с одновременным использованием других видов визуализации, ожидается значительное сокращение времени на подготовку инженерно-технического состава, а также повышение качества их знаний. Фактически, обученный на данной информационной автоматизированной системе специалист сразу будет готов к практической работе в реальных условиях. Предлагаемые инструменты апробируются в учебной системе Sigma [2].

Список использованной литературы

1. Пономаренко А.В. и др. Интеллектуальные интерактивные учебно-тренировочные комплексы- М.: Воениздат, 2006.
2. Столярчук В.А. Программный комплекс как учебный объект разработки // Программные продукты и системы. -2016.- № 1

05.02.11

А.П. Буйносов д.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, byinosov@mail.ru

ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ЛОКОМОТИВА В СЕРВИСНОМ ДЕПО

В статье выполнен анализ использования экспресс-диагностики электрооборудования локомотива в сервисном депо с помощью прибора «Доктор-030М», возможность перехода от затратной системы технического диагностирования на экспресс-диагностику.

Ключевые слова: локомотив, электрооборудование, сервис, депо, диагностика, экспресс.

Принятая на сети дорог система планово-предупредительного технического обслуживания и ремонта заключается в том, что независимо от фактического состояния оборудования, через заранее определенные промежутки времени производится его частичная или полная разборка с целью профилактического осмотра, технического обслуживания или ремонта [1].

При этом планируемое время жизни механизма до его переборки базируется на предыдущем опыте эксплуатации наиболее подверженных износу узлов. Процедура планово-предупредительных ремонтных работ, безусловно, уменьшает вероятность аварии, но не предохраняет узел или изделие в целом от неожиданных выходов из строя в межремонтный период.

Кроме того, не исключена возможность выхода из строя узла или агрегата из-за большого количества переборок, нарушающих приработку их элементов, что также сокращает срок жизни оборудования электровозов и требует новых ремонтных работ. К числу основных требований, предъявляемых к перспективным средствам диагностирования, относятся заданная точность измерения и необходимая достоверность диагностической информации, возможность запоминания их в текстовом и графическом виде.

Данные о технических параметрах, получаемые с помощью комплекса диагностики, могут использоваться для оперативных решений и для создания базы данных, на основе которых более редко и с различной периодичностью решаются задачи неоперативного характера [2]. К числу оперативных относятся задачи определения наличия неисправности электрических цепей, выявления ее места для организации быстрого восстановления исправности электровоза. С использованием же постепенно накапливаемой базы данных возможно определение остаточного ресурса электрических цепей и агрегатов электровоза (для планирования сроков очередного ремонта или диагностической проверки), корректировки нормативной базы системы планового содержания электровозов, периодические уточнения браковочных значений контролируемых параметров, оценки достоверности диагностических решений, эффективности диагностики, выявления узлов, лимитирующих нормативную наработку электровоза до ТР, СР и КР [3].

Но такие операции затратные и занимают до 7–9 часов времени. Наиболее эффективным является метод «Экспресс-диагностика», который основан на сравнении паспортных данных конкретного локомотива, зафиксированных после прохождения больших ремонтов, таких как ТР-3, СР или КР, и текущих показателей. Этот метод позволяет за относительно короткий период времени оценить состояние электрооборудования локомотива и вовремя определить предотказное состояние или конкретную неисправность локомотива. С помощью экспресс-диагностики оценивается состояние силовых цепей, цепей управления и вспомогательных цепей локомотива [4].

Анализ основан на сопоставлении паспортной графической зависимости $R_{\text{пуск}}$ от номера позиции на контроллере машиниста и текущего графика, полученного при очередном экспресс-контроле. Если конфигурации графиков совпадают или параллельно повторяют друг друга, то состояние локомотива оценивается как нормативное. Если происходит графическое расхождение текущих значений с паспортными, то это сигнализирует о

ненормальном состоянии на определенной позиции, и предполагается дальнейшая локализация неисправности. На рис. 1 и 2 для наглядности представлены графики зависимости $R_{\text{пуск}}$ от номера позиции контроллера машиниста исправного локомотива и неисправного.

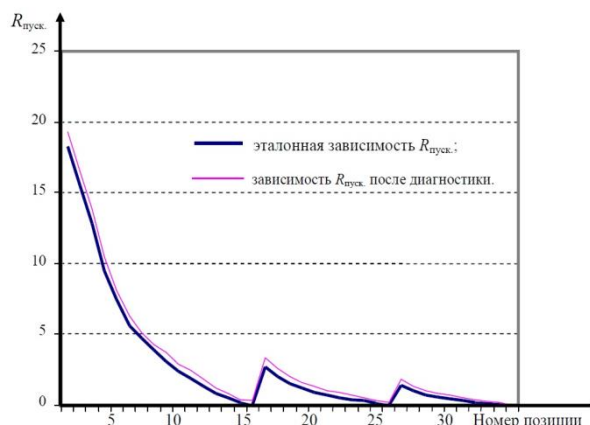


Рис. 1. График зависимости $R_{\text{пуск}}$ исправного локомотива

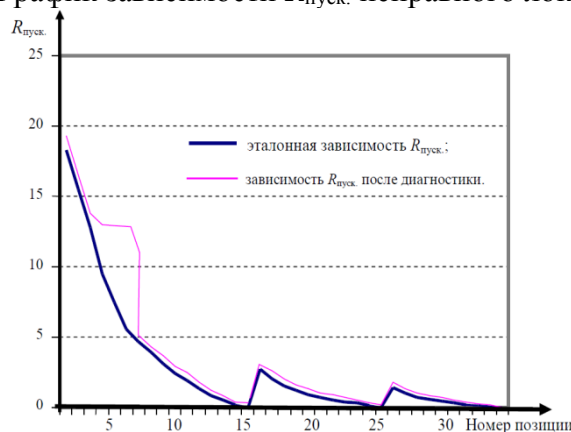


Рис. 2. График зависимости $R_{\text{пуск}}$ неисправного локомотива

Перед выполнением измерений проверить на электровозе 1-ую позицию контроллера. Потом перевести все в начальное положение (позиция 0, токоприемники, БВ-1, БВ-2 отключены). Подключить щупы № 1 измерительного модуля и № 3 модуля «Экспресс» с одной стороны к прибору «Доктор-030М» (разъемами), а с другой (зажимами типа «крокодил») – от модуля «Экспресс» подключить в цепь управления, а от измерительного – к силовой цепи. Затем последовательно включаются позиции и измеряются изменения в цепи управления, вызванные включением контакторов и изменением сопротивления в силовой цепи, вызванные выводением пусковых сопротивлений. Результат замера записывается на жесткий диск компьютера прибора «Доктор-030М». Подключение прибора «Доктор-030М» при экспресс-диагностике» изображено на рис. 3.

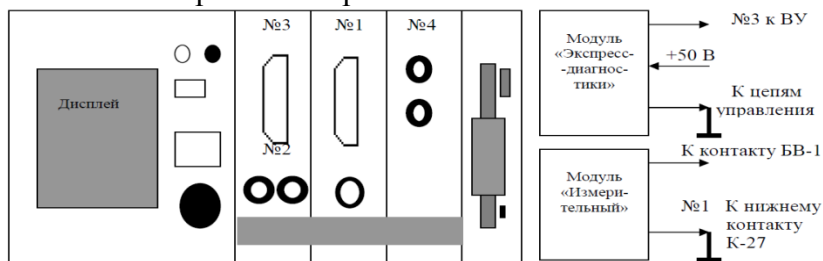


Рис. 3. Подключение прибора «Доктор-030М» при экспресс-диагностике

После замеров протокол экспресс-контроля выводится на дисплей прибора. В протокол экспресс-контроля входят подозрительные аппараты, которые в обязательном порядке должны быть продиагностированы по полному циклу.

С помощью разработанного пакета прикладных программ на ПЭВМ производится оценка предотказного состояния элементов электрооборудования по наиболее характерным и

важным эксплуатационным параметрам. Выход такого параметра за допустимые пределы означает необходимость проведения профилактических работ.

Таким образом, накапливая значения параметров на каждый аппарат каждого локомотива, определяются среднестатистические нормы допусков, гарантирующие безотказную работу. На рис. 4 показан график изменения переходного сопротивления контактов в процессе эксплуатации

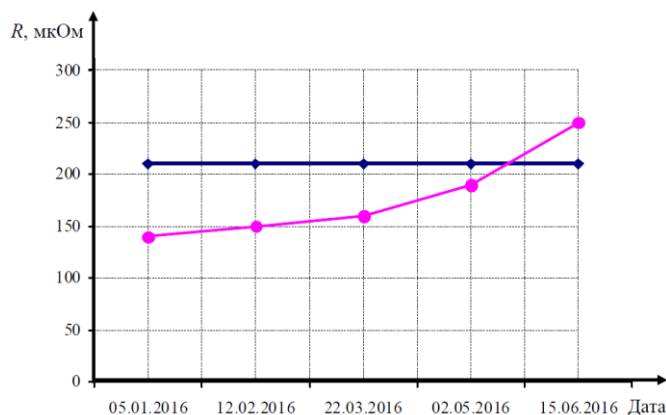


Рис. 4. График изменения переходного сопротивления контактов в процессе эксплуатации. В таблице приведены верхний и нижний пределы сопротивления контактов.

Таблица. Переходное сопротивление контактов

Дата проверки	5.01.16	12.02.16	22.03.16	2.05.16	15.06.16
Верхний предел, мкОм	210	210	210	210	210
Значения, мкОм	140	150	160	190	250

Из анализа таблицы видно, что переходное сопротивление контактов контактора, в процессе эксплуатации, увеличивается и необходимо произвести профилактический ремонт 2.05.2016 г., иначе при очередном замере оно уже будет вне нормы.

Основным результирующим документом, который является руководством к действию для ремонтной бригады, служит протокол диагностирования [5]. В протокол входят следующие данные: номер локомотива; дата проведения замера; «до» или «после» ремонта произведен замер; обозначение устройства по схеме; тип устройства; установочное или пороговое значение параметра; реальное измеренное значение параметра. Полученный протокол диагностики в основном депо вклеивается в «Книгу ремонта электровоза ТУ-28» и является руководством к проведению ремонта по состоянию электроаппаратуры для ремонтной бригады. Таким образом, в сервисном депо будут накапливаться все протокол диагностики по каждому локомотиву, по которым можно отследить динамику состояния электроаппаратуры.

Список литературы

1. Буйносов А.П. Выбор остаточного проката бандажей при обточке колесных пар электровозов ВЛ11 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 2. С. 221-228.
2. Наговицын В.С., Буйносов А.П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326-329.
3. Буйносов А.П., Мишин Я.А. Анализ использования вибродиагностического комплекса ОМСД-02 в ремонтном локомотивном депо // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 5. С. 126-129.
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. Наговицын В.С., Буйносов А.П. Алгоритм поиска критических узлов железнодорожного подвижного состава // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. №3. С. 17-21.

05.02.02

А.П. Буйносов д.т.н. Н.Г. Фетисова

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, buinosov@mail.ru, NFetisova@usurt.ru

ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПРУЖИН В РЕССОРНОМ ПОДВЕШИВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ ЛОКОМОТИВОВ

В статье приводятся варианты использования винтовых рессор в различных ступенях рессорного подвешивания, методика расчета цилиндрических винтовых рессор современных локомотивов.

Ключевые слова: локомотив, подвешивание, рессора, пружина, использование, варианты, силы, расчет.

Самое широкое применение, в качестве упругих элементов, в рессорном подвешивании подвижного состава нашли витые металлические пружины, с цилиндрической образующей. В последние десять лет компания ОАО «РЖД» проводит активную политику обновления парка тягового подвижного состава, в частности электровозов старых поколений (ВЛ10, ВЛ60, ВЛ80, ВЛ85, ЧС2) на электровозы новых поколений (2ЭС6, 2ЭС10, ЭП2К, 2ЭС4К). При этом основное конструктивное отличие рессорного подвешивания электровозов новых поколений заключается в отсутствии в буксовой ступени рессорного подвешивания листовых рессор, функции которой теперь выполняет гаситель вязкого трения, установленный параллельно основным пружинам. В кузовной ступени подвешивания взамен люлечного подвешивания применены многофункциональные винтовые пружины (Flexicoil), которые предназначены как для восприятия вертикальных нагрузок, так и для создания возвращающих моментов при поперечном и угловом перемещениях тележки относительно кузова.

Кузов электровоза ЭП2К (рис. 1) опирается на каждую тележку в восьми точках (по четыре с каждой стороны) с помощью цилиндрических пружин. Буксовое рессорное подвешивание электровозов 2ЭС6 и 2ЭС10 [1] унифицировано, представлено на рис. 2.

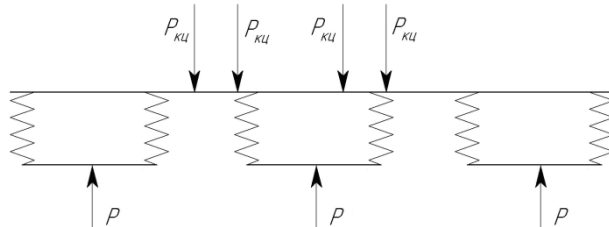


Рис. 1. Схема рессорного подвешивания электровоза ЭП2К

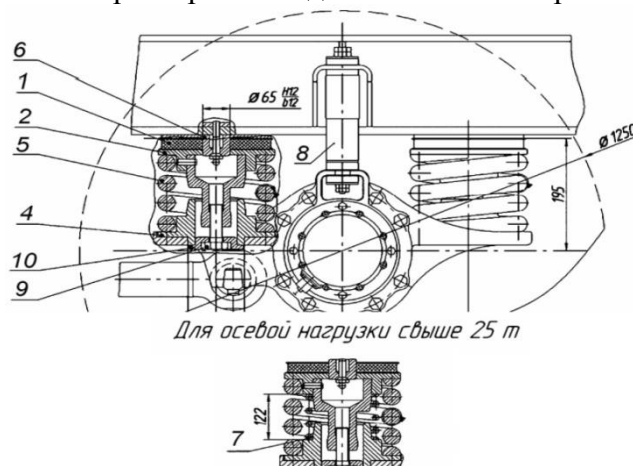


Рис. 2. Буксовое подвешивание электровозов 2ЭС6 и 2ЭС10:

- 1 – резинометаллические амортизаторы; 2 – верхняя направляющая;
- 4 – нижняя направляющая; 5 – наружная пружина; 6 – втулка;
- 7 – внутренняя пружина; 8 – гидродемпфер; 9 – стяжной болт; 10 – втулка.

Буксовое рессорное подвешивание состоит из гидравлического гасителя 8 и двух спиральных цилиндрических пружин. Пружины устанавливаются на приливы корпуса буксы, на верхние направляющие буксовых пружин 2 через резинометаллические амортизаторы 1 опирается рама тележки, причем хвостовик верхних направляющих входит в расточку нижних направляющих пружин с зазором ± 14 мм, ограничивающим поперечное смещение колесной пары относительно рамы тележки с жесткостью поперечной связи 5,7 кН/мм за счет поперечной податливости буксовых пружин. При заданной осевой нагрузке 24 т на каждую буксу устанавливаются по две наружные пружины 5, а при добаластировке электровоза до осевой нагрузки свыше 25 т, добавляются еще и по две внутренние 7 [2].

Наружные буксовые пружины изготовлены из шлифованного прутка диаметром 42 мм стали 60С2ХА с поджатыми и обточенными концевыми витками. Статический прогиб пружин под расчетной нагрузкой составляет 58 мм, высота пружин под нагрузкой равна 206 мм, поперечная жесткость пружины равна 1,43 кН/мм.

Связи кузова с рамой тележки предназначены для передачи всех видов усилий между рамой кузова и тележкой. Связи кузова с тележкой состоят из кузовного подвешивания выполненного через пружины типа «flexicoil», гидродемпферов, упоров ограничителей горизонтальных перемещений и наклонных тяг. Пружины типа «flexicoil» кузовного подвешивания показаны на рис. 3.

Каждая тележка имеет кузовные пружины 1, установленные на направляющие нижние чаши 4, вставленные в фиксирующие кольца на боковинах рамы тележки.

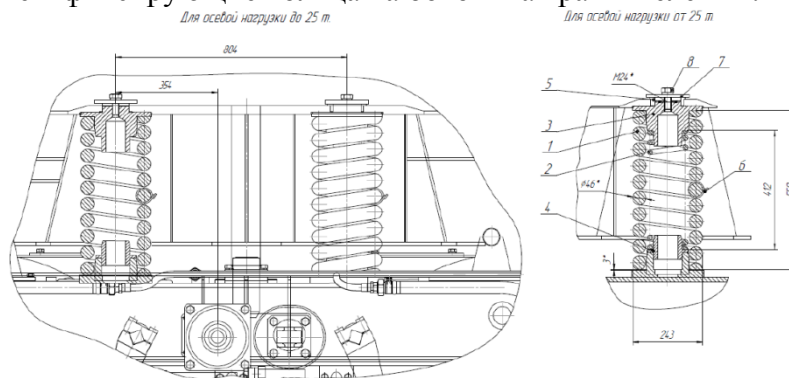


Рис. 3. Пружины типа «flexicoil» кузовного подвешивания:

1 – пружина; 2 – внутренняя пружина; 3 – верхний стакан;
4 – направляющая чаша; 5 – «бонка»; 7 – стопорная планка; 8 – болт.

Широкое применение в рессорном подвешивании современных локомотивов [3] цилиндрических пружин в первую очередь оправдывается их достоинствами: простотой конструкции, по сравнению с другими упругими элементами, и как следствие достаточно высокой надежностью; относительной дешевизной изготовления и обслуживания; при небольших габаритах они позволяют получить оптимальные упругие характеристики и обеспечивают более спокойный ход экипажа, чем листовые рессоры.

При расчете пружин, как и при расчете листовых рессор, первая задача заключается в определении прогиба и напряжения выбранного из существующих типов пружин. Вторая задача является продолжением первой, если напряжение в пружине будет больше допустимого, и заключается в расчете более усиленной по сравнению с существующей пружиной. Статический прогиб пружины

$$f = \frac{8 \cdot D^3 \cdot n \cdot Q}{G \cdot d^4}, \quad (1)$$

где D – средний диаметр витка; n – число рабочих витков пружины; Q – нагрузка на пружину; G – модуль упругости материала при кручении. $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа ($\approx 8 \cdot 10^5$ кгс/см²); d – диаметр прутка;

Нагрузка на каждую пружину составляет половину от нагрузки P , приходящейся на рессору. Данные применяемых на электровозах пружин приведены в [4]. Касательные напряжения от кручения пружины

$$\tau = K \cdot \frac{8 \cdot Q \cdot D}{\pi \cdot d^3} \quad (2)$$

Здесь

$$K = \frac{4 \cdot C - 1}{4 \cdot C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (3)$$

Индекс пружины

$$C = \frac{D}{d} \quad (4)$$

Полученное значение τ необходимо сравнить с допускаемым значением

$$\tau \leq [\tau] \quad (5)$$

Допускаемое касательное напряжение $[\tau]$ пружины при кручении составляет 500–550 МПа (5000–5500 кгс/см²).

Если расчетное значение напряжения окажется больше допускаемого, необходимо увеличить диаметр прутка, который принимается в пределах 19–40 мм, и должен быть округлен до ближайшего большего значения, по ГОСТ Р 50753-2007. Средний диаметр витка пружины при этом может быть выбран в пределах 120–250 мм. Число рабочих витков в этом случае

$$n = \frac{f_{в1} \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot Q \cdot D^3} \quad (6)$$

Число рабочих витков рекомендуется брать не менее трех.

Полное число витков пружины, включая 1,5 витка опорных поверхностей, составит

$$n_{\text{п}} = n + 1,5 \quad (7)$$

Жесткость пружины

$$G_{\text{в}} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot n \cdot D^3} \quad (8)$$

Касательное напряжение с учетом кривизны витков определяется по формуле (2). Основным условием равнопрочности двухрядных пружин, применяемых на электроподвижном составе, являются одинаковые напряжения внутренней и наружной пружин, т. е. $\tau_1 = \tau_2$.

Равенство напряжений без учета кривизны витков позволяет установить соотношения между числом рабочих витков наружной и внутренней пружин

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (9)$$

и нагрузками

$$Q_1 = \frac{D_2 \cdot d_1^3}{d_1^3 \cdot D_2 + D_1 \cdot d_2^3} \cdot Q, \quad (10)$$

$$Q_2 = \frac{D_1 \cdot d_2^3}{d_2^3 \cdot D_1 + D_2 \cdot d_1^3} \cdot Q. \quad (11)$$

Список литературы

1. Буйносов А.П., Фетисова Н.Г. Наноматериал увеличивает ресурс бандажей колесных пар электроподвижного состава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 2 (647). С. 59-64.
2. Буйносов А.П. Восстановление в депо изношенных бандажей промышленных электровозов с помощью наплавки без выкатки колесных пар // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 3. С. 04-11.
3. Буйносов А.П. Выбор остаточного проката бандажей при обточке колесных пар электровозов ВЛ11 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 2. С. 221-228.
4. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Балдин В.Л. Математическая модель повышения ресурса бандажей колесных пар электровозов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 4. С. 43-48.

05.02.08

А.П. Буйнов д.т.н. И.С. Цихалевский к.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения,
кафедра «Электрическая тяга», Екатеринбург, buynosov@mail.ru, ITsihalovsky@usurt.ru

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ РАЗВЕСКИ ТЕЛЕЖКИ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА

В статье приводятся основные принципы теоретического расчета развески тележки экипажной части современного электровоза и электропоезда железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, электровоз, электропоезд, экипаж, тележка, развеска, расчет, принципы, основа.

Развеска представляет собой распределение массы электроподвижного состава (ЭПС) по отдельным колесным парам и бандажам. Неравномерное распределение вертикальной нагрузки приводит к снижению тяговых свойств ЭПС из-за боксования разгруженных колесных пар и ухудшению динамики подвижного состава из-за перегрузки бандажей или колесных пар. Кроме того, ухудшается поперечная устойчивость ЭПС при движении в кривых [1]. Различают продольную и поперечную развески. При продольной развеске достигаются одинаковые давления от колесных пар на рельсы, при поперечной – одинаковые давления колес. Целью расчета развески является определение места расположения опор кузова на тележки и приходящихся на них нагрузок. Примерная схема для расчета продольной развески двухосной тележки высокоскоростного электропоезда приведена на рис. 1.

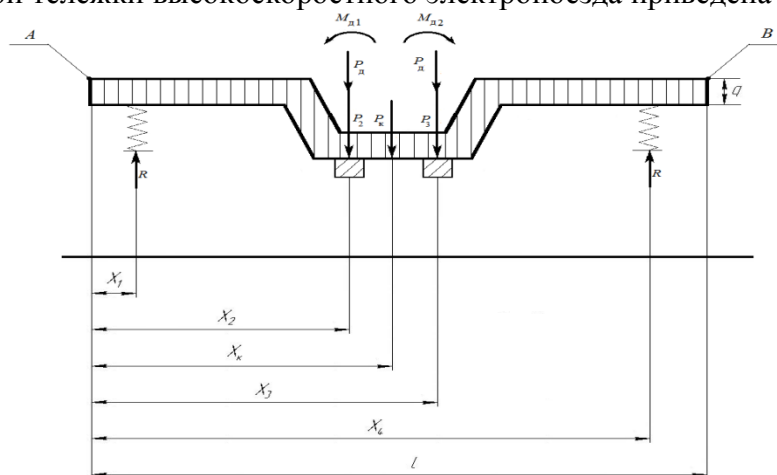


Рис. 1. Схема для расчета продольной развески двухосной тележки электропоезда ЭВС1

Геометрические размеры приведенной на рис. 1 схемы могут быть определены как:

$$\begin{cases} X_1 = q_1; \\ X_2 = q_1 + R_0 + \frac{n}{2}; \\ X_3 = q_1 + R_0 + n + \frac{l_{ц}}{2}; \\ X_4 = l - q_2. \end{cases} \quad (1)$$

Примерная схема для расчета продольной развески трехосной тележки ЭПС приведена на рис. 2. На рис. 2: P_1 – вес упряжного бруса с автосцепкой; $P_2(P_3)$ – вес поперечной шкворневой балки, на которую опираются кузов и подрессорная часть тягового двигателя; P_4 – вес бруса сочленения брусковых и литых рам тележек или вес задней концевой балки концевых рам; $P_{дв}$ – вес тягового двигателя. Как видно из рис. 1, масса кузова P_k , отнесенная к одной тележке, определяется как [2]

$$P_k = n \cdot 2\Pi - P_T, \quad (2)$$

где n – число осей в тележке; P_T – масса тележки.

$$P_T = n \cdot P_{\text{нпр}} + P_{\text{пр}}. \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{пр}}$ – масса подрессоренных частей тележки.

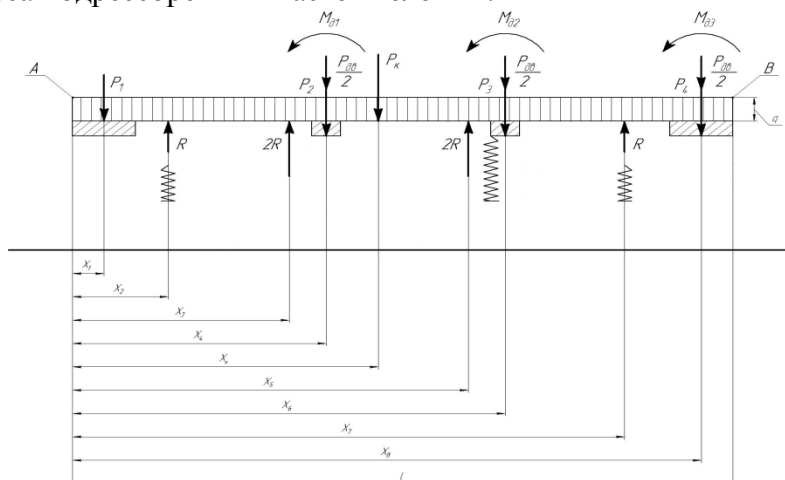


Рис. 2. Схема для расчета продольной развески трехосной тележки ЭПС

Масса подрессоренных частей трехосной тележки ЭПС, схема, для расчета продольной развески которой представлена на рис. 2, равна

$$P_{\text{пр}} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + 0,5 \cdot n \cdot P_{\text{дв}} + q \cdot l, \quad (4)$$

а реакция винтовых рессор на раму тележки в совмещенных точках подвешивания обеих боковин

$$R = \frac{P_k + P_{\text{пр}}}{2 \cdot n}. \quad (5)$$

Сосредоточенные моменты $M_{д1}$, $M_{д2}$, и $M_{д3}$, изображенные на расчетной схеме рис. 2, обусловлены тем, что точка приложения нагрузки от тяговых двигателей не совпадает с центрами тяжестей поперечных балок [3].

$$M_{дi} = 0,5 \cdot P_{\text{дв}} \cdot a_i, \quad (6)$$

где a_i – расстояние от центра тяжести поперечной балки до точки подвешивания тягового двигателя на эту балку.

Условие, обеспечивающее одинаковые давления от колесных пар на рельсы, запишется уравнением

$$\sum_{i=1}^n M_A = 0, \quad (7)$$

т. е.

$$\begin{aligned} &P_1 \cdot X_1 + \left(P_2 + \frac{P_{\text{дв}}}{2}\right) \cdot X_4 - M_{д1} + P_k \cdot X_k + \left(P_3 + \frac{P_{\text{дв}}}{2}\right) \cdot X_6 - M_{д2} + \\ &+ \left(P_4 + \frac{P_{\text{дв}}}{2}\right) \cdot X_8 - M_{д3} + \frac{q \cdot l^2}{2} - R \cdot X_2 - 2 \cdot R \cdot X_3 - 2 \cdot R \cdot X_5 - R \cdot X_7 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Из этого уравнения можно определить место расположения опоры кузова на тележке X_k . После определения X_k в зависимости от конструкции рамы (брусковой, литой или сварной) решаются некоторые вопросы конструктивного исполнения отдельных ее узлов и обеспечения устойчивого положения тележки ЭПС. Если у брусковых рам точка расположения опоры кузова на тележке не совпадает с центром тяжести поперечной шкворневой балки в пределах 200 мм, то шкворневая балка может быть выполнена с соответствующим местным уширением для размещения в нем пяты кузова. При большем несовпадении необходимо применить продольную мостовую балку, опирающуюся на две поперечные [4]. Распределение массы кузова между этими балками определяется путем совместного решения уравнений, составленных применительно к расчетной схеме (рис. 1).

$$\begin{cases} P_k \cdot x_k = P_{k2} \cdot x_4 + P_{k3} \cdot x_6, \\ P_k = P_{k2} + P_{k3}, \end{cases}, \quad (9)$$

где P_{k2} – нагрузка от кузова, приходящаяся на одну поперечную балку; P_{k3} – нагрузка на другую поперечную балку.

Решение уравнений дает

$$P_{k2} = \frac{(x_6 - x_k) \cdot P_k}{(x_6 - x_4)} \text{ и } P_{k3} = \frac{(x_k - x_4) \cdot P_k}{(x_6 - x_4)} \quad (10)$$

На ЭПС с литыми рамами тележек для опор кузова используются поперечная шкворневая балка и буферный брус, отлитые за одно с боковинами коробчатого сечения. Упругие дополнительные опоры, установленные на буферных брусках крайних тележек, несут лишь часть нагрузки кузова и служат для придания тележкам устойчивого положения в продольном направлении, благодаря чему достигается равномерное распределение нагрузок между колесными парами и лучшее использование сцепного веса ЭПС при реализации силы тяги. Кроме того, дополнительные опоры способствуют уменьшению влияния тележек. Основная же нагрузка от массы кузова на тележку передается на центральные опоры, установленные на шкворневых балках. На пассажирских электровозах ЭП2К с трехосными несочлененными тележками с рамами коробчатого сечения, сваренными из листовой стали, применяют опоры, представляющие собой пружины, расположенные в нишах рамы кузова и опирающиеся на боковины рамы тележки (рис. 3).

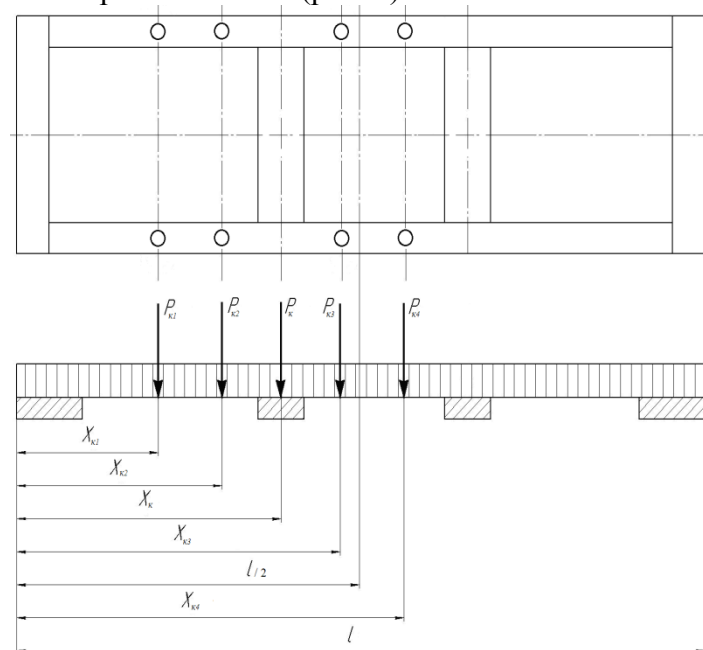


Рис. 3. Схема для определения места расположения опор кузова электровоза ЭП2К

Поскольку очевидно, что статические прогибы пружин кузовной ступени рессорного подвешивания должны быть одинаковыми, нагрузки на опоры также должны быть одинаковыми, т. е.

$$P_{k1} = P_{k2} = P_{k3} = P_{k4}. \quad (11)$$

Места расположения опор кузова на тележки можно определить исходя из следующих соображений. Если значение X_k получилось больше величины половины длины тележки $l/2$, то место расположения опор кузова на тележки, например для X_{k1} , определяется как:

$$X_{k1} = X_k - \frac{2 \cdot (l - X_k)}{3}. \quad (12)$$

Двухосные несочлененные тележки электровозов типа ВЛ11, а также электропоездов ЭВС1 имеют симметричную конструкцию. Поэтому опоры кузова электровозов типа ВЛ11 располагаются на одинаковом удалении от концевых балок или шкворневой балки, а центр

опор кузова электропоездов ЭВС1 совпадает с центром симметрии их тележек. Для проверки баланса сил, приложенных к раме и изгибающих моментов, необходимо составить уравнение

$$\sum_{i=1}^n M_B = 0. \quad (13)$$

Список литературы

1. Буйносов А.П., Фетисова Н.Г. Наноматериал увеличивает ресурс бандажей колесных пар электроподвижного состава // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 2 (647). С. 59-64.
2. Буйносов А.П. Восстановление в депо изношенных бандажей промышленных электровозов с помощью наплавки без выкатки колесных пар // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 3. С. 04-11.
3. Буйносов А.П. Выбор остаточного проката бандажей при обточке колесных пар электровозов ВЛ11 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2013. Т. 6. № 2. С. 221-228.
4. Буйносов А.П., Худояров Д.Л., Балдин В.Л. Математическая модель повышения ресурса бандажей колесных пар электровозов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 4. С. 43-48.

05.02.00

А.В. Варенцов, С.М. Дмитриев д.т.н., Д.Н. Солнцев к.т.н., А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции,
Нижний Новгород, vav88@mail.ru

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАССЕТНОЙ АКТИВНОЙ ЗОНЕ ПЛАВУЧЕЙ АЭС

В работе представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в модели ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, дистанционирующая решетка.

Плавучая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) - это автономный энергетический объект, который является самоходным судном и буксируемым морским или речным путем к месту его эксплуатации. Согласно проекту, ПАТЭС состоит из гладкопалубного судна с двумя реакторными установками (РУ) КЛТ-40С ледокольного типа, разработанными АО «ОКБМ Африкантов». Одна из важных особенностей РУ КЛТ-40С – кассетная активная зона, состоящая из чехловых тепловыделяющих сборок с пластинчатыми дистанционирующими решетками (ДР).

При разработке новых реакторных установок перед конструкторами встает задача обоснования теплотехнической надежности активных зон (АЗ), которые являются неотъемлемой частью проекта создаваемой РУ. Оценка теплотехнической надежности АЗ ядерного реактора во многом базируется на теплогидравлическом расчете, выполнение которого требует высокой информативности и достоверности параметров и значений локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока. Таким образом, для надежного теплогидравлического расчета АЗ ядерного реактора необходимо проведение комплекса экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования, направленные на изучение гидродинамических характеристик потока теплоносителя, выполняются на аэродинамическом стенде в НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

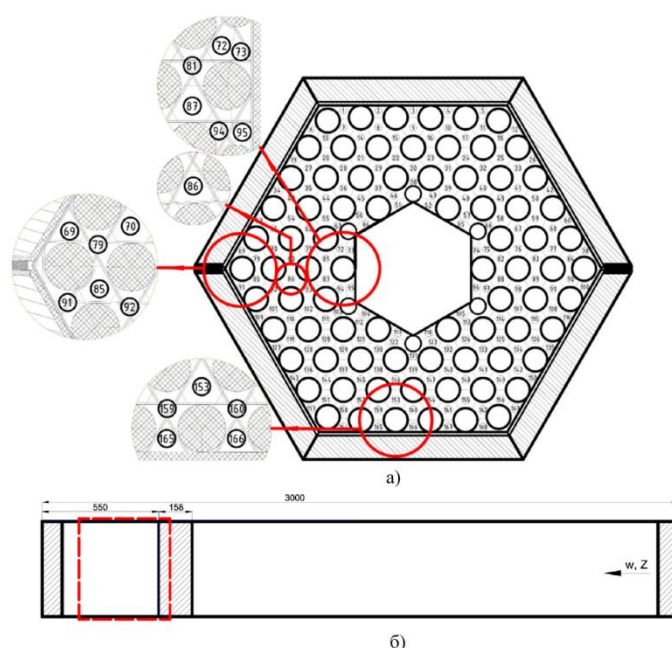
Экспериментальный стенд

Для исследования гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С используется аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс.

Экспериментальная модель, входящая в состав стенда, представляет собой масштабную модель ТВС реактора КЛТ-40С, выполненную в полном геометрическом подобии с натурной ТВС. Модель состоит из шестигранного чехла, семидесяти восьми цилиндрических твэлов-имитаторов, шести цилиндрических СВП-имитаторов, трех поясов дистанционирующих решеток.

Методика проводимых исследований

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока проводились непосредственно за поясом ДР с целью выявления влияния отдельных конструктивных элементов решетки на течение теплоносителя и заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом [1, 2]. Измерения локальных полей скорости проводились в выделенных областях поперечного сечения ЭМ (рис. 1а). Расположение поясов ДР соответствует схеме, представленной на рисунке 1б.



а) – области измерения вектора скорости в поперечном сечении ЭМ; б) – схема расположения ДР и область исследования гидродинамических характеристик теплоносителя

Рис. 1 - Области исследования гидродинамических характеристик в ЭМ

Результаты исследования

Комплексный анализ результатов исследований гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С позволил заключить:

1. Во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения. При этом поперечное перемешивание теплоносителя между ячейками происходит за счет естественной турбулентности потока.

2. В центре стандартных ячеек, где пластины практически не препятствуют прохождению теплоносителя (рис. 2а), наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму. В стандартных ячейках, где пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки данное явление, отсутствует (рис. 2б). Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения и составляет $(w_z / \bar{w}_z) = 1,1 \div 1,2$ от среднерасходной скорости.

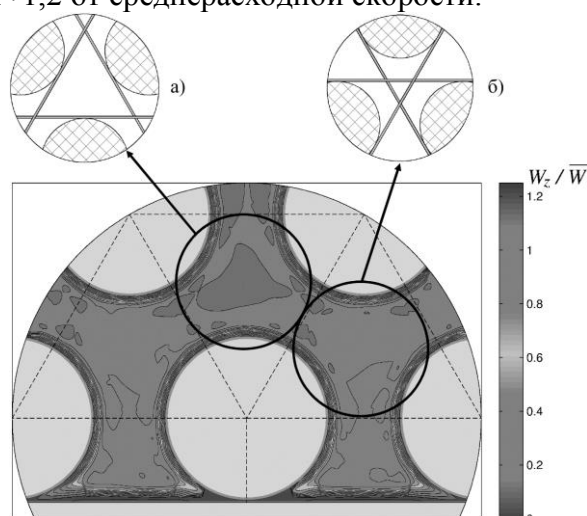


Рис. 2 - Общий вид стандартных ячеек ЭМ и картограммы распределения аксиальной скорости потока теплоносителя:

а – пластины ДР практически не препятствуют прохождению теплоносителя (тип 1);

б – пластины ДР затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки (тип 2)

При этом аксиальная составляющая вектора скорости в таких типах ячеек на (10-15) % больше (рис. 3а), чем в стандартных ячейках, где пластины ДР своим пересечением затесняют проходное сечение в виде треугольника в центре ячейки. Данное явление объясняется тем, что пластины ДР реактора КЛТ-40С создают дополнительное гидравлическое сопротивление потоку.

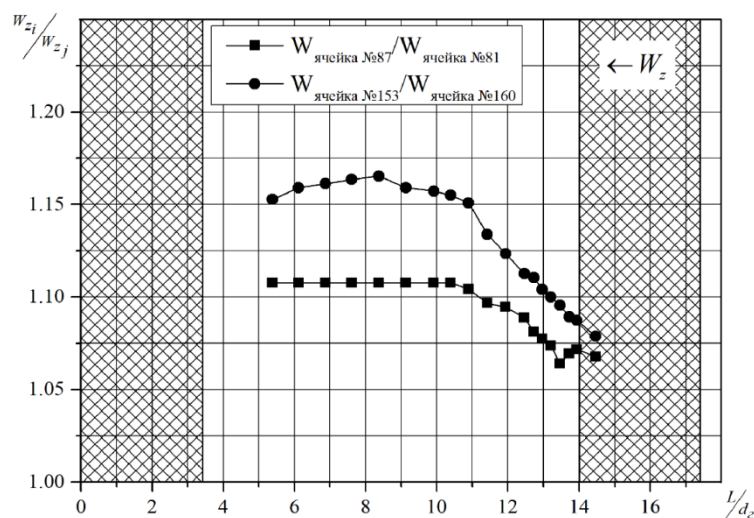


Рис.3 - Отношение аксиальной составляющей вектора скорости и распределения расхода теплоносителя в стандартных ячейках двух вариантов затеснения проходного сечения

Выводы

На основе комплексного анализа экспериментальных и расчетных данных сделаны следующие выводы:

1. Во всех исследуемых областях ТВС КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно имеет осевой характер движения.

2. Выявлено, что в стандартных ячейках, где пластины дистанционирующей решетки практически не препятствуют прохождению теплоносителя значения аксиальной составляющей вектора скорости на 10–15 % больше, чем в ячейках, где пластины дистанционирующей решетки затесняют проходное сечение.

3. Наличие пластин дистанционирующей решетки КЛТ-40С приводит к дополнительной турбулизации потока, при этом интенсивность и направление течений зависит от ширины межтвэльных зазоров и расположения пластин дистанционирующей решетки, которые в неравной мере затесняют проходное сечение ячеек.

Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон с ТВС для реактора КЛТ-40С с целью уменьшения консерватизма в расчетах теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А. и др. Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов. *Приборы и методы измерений*. 2015. Т.6. №2. С. 188-195
2. Сергеев Д.А., Кандауров А.А., Троицкая Ю.И., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф. Система измерений полей скорости методом particle image velocimetry для исследования теплогидравлических процессов в крупномасштабной модели перспективного реактора БН// *Приборы и техника эксперимента*.

05.02.00

**С.М. Дмитриев д.т.н., Д.В. Доронков, М.А. Легчанов к.т.н.,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов к.т.н.**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, nevid000@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС–Квадрат реактора PWR.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя.

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС–Квадрат для активной зоны реакторов типа PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в ТВС–Квадрат использованы апробированные и зарекомендовавшие себя в ТВС для реакторов ВВЭР конструкторские решения по силовому каркасу и дистанционирующей решетке (ДР), которые позволяют повысить эксплуатационную надежность ядерного топлива [1].

Одной из конструктивных особенностей ТВС–Квадрат является наличие перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР), одними из функций которых являются турбулизация потока теплоносителя и интенсификация процессов теплообмена. Установка подобных элементов влияет на эффективность перемешивания теплоносителя, и, как следствие, на величину критических тепловых потоков и запаса до кризиса теплоотдачи. В поперечном сечении кассеты условно можно выделить две характерные области: область регулярных ячеек и ячейки в районе направляющего канала (НК). В данных областях, различающихся геометрическими характеристиками, необходимо знать закономерности формирования потока теплоносителя. Изучение гидродинамики сборок твэлов и активных зон реакторов, в целом, целесообразно проводить на масштабных и полноразмерных моделях кассет на аэро- и гидродинамических стендах. Поэтому исследование закономерностей формирования потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС–Квадрат является актуальной задачей, решение которой позволяет обосновать теплотехническую надежность активных зон реакторов PWR [2].

Экспериментальный стенд

Для определения влияния ПДР на поток теплоносителя в ТВС–Квадрат в НГТУ им. Р.Е. Алексеева функционирует аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [3].

ЭМ, представляет собой фрагмент ТВС–Квадрат и выполняется в полном геометрическом подобии натурной ТВС. ЭМ состоит из твэлов-имитаторов, имитаторов НК, ДР и ПДР, снабженных дефлекторами.

В работе рассматривались три варианта дефлекторов, представленные на рисунке 1.

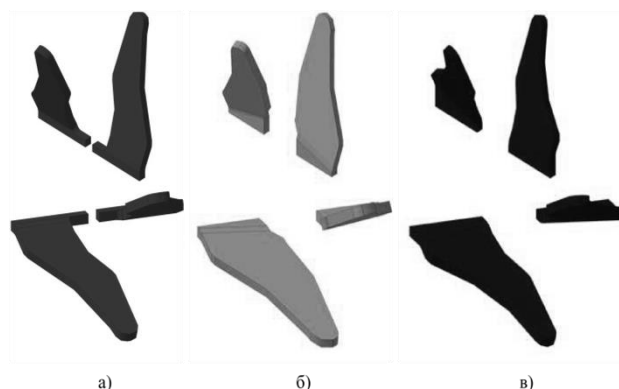


Рис. 1– Исследуемые типы дефлекторов на ПДР ТВС-Квадрат: а) - дефлектор типа «прямой гиб»; б) – дефлектор типа «косой гиб»; в) - дефлектор типа «обратный гиб»

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления, ЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя за дефлекторами ПДР осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X , Y , Z не превышают 7,5% от абсолютной скорости.

Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования гидродинамики теплоносителя за ПДР заключались в измерении модуля и направления вектора скорости в исследуемой точке пучка стержней ЭМ. В качестве характерных ячеек для определения влияния дефлекторов ПДР на течение потока теплоносителя была выбрана одна регулярная ячейка и две ячейки в области НК.

Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в регулярных ячейках

Анализ экспериментальных данных в регулярной ячейке показал:

1. За каждым из исследуемых типов дефлекторов ПДР образуется вихревое течение (рис. 3), которое прекращается на расстоянии $\Delta L/d_f = 3 - 5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии $\Delta L/d_f = 10 - 12$ за дефлекторами типа «прямой гиб».

2. Затухание поперечных скоростей за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» происходит на расстоянии $\Delta L/d_f = 14 \div 15$, а для ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» на расстоянии $\Delta L/d_f \approx 24$.

3. По мере удаления от ПДР большей интенсивностью обладает вихрь, образованный дефлекторами типа «прямой гиб». Наибольшая длина затуханий возмущений потока отмечена за ПДР с дефлектором типа «обратный гиб».

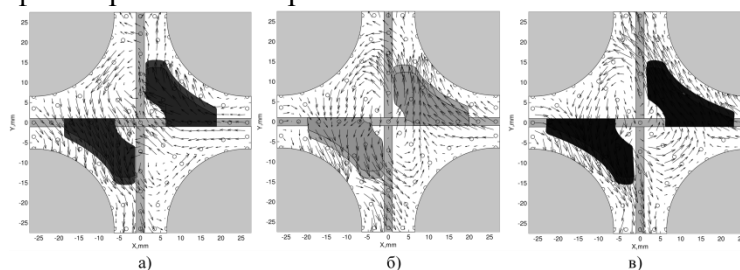


Рис. 3– Векторное поле в регулярной ячейке за дефлекторами ПДР на расстоянии $\Delta L/d_f = 1,3$ от решетки: а) – дефлектор типа «прямой гиб»; б) - дефлектор типа «косой гиб»; в) – дефлектор типа «обратный гиб»

Результаты исследований гидродинамики теплоносителя в ячейках области НК

Анализ экспериментальных данных в ячейках области НК показал:

1. В ячейках, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки НК, за всеми из исследуемых типов дефлекторов образуется вихрь (рис. 4), который затухает на расстоянии $\Delta L/d_f \approx 3$ от ПДР.

2. В ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «прямой гиб» и «косой гиб» возникает вихрь с длиной затухания

$\Delta L/d_f \approx 4 - 7$ от решетки. При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь затухает на расстоянии $\Delta L/d_f \approx 14$ за ПДР.

3. Затухание поперечных скоростей за ПДР в области НК с дефлекторами всех типов, происходит на расстоянии $\Delta L/d_f = 14 \div 15$.

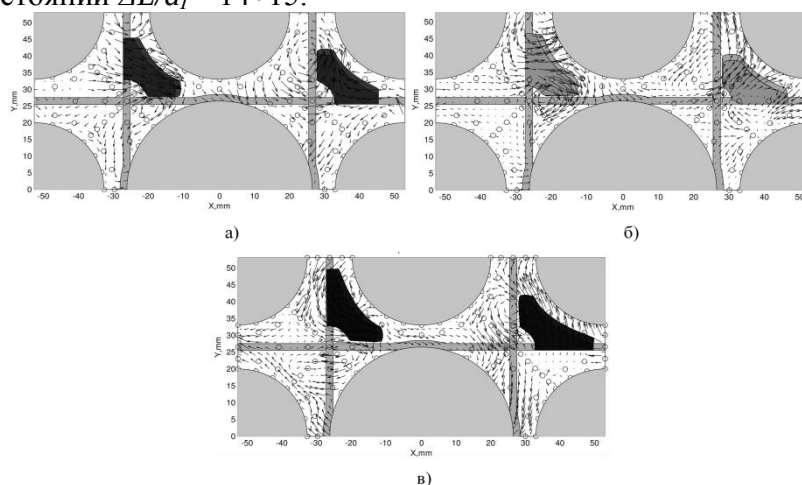


Рис. 4— Векторное поле в ячейках области НК за исследуемыми дефлекторами ПДР на расстоянии $\Delta L/d_f = 1,3$ от решетки: а) — за дефлекторами типа «прямой гиб»; б) — за дефлекторами типа «косой гиб»; в) — за дефлекторами типа «обратный гиб»

Заключение

На основе комплексного анализа распределения относительных поперечных скоростей за ПДР ТВС–Квадрат сделаны следующие выводы:

1. За любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии $\Delta L/d_f = 3 - 5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии $\Delta L/d_f = 10 - 12$ за дефлекторами типа «прямой гиб».

2. В ячейках НК, где дефлекторы направляют теплоносителя в аналогичные ячейки данной области, за всеми из исследуемых типов дефлекторов возникает вихрь, который затухает на расстоянии $\Delta L/d_f \approx 3$ от ПДР.

3. В ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta L/d_f \approx 5 - 8$ от решетки. Наибольшая длина затухания локальных вихрей наблюдается за дефлекторами типа «обратный гиб».

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / – М.: Машиностроение. – 2013.
2. Баринов А.А., Бородин В.Е., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. - №2. – С. 98-108.
3. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия.-2012. - Т 113. - Вып. 5. - С. 252-257.

05.02.00

**С.М. Дмитриев д.т.н., Д.В. Доронков, Д.В. Максянин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов к.т.н.**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, nevid000@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА различных модификаций.

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие решетки, перемешивающие решетки, гидродинамика теплоносителя.

Введение

АО «ОКБМ Африкантов» осуществляет разработку и проектирование ТВСА для реакторов типа ВВЭР-1000. Различные модификации кассет ТВСА характеризуются, как применением комбинированных дистанционирующих решеток (КДР) с размещением дефлекторов по схеме «закрутка», так и применением перемешивающих решеток (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [1].

Поскольку все модификации ТВСА являются бесчехловыми, перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними кассетами. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР, что обусловило необходимость проведения исследований межкассетного взаимодействия потока теплоносителя [2].

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР с различными кассетами ТВСА в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан аэродинамический стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, измерительный комплекс [3].

ЭМ представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР, включающий в себя сегменты различных кассет ТВСА с межкассетным пространством (МКП) и выполнена с соблюдением полного геометрического подобия.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: ЭВМ с программным обеспечением, пятиканальный пневмометрический зонд, блок аналоговых преобразователей давления.

Измерение вектора скорости потока теплоносителя осуществлялось пятиканальным пневмометрическим зондом. Предельные отклонения проекций абсолютной скорости на оси X, Y, Z не превышали 7% от абсолютной скорости.

Методика проведения исследований

Исследования проводились на ЭМ фрагмента активной зоны реактора ВВЭР и заключались в измерении локальных полей скорости пятиканальным пневмометрическим зондом в области МКП модели.

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в нижнем фрагменте твэльного пучка ТВСА

Анализ результатов исследований позволил заключить:

1. В области МКП ЭМ значение поперечной скорости ($w_y/\bar{w}$) перед КДР и ДР одинаково, и составляет 30% от среднерасходной скорости.
2. В зазорах между твэлами, прилежащими к МКП реализуется максимальный на данном фрагменте твэльного пучка ТВСА поперечный поток теплоносителя. Поперечная скорость ($w_y/\bar{w}$) перед КДР и ДР составляет 40% от среднерасходной скорости (рис. 1 а, б).

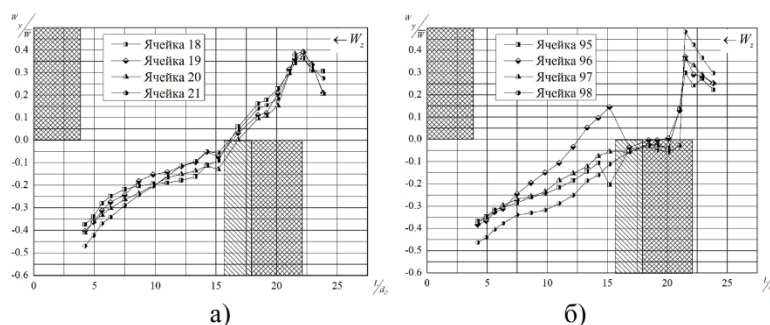


Рис. 1– Распределение поперечной скорости в ряду твэлов, прилежащем к МКП:
а – ТВСА с ПР; б – ТВСА с КДР

3. Глубина распространения возмущений потока в кассетах ТВСА, вызванных обтеканием ДР и КДР, ограничивается твэлами четвертого ряда.

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя в верхнем фрагменте твэльного пучка ТВСА

Основным отличием нижнего и верхнего фрагментов твэльного пучка ТВСА является применение в верхнем фрагменте ПР.

Анализ полученных данных позволил выявить влияние ПР на течение теплоносителя и заключить следующее:

1. В областях МКП, граничащих с ячейками ТВСА, где дефлектор ПР направлен в МКП, значение поперечной скорости ($w_y/\bar{w}$) достигает 30% от среднерасходной скорости, а в областях, граничащих с ячейками, где дефлектор направлен в глубь кассеты, 15% от среднерасходной скорости.
2. В зазорах между твэлами ТВСА, прилежащими к МКП, реализуется поперечный поток теплоносителя, который вызван обтеканием КДР. Значение поперечной скорости ($w_y/\bar{w}$) перед КДР составляет 50% от среднерасходной скорости (рис. 2 а, б).
3. На формирование потока теплоносителя за ПР, помимо поперечного потока, вызванного обтеканием ДР, оказывает влияние расположение дефлекторов ПР. В зазорах между твэлами ТВСА, прилежащих к МКП, где дефлектор направлен в МКП, поперечная скорость ($w_y/\bar{w}$) составляет 50% от среднерасходной скорости, а в зазорах между твэлами, где дефлектор направлен в глубь кассеты, 30% от среднерасходной скорости (рис. 2 а, б).

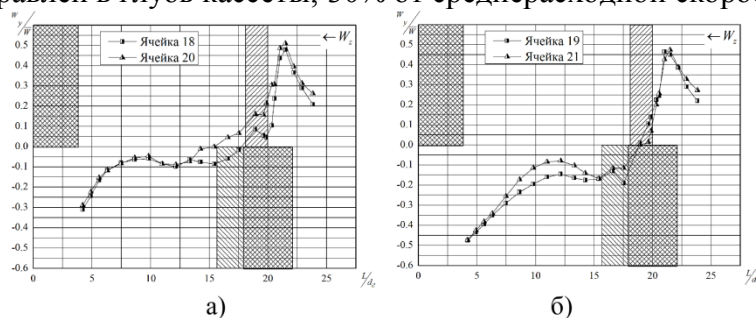


Рис. 2– Распределение поперечной скорости в зазорах между твэлами ТВСА, прилежащих к МКП: а – зазор, где дефлектор направлен в МКП; б – зазор, где дефлектор направлен в глубь кассеты

5. В зазорах между твэлами ТВСА, прилежащими к МКП, поперечная скорость ($w_y / \bar{w}$) перед КДР составляет 20% от среднерасходной скорости, а перед ДР 30% (рис. 3).

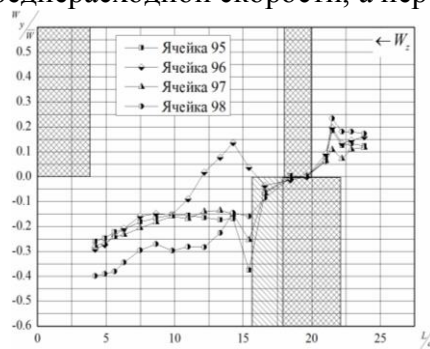


Рис. 3— Распределение поперечной скорости в ряду твэлов ТВСА, прилежащем к межкассетному пространству

6. Глубина распространения возмущений потока теплоносителя в ТВСА, при обтекании КДР, ограничивается четырьмя крайними рядами твэлов, а при обтекании ДР третьим рядом твэлов, что свидетельствует о интенсивном межкассетном взаимодействии, между соседними ТВСА.

Заключение

Комплексный анализ экспериментальных данных по исследованию межкассетного взаимодействия теплоносителя позволил заключить:

1. Максимальное значение поперечной скорости в нижнем и верхнем фрагментах твэльного пучка ТВСА реализуется в зазорах между твэлами, прилежащих к МКП. Значение поперечной скорости составляет $\approx 45\%$ от среднерасходной скорости.

2. Распространение возмущений потока теплоносителя в нижнем и верхнем фрагментах твэльного пучка ТВСА ограничивается четырьмя рядами твэлов. Данный факт говорит о высокой интенсивности перераспределения потока теплоносителя между соседними ТВСА.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы данных для верификации CFD-кодов и программ детального поэлементного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов с целью уменьшения консерватизма при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / — М.: Машиностроение. — 2013.
2. Баринев А.А., Бородин В.Е., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. — 2014. - №2. — С. 98-108.
3. Дмитриев С.М., Бородин С.С., Легчанов М.А., Солнцев Д.Н., Сорокин В.Д., Хробостов А.Е. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР // Атомная энергия.-2012. - Т 113. - Вып. 5. - С. 252-257.

05.02.00

**С.М. Дмитриев д.т.н., Д.В. Доронков, И.А. Малышева, А.Н. Пронин,
О.Б. Солдаткин к.т.н., А.Е. Хробостов к.т.н.**

Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, Proninaleksei@mail.ru

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГОБЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «КАНАЛ»

Представлены результаты и анализ экспериментальных и расчетных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, дистанционирующая решетка.

Введение

Одним из перспективных направлений развития атомного машиностроения являются атомные станции малой мощности, в частности плавучие атомные теплоэлектростанции (ПАТЭС). Энергоисточником такого плавучего энергоблока является реакторная установка КЛТ-40С. Генеральным конструктором реакторных установок данного типа является АО «ОКБМ Африкантов».

Обоснование теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора, во многом базируется на теплогидравлическом расчете, с использованием программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов. Однако эти программы требуют дополнительной верификации.

Целью настоящей работы является проведение расчёта аксиальной составляющей вектора скорости в программе «КАНАЛ»[1] и сравнения с экспериментальными значениями, полученными в НГТУ им. Р.Е. Алексеева при моделировании течения потока теплоносителя на аэродинамическом стенде [2,3].

Программа «КАНАЛ» предназначена для проведения поячеечного теплогидравлического расчета ТВС с твэлами стержневого типа активных зон водо-водяных реакторов в стационарных и квазистационарных режимах работы.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Для проведения расчёта была построена нестандартная область ТВС реактора КЛТ-40С, содержащая 168 ячеек, 78 твэлов-имитаторов, 6 имитаторов стержней выгорающего поглотителя и центральный вытеснитель. Ячейки образованы поверхностями стержней, кожухом ТВС и условными граничными плоскостями, проходящими через оси соседних твэлов (рис. 1).

В продольном сечении ТВС реактора КЛТ-40С была разбита на 32 расчетных высотных участка.

Основные параметры на входе в расчетную модель:

- Давление воздуха на входе в модель $P_{\text{воздуха}} = 1,0245$ бар;
- Расход воздуха через модель $G_{\text{воздуха}} = 5,245$ кг/с;
- Температура воздуха на входе в модель 26°C .

При выше обозначенных параметрах среднерасходная скорость в расчетной модели равна 34,6 м/с, что соответствует среднерасходной скорости в экспериментальной модели. Значение числа Рейнольдса в расчетной модели составило $Re = 88525$.

Ввиду того, что пластины ДР ТВС реактора КЛТ-40С по-разному затесняют проходное сечение ячеек ЭМ, все ячейки расчетной области были разбиты на 14 типов. Для каждого типа ячеек был проведён расчёт коэффициента местного сопротивления.

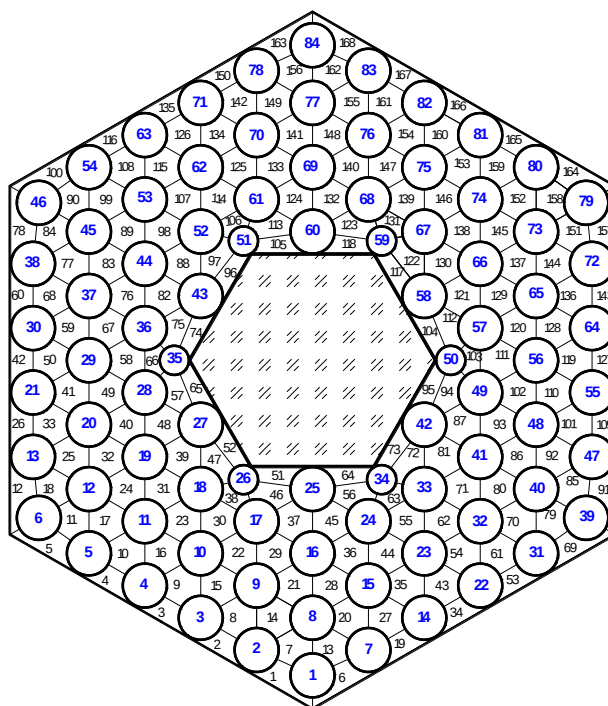
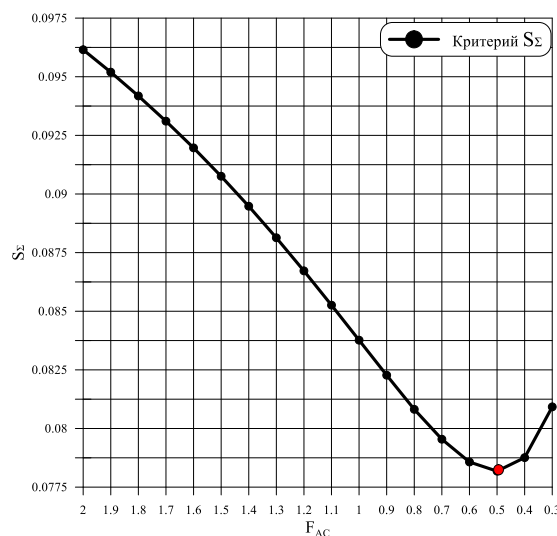


Рис. 1 – Схема расчетной области ТВС реактора КЛТ-40С

Для определения минимального отклонения расчетных и экспериментальных данных в модели ТВС реактора КЛТ-40С был введен критерий S_{Σ} , характеризующий среднеквадратичное отклонение между расчетными и экспериментальными значениями аксиальной составляющей вектора скорости. Графическое распределение критерия S_{Σ} представлена на рисунке 2.

Рис. 2 – График распределения критерия S_{Σ}

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ:

Анализ сходимости экспериментальных и расчетных значений аксиальной составляющей вектора скорости за ДР по длине модели ТВС реактора КЛТ-40С показал:

1. В ячейках с затеснением поперечного сечения пластинами ДР в виде «звезды» расчетное и экспериментальное распределение аксиальной составляющей вектора скорости по длине модели имеет различный характер (рис 3).

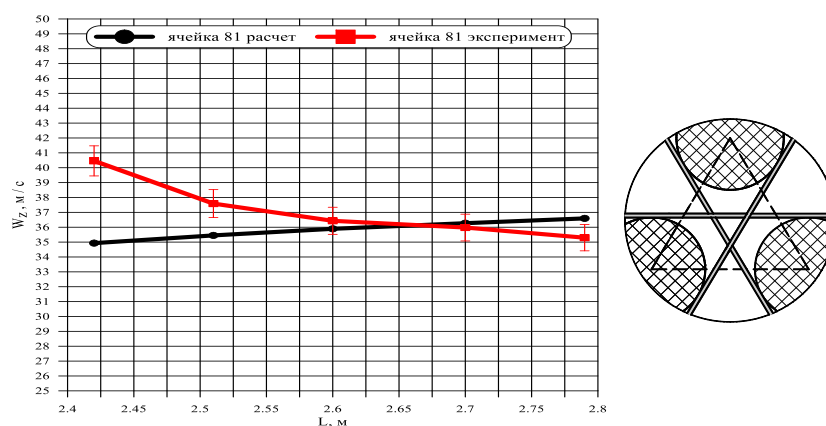


Рис. 3 – Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной составляющей вектора скорости для ячейки № 81 с затеснением поперечного сечения пластинами ДР в виде «звезды» ($W_{cp} = 34,6$ м/с)

2. В ячейках с затеснением поперечного сечения пластинами ДР в виде «треугольника» наблюдается совпадение характера расчетного и экспериментального распределения аксиальной составляющей вектора скорости (рис 4).

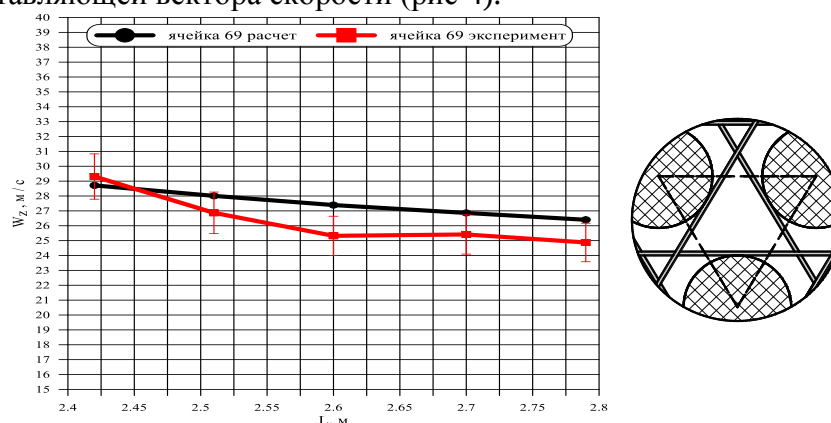


Рис. 4 – Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной составляющей вектора скорости для ячейки № 69 с затеснением поперечного сечения пластинами ДР в виде «треугольника» ($W_{cp} = 34,6$ м/с)

3. В выходном сечении модели ТВС реактора КЛТ-40С наблюдается схожий характер распределения расчетных и экспериментальных значений аксиальной составляющей вектора скорости для всех исследованных ячеек (рис 5).

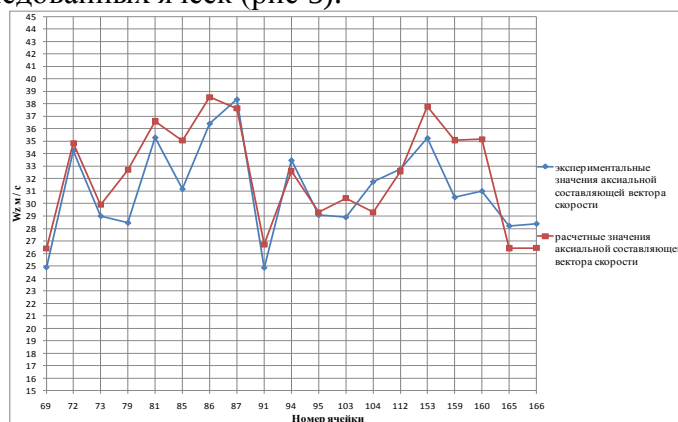


Рис. 5 – Расчетное и экспериментальное распределение аксиальной составляющей вектора скорости для всех исследованных ячеек в выходном сечении ЭМ ($W_{cp} = 34,6$ м/с)

Анализ полученных данных показал, что предельное отклонение расчётных и экспериментальных значений аксиальной составляющей вектора скорости по длине экспериментальной модели составило не более 15%.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Лукьянов В.Е., Самойлов О.Б. Обоснование корреляции для расчета критического теплового потока в тепловыделяющих сборках альтернативной конструкции с перемешивающими решетками-интенсификаторами для ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2012. №1. С. 99-108.
2. С.С. Бородин, А.В. Варенцов, А.А. Добров и др. Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками // Тепловые процессы в технике, 2015 №4 с.177-182
3. А.В. Варенцов, Д.В. Зяблицев, Д.Н. Солнцев и др. Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока в тепловыделяющих сборках реакторной установки плавучей атомной электростанции // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012 №3 (96) С. 118

05.02.00

С.М. Дмитриев д.т.н., Д.В. Доронков, А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, nevid000@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА ВВЭР С ТВСА-12 PLUS

Представлены результаты экспериментальных исследований течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-12 PLUS.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, межъячеечный массообмен, дистанционирующая решетка, перемешивающая решетка.

Введение

В АО «ОКБМ Африкантов» на протяжении многих лет проводятся работы по усовершенствованию конструкций активных зон водо-водяных ядерных реакторов в целом так и тепловыделяющих сборок (ТВС) в частности. Работы в этом направлении ведутся для решения следующих основных задач: повышение эксплуатационного ресурса активных зон, обеспечение геометрической стабильности конструкции ТВС и повышение их эксплуатационной надежности [1].

Одним из перспективных направлений решения поставленных задач является улучшение теплогидравлических характеристик ТВС. С этой целью была создана ТВСА-12 PLUS, которая характеризуется применением перемешивающих решеток (ПР) с размещением дефлекторов по схеме «порядная прогонка» [2].

Поскольку ТВСА-12 PLUS является бесчехловой, то перемешивание теплоносителя происходит не только в пределах одной кассеты, но и между соседними топливными сборками. Данное явление необходимо учитывать в процессе оценки и обоснования теплотехнической надежности активной зоны реактора ВВЭР [3], что обусловило необходимость проведения исследований закономерностей перераспределения потока при межкассетном взаимодействии между соседними ТВСА.

Экспериментальный стенд

Для исследования межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан аэродинамический экспериментальный стенд, представляющий собой разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. В состав стенда входят: вентилятор высокого давления, ресиверная емкость, экспериментальная модель (ЭМ), расходомерное устройство, система подачи и отбора трассера, измерительный комплекс.

ЭМ, представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВВЭР и включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА-12 PLUS и межкассетное пространство (МКП). ЭМ выполнена с соблюдением полного геометрического подобия и состоит из твэлов-имитаторов, уголков жесткости, ДР и ПР.

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят: газоанализатор, расходомер газа, ЭВМ с программным обеспечением, трубка Пито-Прандтля, блок аналоговых преобразователей давления [3].

Отбор проб трассера в газоанализатор осуществлялся с помощью отборного зонда выполненного в виде трубки Пито-Прандтля, с помощью которого также можно определить значение осевой скорости потока.

Методика проведения исследований

Для изучения межкассетного взаимодействия теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР применяется метод диффузии примесей. Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции. В качестве примеси

выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами и не приводит к искажению картины течения теплоносителя.

Методика проведения исследований заключалась в следующем: газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса ПР по ходу течения потока теплоносителя, с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемым поясом ПР в характерных сечениях по длине ЭМ, затем на основе полученных данных строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ. По полученным картограммам и графикам была выявлена картина течения потока теплоносителя.

Результаты исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВСА – 12 PLUS

Анализ результатов экспериментальных исследований позволил заключить следующее:

1. В области МКП происходит процесс вытеснения части потока теплоносителя из-под уголков жесткости (рисунок 1).

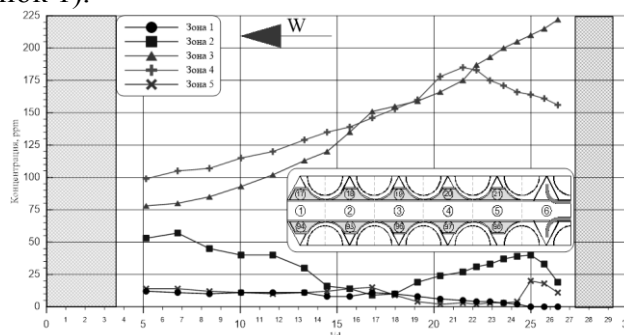


Рис. 1– Распределение концентрации трассера по длине ЭМ при подаче трассера в МКП

2. В области периферийного ряда твэлов, прилежащей к МКП, на движение потока теплоносителя помимо дефлекторов ПР оказывают влияние зубчатые края обода ПР. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода ПР совпадает.

3. Определено, что перераспределение потока теплоносителя из области МКП в соседние ТВСА-12 PLUS охватывает два периферийных ряда твэлов (рисунок 2).

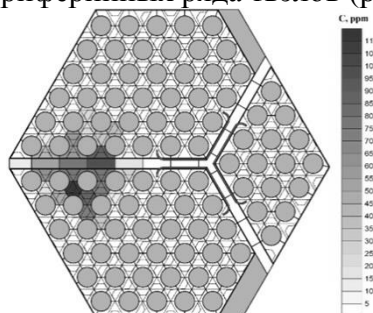


Рис. 2– Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера при подаче трассера в МКП

Анализ результатов исследований межкассетного взаимодействия между соседними ТВСА-12 PLUS при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты позволил заключить следующее:

1. Трассер из зоны подачи распространился в соседнюю кассету ТВСА-12 PLUS, охватив два периферийных ряда твэлов (рисунок 3). Данный факт говорит о "существенном" перераспределении теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя ТВСА-12 PLUS.

2. В области периферийного ряда твэлов ТВСА-12 PLUS наблюдается, направленное внутрь кассеты движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода ПР. Данное явление, негативно сказывается на

интенсивности межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними кассетами ТВСА-12 PLUS (рисунок 4).

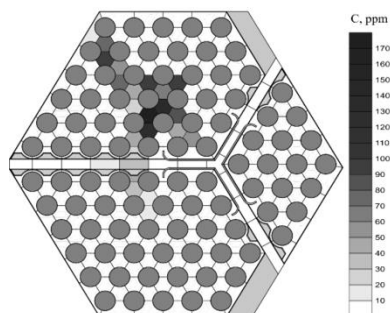


Рис. 3– Распределение концентрации трассера в выходном сечении ЭМ при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты

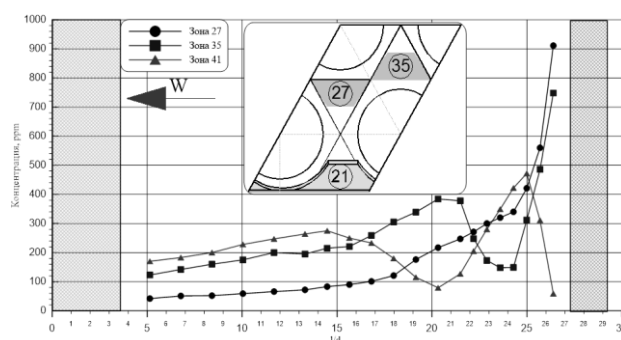


Рис.- 4 - Распределение концентрации трассера по длине ЭМ при подаче трассера в периферийную ячейку кассеты

Выводы

По результатам экспериментальных исследований межкассетного взаимодействия теплоносителя между соседними ТВС выявлено:

1. В области МКП происходит вытеснение части потока теплоносителя из-под уголков жесткости.

2. В области периферийного ряда твэлов кассет ТВСА-12 PLUS существует направленное движение потока теплоносителя, обусловленное соответствующим расположением зубчатых краев обода ПР.

3. Интенсивность массообменных процессов в области периферийного ряда твэлов кассет выше в тех ячейках, где ориентация турбулизирующих дефлекторов и зубчатых краев обода ПР совпадает.

4. Глубина распространения газа трассера из межкассетного зазора в соседние ТВСА охватывает область двух периферийных рядов твэлов.

5. При подаче пропана в периферийную ячейку ТВСА-12 PLUS, трассер распространился в соседнюю ТВСА-12 PLUS. Данный факт говорит о "существенном" перераспределении теплоносителя при межкассетном взаимодействии между двумя ТВСА-12 PLUS.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев, С.М. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах / С.М. Дмитриев [и.т.д.] – М.: Машиностроение. – 2013.
2. Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. - 2012. - Т.113. - Вып. 5. - С. 252-257.
3. Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками / А.В. Варенцов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. - №8. – С. 20-27.

05.02.00

С.М. Дмитриев д.т.н., И.В. Каратушина к.т.н., И.Ю. Ляхов к.т.н.,
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, Proninaleksei@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ В ТВС–КВАДРАТ

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реакторов PWR с поясами перемешивающих решеток различной конструкции.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен.

Введение

Важнейшим и перспективным направлением развития атомной энергетики в настоящем является создание реакторных установок, способных работать на более высоком уровне мощности и с повышенной безопасностью. Для решения этой задачи в ТВС–КВАДРАТ, разработанной для реакторов типа PWR, применяют специальные интенсификаторы теплообмена – перемешивающие дистанционирующие решетки различных типов.

Для обоснования теплотехнической надежности активных зон РУ PWR при постановке ТВС-КВАДРАТ с различными перемешивающими решетками необходимо определить влияние конструкции решеток на гидродинамику и массообмен потока теплоносителя. Учитывая сложность математического описания трехмерного течения жидкости в пучке твэлов, основным методом изучения массообмена и гидродинамики сборок и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полноразмерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах. Поэтому исследования локальных характеристик межъячеечного массообмена потока теплоносителя проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии газового трассера на масштабной экспериментальной модели (ЭМ), которая представляет собой фрагмент ТВС-КВАДРАТ реактора типа PWR. ЭМ выполнена в полном геометрическом подобии и состоит из квадратного чехла, двадцати пяти цилиндрических твэлов-имитаторов, поясов пластинчатых перемешивающих дистанционирующих решеток.

Пояс перемешивающей дистанционирующей решетки представляет (рис. 2) из себя квадратную пластинчатую решетку, набранную из взаимно перпендикулярных пластин. Верхние кромки пластин каждой перемешивающей дистанционирующей решетки снабжены дефлекторами. Исследования проводились на трех экспериментальных моделях с различными типами перемешивающих и дистанционирующих решеток, которые отличаются друг от друга дефлекторами (дефлектор 1, дефлектор 2, дефлектор 3).

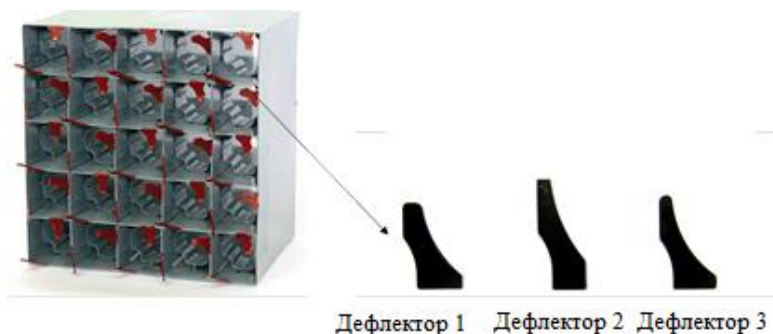


Рис. 1 – Исследуемый пояс экспериментальной модели и различные типы дефлекторов

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поперечное сечение экспериментальной модели условно разбивалось на элементарные ячейки. Газовый трассер, с заданным расходом, подается в ячейку инъекции до перемешивающей дистанционирующей решетки, после чего отслеживается его распределение по ячейкам в нескольких сечениях по длине ЭМ.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в модели фрагмента ТВС-К необходимо соблюдение равенства местного гидравлического сопротивления натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток и перемешивающих дистанционирующих решеток экспериментальной модели [1]. На рисунке 2 приведены зависимости коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих решеток экспериментальной модели от числа Re . Полученные значения соответствуют гидравлическому сопротивлению натуральных перемешивающих дистанционирующих решеток. На графиках видно, при числах $Re \sim 50000$ начинается зона автомодельного течения теплоносителя.

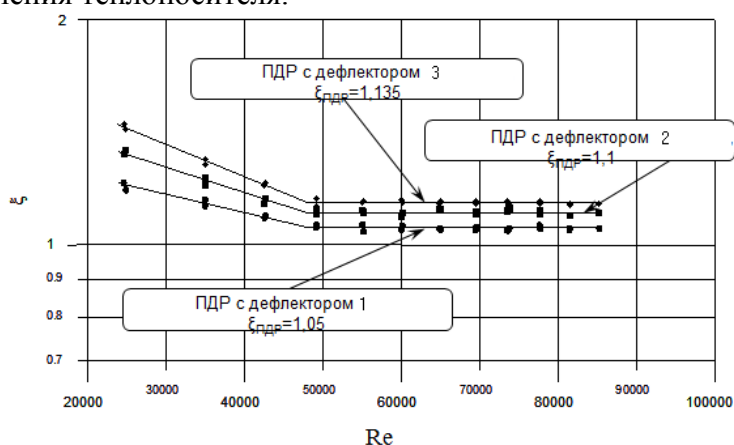


Рис. 2 – Зависимость коэффициента местного гидравлического сопротивления поясов перемешивающих дистанционирующих решеток от числа Re

Результаты исследований

Рассмотрев, как изменяется концентрация трассера из ячейки инъекции трассера в соседние ячейки, можно отметить, что за дефлекторами перемешивающей дистанционирующей решетки происходит направленное, постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов (Рис. 3).

Экспериментально определено, что не весь поток теплоносителя движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПДР, вследствие дополнительной турбулизации потока.

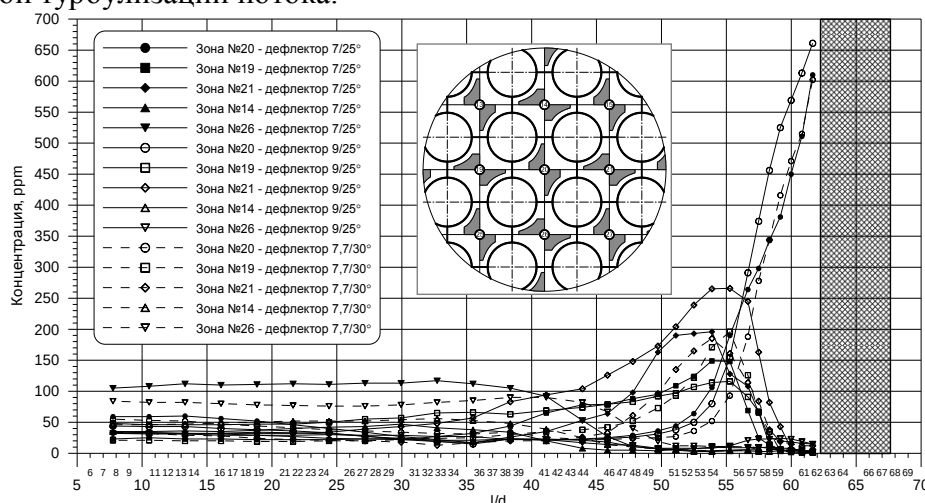


Рис. 3 – Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели для характерных зон при постановке ПДР с дефлекторами различных типов

За решеткой перемешивающие свойства ПДР снижаются вследствие уменьшения поперечных составляющих скорости, а интенсивность массообмена определяется степенью повышения турбулентности потока за решеткой. Наличие турбулентного трения приводит к диссипации энергии движения потока, что быстро уменьшает интенсивность поперечных конвективных течений, создаваемых дефлекторами решетки, но при этом сама исследуемая решетка создает достаточно высокую интенсивность перемешивания за счет конвективного переноса на выходе из ПДР.

Затухание возмущений массообменных процессов за перемешивающей дистанционирующей решеткой происходит на расстояниях:

- а) для ПДР с дефлектором 1 – $\Delta l/d=23-25$;
- б) для ПДР с дефлектором 2 – $\Delta l/d=25-27$;
- в) для ПДР с дефлектором 3 – $\Delta l/d=24-26$.

Эти значения соответствуют длинам затухания возмущений в ЭМ с поясом ПДР, в то время как затухание поперечных скоростей потока за турбулизирующими дефлекторами происходит на значительно меньшем расстоянии. Конвективные потоки, создаваемые дефлекторами, также турбулизируют течение за перемешивающей решеткой. Это способствует увеличению диффузионного массообмена за поясом ПДР.

На рисунке 4 показано распределение концентрации трассера в выходных сечениях по длине экспериментальной модели при постановке поясов ПДР. Из данных картограмм видно, что ПДР с дефлектором типа 925 имеет более равномерное распространение концентрации пропана в поперечном сечении ЭМ на значительном расстоянии от решетки.

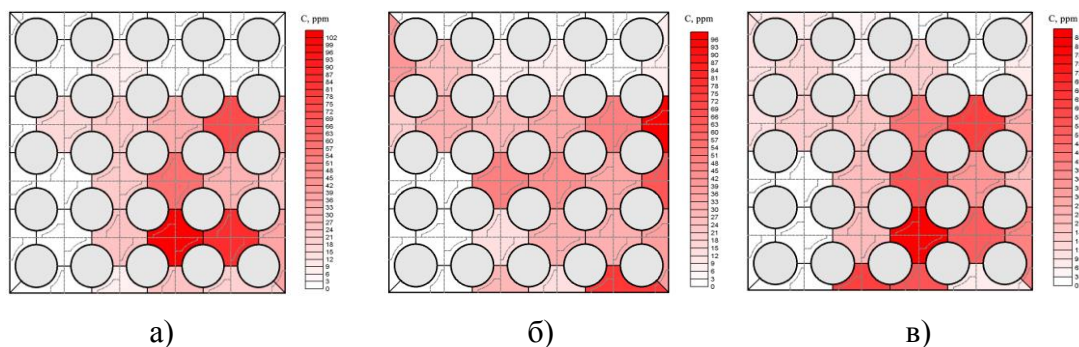


Рис. 4 – Картограмма распределения концентрации трассера в выходном сечении ЭМ (а – ПДР с дефлектором 1, б – ПДР с дефлектором 2, в – ПДР с дефлектором 3)

Полученные результаты используют для оценки эффективности перемешивающих дистанционирующих решеток, расчета коэффициентов турбулентного и эффективного межъячеечного массообмена в программах поячеечного расчета активных зон реакторов PWR и являются базой данных при расчетах теплотехнической надежности активных зон с ТВС-КВАДРАТ.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Варенцов А.В., Зяблицев Д.В., Пронин А.Н. и др. Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR/ Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2012 №4 (97), с. 160-167
2. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. Изд. 2-ое доп. и перераб.– М. Высшая школа, 1973 г.

05.02.00

**С.М. Дмитриев д.т.н., А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов,
М.А. Легчанов к.т.н., А. В. Котин**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции,
Нижний Новгород, aleks_may@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ANSYS CFX И ЛОГОС ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ВНУТРЕННЕЙ СПИРАЛЬНО НАВИТОЙ ТРУБОЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Представлены результаты численного моделирования на базе экспериментального исследования гидродинамических характеристик однофазного закрученного потока воздуха в кольцевом канале, выполненном по принципу «труба в трубе» с внутренней спирально навитой трубой.

Ключевые слова: численное моделирование, вычислительная гидродинамика, турбулентная вязкость, математическая модель, уравнения Навье-Стокса.

Введение

Исследование особенностей процессов гидродинамики является важным этапом, как при проектировании конструкций теплообменных аппаратов, так и на стадии обоснования эксплуатационных параметров и режимов работы ЯЭУ. Особое внимание вызывают внутренние закрученные течения жидкости и газа, которые ввиду своих специфических особенностей получили широкое применение в современном теплоэнергетическом оборудовании [1]. Одним из наиболее эффективных способов закрутки потока, с точки зрения интенсификации теплообмена, является использование каналов, выполненных по принципу «труба в трубе», с внутренней спирально навитой трубой. Применение каналов такой конструкции в высоконапряженном теплообменном оборудовании, в частности в парогенераторном блоке ядерных энергетических установок малой мощности, обеспечивает интенсификацию процессов теплопереноса как со стороны греющей, так и нагреваемой сред, что позволяет существенно уменьшить массу и габариты установки и повысить технико-экономические показатели в целом [2]. Создание надежной расчетной модели для анализа реализованного в данном канале течения на базе CFD методов с использованием современных наукоемких информационных технологий является весьма актуальной задачей как с научной, так и с практической точки зрения.

Для решения данной задачи в научно-исследовательской лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева был проведен комплекс расчетно-экспериментальных исследований.

Описание объекта и цели исследования

Экспериментальное исследование было проведено на стенде, представляющем собой аэродинамически разомкнутый контур, через который прокачивается воздух.

Экспериментальная модель, представленная на рисунке 1, состоит из обсадной трубы (1) с внутренним диаметром 57 мм, оборудованной координатометром с установленным в нем термоанемометром (5) для замеров скорости и угла набегания потока, отборами статического давления (3) и (4) и специальным транспортиром с нитяным датчиком. Исследования проводились на модели с внутренней спирально навитыми вытеснителем (2) с наружным диаметром 40 мм и с шагом навивки 200 мм.

В результате эксперимента были получены гидравлическое сопротивление канала и распределения осевой и тангенциальной составляющей скорости однофазного закрученного потока в диапазоне чисел $Re=4 \times 10^3 \div 10^5$. Замеры скорости проводились по радиусу канала от стенки внутренней трубы с шагом изменения азимутального угла 45° .

Для проведения расчетного исследования использовался отечественный код ЛОГОС 4.0.6 и коммерческое ПО ANSYS CFX 14.

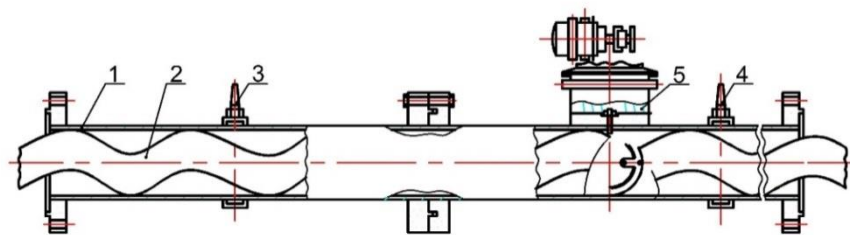


Рис. 1 - Экспериментальная модель

Математическая модель

Для анализа многих аэродинамических течений, ввиду своей относительной простоты и возможности получения достаточно точных результатов, положительно зарекомендовала себя однопараметрическая модель Спаларта-Аллмареса (SA). Данная модель получила реализацию в программном коде ЛОГОС и была использована для проведения расчетов в данной работе.

Для проведения расчета в ANSYS CFX была выбрана модель BSL RSM (Reynolds Stress Model BaseLine). Данная модель предполагает совместное решение уравнений, соответствующих модели Ментера $k-\omega$ BSL, и дополнительных дифференциальных уравнений переноса для Рейнольдсовых напряжений [3,4].

Расчетная модель

На основании упрощенной геометрии исследуемого канала была сгенерирована сеточная модель, содержащая 7,2 млн элементов и 6,9 млн. расчетных узлов. Поперечное сечение разработанной гексаэдрической сетки представлен на рисунке 2.

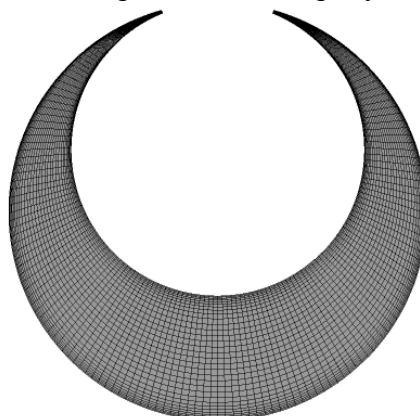


Рис. 2 - Поперечное сечение гексаэдрической сетки

Расчеты проводились в стационарной постановке с использованием модели идеального газа (Air Ideal Gas) для описания свойств рабочей среды. Свойства среды, соответствующие эксперименту, были заданы плотностью и динамической вязкостью. Граничные условия задавались на соответствующих поверхностях геометрической модели исходя из режимных параметров экспериментальных исследований. На входе в расчетную область задавалась нормальная составляющая скорости, на выходе из расчетной области - относительное (избыточное) давление равное 0 кПа, на остальных поверхностях - условия непроницаемости и прилипания.

Результаты расчетного исследования

Наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных профилей скорости в поперечном сечении канала получено для осевой составляющей, как при использовании модели SARC, так и модели BSL RSM. Важно отметить схожий характер распределений, полученных на обеих моделях. Качественные отличия расчетных профилей отмечаются на углах 135° и 225° , при этом ближе к экспериментальным данным находятся значения, соответствующие модели BSL RSM. На рисунке 3 приведены характерные расчетные и экспериментальные распределения относительных осевой и тангенциальной составляющих скорости (R - относительный радиус).

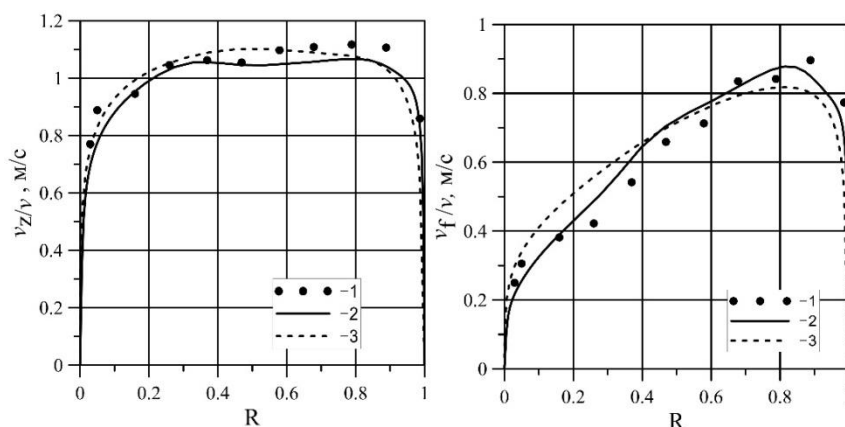


Рис. 3 - Распределение в радиальном направлении канала для азимутального угла 180° и среднерасходной скорости $\bar{v}=17,4$, м/с а) осевой составляющей скорости v_z , и б) тангенциальной составляющей скорости v_f ; 1- эксперимент; 2-BSL RSM; 3- SARC

На рисунке 4 представлены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления ξ канала от числа Re.

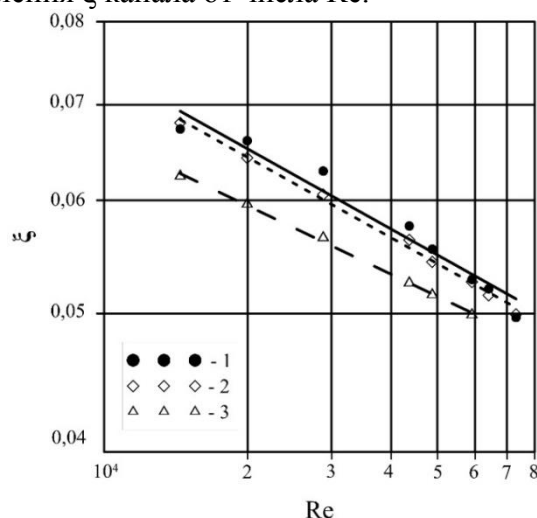


Рис. 4 - Экспериментальные и расчетные зависимости коэффициента гидравлического сопротивления; 1- эксперимент; 2-BSL RSM; 3- SARC

Для достижения необходимой точности расчета на модели BSL RMS производилось варьирование коэффициента β^* (BetaStar), входящего в соотношение корреляции давления и скорости деформации в уравнении для тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и отвечающего за перераспределение энергии между компонентами тензора. Полученная зависимость ξ от коэффициента β^* , позволила определить его необходимое значение равное 0,07 и провести расчеты во всем диапазоне исследуемых режимов. В результате CFD-моделирования на модели BSL RMS были получены расчетные величины ξ , отличающиеся от экспериментальных, не более чем на 3%. Модель SARC также позволила получить приемлемые результаты: отклонение от эксперимента не превысило 8%.

Заключение

Полученные в результате расчета поля скорости позволили построить профили ее осевой и тангенциальной составляющих по сечению канала в направлении различных азимутальных углов. Распределения скорости, полученные на моделях турбулентности RSM BSL и SARC, имеют схожий характер с качественным отличием, наблюдаемым на углах 130° и 225° . Обе модели показали наилучшее совпадение для осевой составляющей скорости. На основании распределений статического давления по длине канала были определены зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления. Для достижения необходимой точности расчета был определен параметр β^* модели BSL RMS равный 0,07. Отклонение расчетных значений коэффициента гидравлического сопротивления от эксперимента составило: модель BSL RSM – не более 3%, модель SARC – не более 8%.

Достаточное согласование данных численного исследования с экспериментальными позволяет судить о применимости использованной расчетной модели для проведения гидродинамических расчетов каналов с внутренней спиральнонавитой трубой, в частности теплообменных каналов перспективных реакторных установок.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок / О.В. Митрофанова. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с
2. Будов В.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
3. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений / Снегирёв А.Ю. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
4. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide/ ANSYS Inc. – ANSYS CFX Release 14, ed. Canonsburg, Pennsylvania, 2013

05.02.00

А.А. Добров, К.А. Мартынова, А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, a.a.dobrov@yandex.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРА PWR С ПРИМЕНЕНИЕМ КОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ

В настоящей статье представлены результаты моделирования процессов теплопереноса в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за дистанционирующими решетками, снабжёнными дефлекторами перемешивающего типа. Расчеты проводились в программном комплексе Ansys CFX. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции ПР и повышения ее эффективности.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплогидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

Использование дистанционирующих и перемешивающих решеток (ДР и ПР) в современных конструкциях ТВС приводит к созданию локальных возмущений потока, а именно к отклонению направлений составляющих скорости теплоносителя, изменению их турбулентных характеристик, а также локальных процессов переноса импульса и тепла [1-3]. Это необходимо учитывать при обосновании теплогидравлики активной зоны реакторной установки (РУ), так как все эти эффекты могут в значительной мере влиять как на величину критического теплового потока, а, следовательно, на условия выбора мощности РУ, так и на гидравлическое сопротивление ТВС. Одним из эффективных инструментов для выбора формы перемешивающих решеток ТВС еще до изготовления является вычислительная гидродинамика.

Постановка цели и задач, решаемых при выполнении исследования

Постановка задач исследования:

- 1) моделирование течения теплоносителя в ТВС с ПР с заданным энерговыделением, соответствующим реальным условиям эксплуатации;
- 2) оценка эффективности решёток различной конструкции на основе полученных данных.

В данной работе как наиболее важные с точки зрения теплогидравлики были выбраны следующие критерии:

- 1) *Относительное число Нуссельта (Nu/Nu_0)* – критерий, характеризующий изменение интенсивности теплоотдачи в ТВС за счет установки ПР, где Nu – относительное число Нуссельта решетки с соответствующим типом дефлекторов, Nu_0 – относительное число Нуссельта решётки без дефлекторов;
- 2) *Распределение температуры на поверхности твэла* – критерий, характеризующий неравномерность температуры стенки твэла.

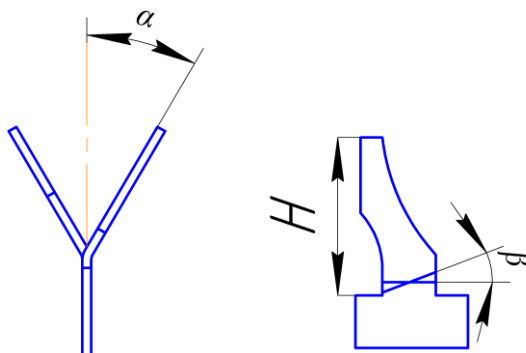


Рис. 1- Геометрические характеристики дефлекторов ПР

В расчётах проводилось исследование дефлекторов с изменением следующих геометрических параметров: угол отгиба дефлектора (α), высота дефлектора (H), угол наклона линии сгиба (β) (рис. 1).

Модель фрагмента ТВС с перемешивающей решеткой, построенная для данного исследования, в поперечном сечении представляет собой расчетную область, образованную четырьмя гидравлическими ячейками ТВС, а в длину соответствует одному пролету между ДР.

Описание расчетной модели исследования

Характеристики расчетной сетки приведены в табл. 1.

Таблица 1- Характеристики расчетной сетки

Максимальный размер элемента, мм	0.4
Число элементов, млн.	8
Число призматических слоёв	20

Методика проведения CFD-моделирования включает в себя, прежде всего, задание следующих граничных условий:

- 1) скорости теплоносителя на входе в модель, равной 4.5 м/с и соответствующей числу $Re = 500000$ (задавался профиль скорости при стабилизированному течению теплоносителя в пучке стержней);
- 2) температуры теплоносителя на входе, равной 308° С;
- 3) давления в модели, составляющего 15.7 МПа;
- 4) теплового потока на поверхности твэлов, равного 657000 Вт/м²;
- 5) свойств теплоносителя по заданным температуре и давлению.

Выбранная модель турбулентности – BSL-RSM (модель рейнольдсовых напряжений) – позволяет учесть анизотропию турбулентности. Кроме того, задавались периодические граничные условия, что позволило смоделировать бесконечно большой в поперечном сечении пучок твэлов.

Результаты исследований

В результате исследований были получены данные о влиянии геометрических параметров на критерии, выбранные для оценки различных конструкций ПР с точки зрения эффективности теплоотдачи.

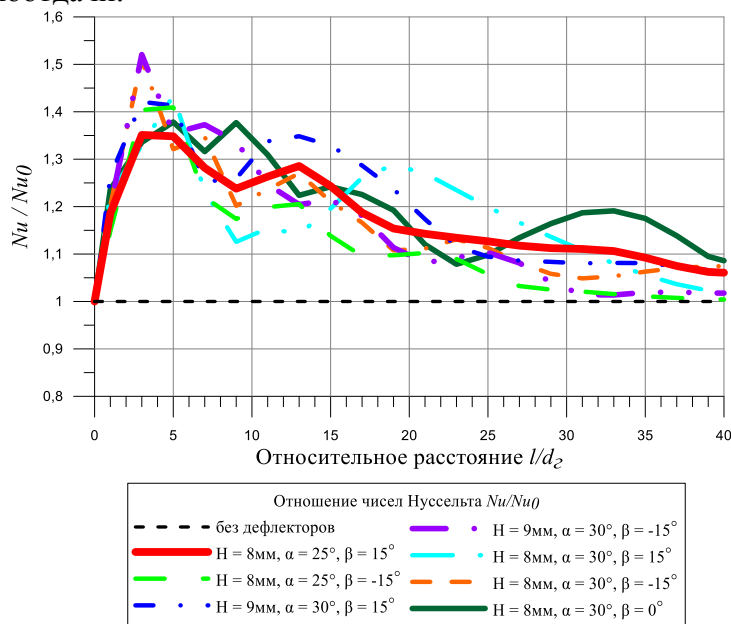


Рис. 2- График относительного числа Нуссельта по высоте ТВС за решёткой

На рис. 2 представлен график относительного числа Нуссельта по высоте ТВС за решеткой. Для всех рассмотренных дефлекторов наблюдается рост интенсивности теплоотдачи сразу за ПР, максимум которой приходится на расстояние от 3 до 5 гидравлических диаметров (d_2), после чего происходит снижение эффективности. Наиболее

оптимальным по данному критерию является дефлектор высотой 8 мм, углом $\alpha = 30^\circ$ и углом $\beta = 0^\circ$, характеризующийся существенным увеличением интенсивности теплоотдачи на расстоянии $l/d_2 = 28 \div 37$ за ПР. Кроме того, изменение угла наклона линии сгиба в направлении от твэла отрицательно влияет на эффективность теплоотдачи.

На рис. 3 представлено распределение температуры по периметру твэла на расстоянии $20 d_2$ за решеткой. Очевидно, что дефлекторы приводят к искажению профиля температуры, причем появляются области, где температура становится выше, чем за ПР без дефлекторов, что может быть вызвано локальным уменьшением скорости теплоносителя. Но в то же время средняя температура твэла уменьшается по сравнению с решеткой без дефлекторов.

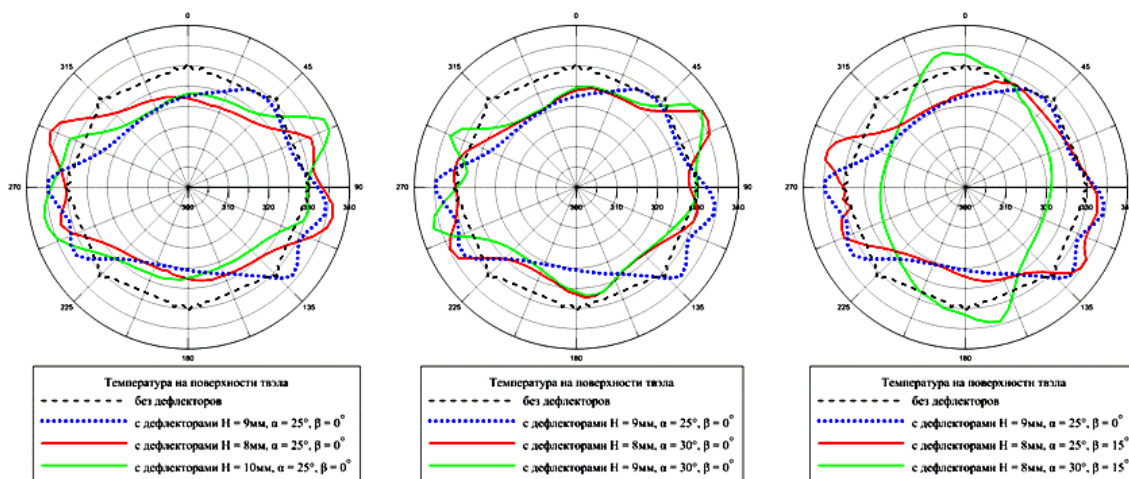


Рис. 3- Распределение температуры по периметру твэла в сечении $l/d_1=20$

Заключение

На основании комплексного анализа приведенных расчетных исследований был сделан вывод, что наиболее оптимальным с точки зрения теплопередающих свойств является дефлектор высотой 8 мм, углом отгиба $\alpha = 30^\circ$ и углом наклона линии сгиба $\beta = 0^\circ$, характеризующийся из рассматриваемых вариантов наибольшим значением числа Нуссельта, а также равномерным распределением температур по поверхности твэлов в различных сечениях.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

- 1 Варенцов, А.В., Доронков Д.В., Илютина, Е.М. и др. Особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов // Труды НГТУ – 2015. - №3(110). – С. 134-143
- 2 Арсенов, П.В., Добров, А.А., Доронков, Д.В. Исследования закономерностей течения теплоносителя за перемешивающей решеткой с различными типами дефлекторов в области направляющего канала ТВС-Квадрат // Труды НГТУ – 2015. - №4(111). – С. 126-135
- 3 Самойлов, А.Б. и др. Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с перемешивающими решетками // Атомная энергия. – 2014. - Т. 116, вып. 1.

05.02.00

А.А. Добров, Ю.А. Фадеева, А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, julia_fadeeva@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ В ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD-КОДОВ

В данной статье приводятся результаты моделирования гидравлических процессов в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за дистанционирующими решётками с дефлекторами перемешивающего типа. Полученные результаты используются для уточнения гидравлических характеристик потока теплоносителя при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплогидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В современных конструкциях ТВС могут применяться перемешивающие решетки (ПР), которые создают дополнительное поперечное движение теплоносителя. Это может приводить, с одной стороны, к увеличению коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи, с другой, - к увеличению гидравлического сопротивления ТВС, что необходимо учитывать при обосновании теплотехнической надежности активной зоны.

Постановка цели и задач исследования

Задачи:

- 3) моделирование течения теплоносителя в ТВС с помощью CFD-кодов;
- 4) анализ эффективности решёток различной конструкции на основании результатов исследований.

В данной работе как наиболее важные с точки зрения теплогидравлики были выбраны следующие критерии:

3) *Относительный коэффициент гидравлического сопротивления (КГС) (ξ/ξ_0)* – критерий, характеризующий изменение гидравлического сопротивления ДР за счет установки не нее дефлекторов, где ξ – относительный КГС решётки с соответствующим типом дефлекторов (ПР), ξ_0 – относительный КГС решетки без дефлекторов (ДР) [1];

4) *Поперечная относительная скорость в межствельном зазоре* – критерий, характеризующий поперечное течение теплоносителя из ячейки.

В расчетах проводилось исследование дефлекторов с изменением следующих геометрических параметров [2]: угол отгиба дефлектора (α), высота дефлектора (H), угол наклона линии сгиба (β) (рис. 1).

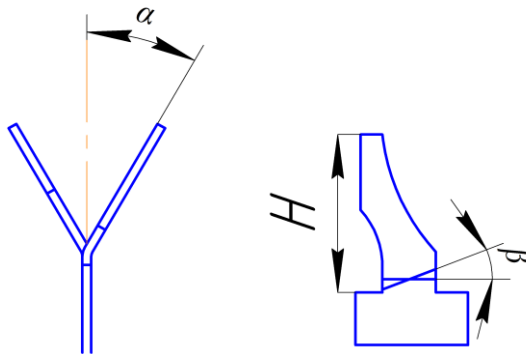


Рис. 1- Варьируемые геометрические параметры

Описание расчетной модели и методики исследования

При проведении расчетов задавались условия и свойства теплоносителя, соответствующие натурным условиям работы ТВС в реакторе:

- среднерасходная скорость 4.5 м/с (число $Re = 500000$);
- температура на входе в расчетную область 308 °С;
- давление 16 МПа.

Для моделирования турбулентности использовалась модель рейнольдсовых напряжений, которая позволяет учесть анизотропию турбулентности.

Результаты исследований

На рис. 2 представлен график зависимости КГС от угла наклона линии сгиба.

КГС ПР в большей степени зависит от угла наклона дефлектора α . При изменении α от 25° до 30° КГС увеличивается примерно на 20%. Причем это характерно для всех рассмотренных высот дефлекторов. Изменение угла β от нуля приводит к незначительному снижению величины КГС.

Таким образом, с точки зрения КГС из рассмотренных лучшим является дефлектор $H = 8$ мм, $\alpha = 25^\circ$, $\beta = -15^\circ$.

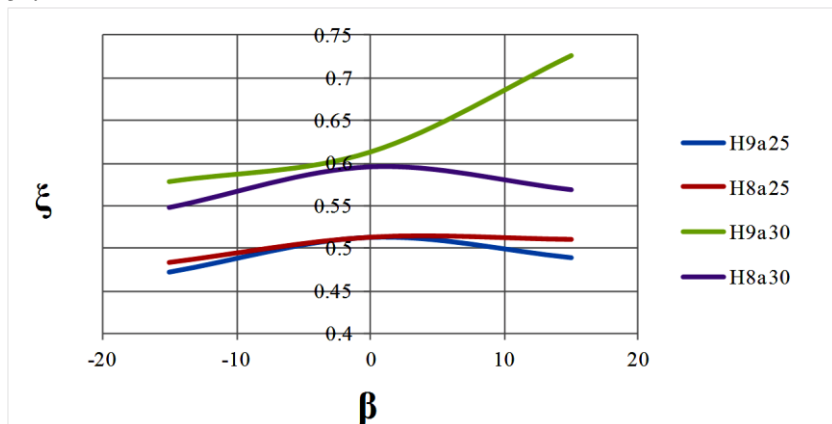


Рис. 2- График изменения относительного КГС от угла наклона линии сгиба

Рис. 3 показывает график относительной поперечной скорости по высоте ТВС за решеткой. Наибольшие значения данного параметра на максимальном удалении за ПР наблюдаются у решеток с дефлекторами высотой 8 мм и углом отгиба 25 и 30 градусов.

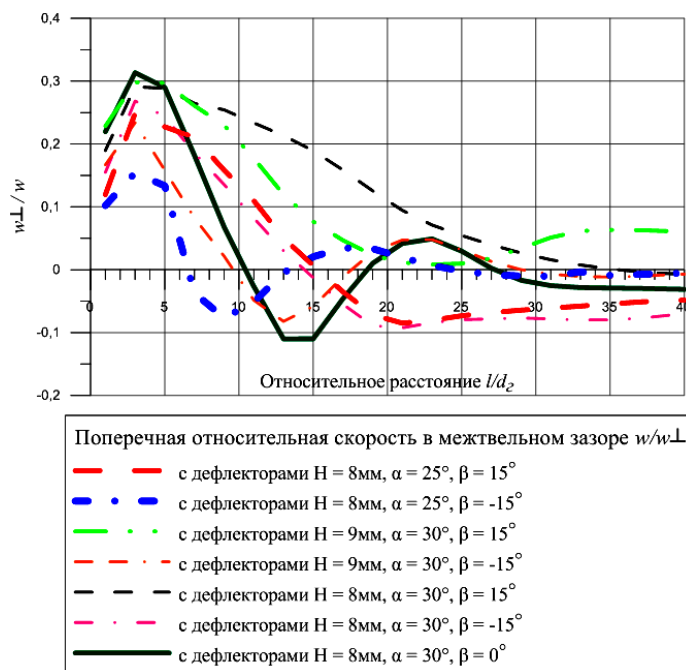


Рис. 3- График относительной поперечной скорости по высоте ТВС за решеткой с рассматриваемыми дефлекторами

Заключение

На основании анализа результатов расчетных исследований можно сделать вывод, что наиболее оптимальным по совокупности рассмотренных критериев гидродинамической эффективности является дефлектор **H8a25b15**. При данных геометрических параметрах поток теплоносителя за дефлекторами приобретает поперечную скорость, которая сохраняется на расстоянии до 30 гидравлических диаметров. При этом величина КГС является одной из наименьших для рассмотренных вариантов.

Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

- 1 *Варенцов, А.В., Доронков Д.В., Илютина, Е.М. и др.* Особенности течения теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов // Труды НГТУ – 2015. - №3(110). – С. 134-143
- 2 *Носков, А.С., Фальков, А.А., Шипов, Д.Л.* Применение CFD кода для анализа эффективности смесительных дефлекторов решеток ТВС / Сборник докладов 8-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск – 2013

05.02.00

Г.В. Ильиных, О.Ю. Сметанников

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАЛОЖЕНИЯ СЕТКИ

Представлен анализ использования технологии наложения сеток (Immersed solid) для моделирования работы шестеренного насоса в нестационарной постановке. С целью определения оптимальных параметров численного решения проведен ряд численных экспериментов по образованию кавитационных зон при течении воды в трубке с местным сопротивлением. Исследованы зоны кавитации, возникающие в ходе работы насоса. Проведена верификация численной модели.

Ключевые слова: ANSYS CFX, течение с изменяемой геометрией, Immersed solid, шестеренный насос, уравнения Навье-Стокса, кавитация.

Введение. Экстремальные режимы работы шестеренных насосов связаны с эрозионным износом деталей. Причиной этого служит явление кавитации, исключение или минимизация которого возможно, в частности, с помощью изменения внутренней геометрии насоса. В работе рассмотрена технология наложения сеток, используемая в совокупности с методом конечных объемов для выявления зон парообразования в процессе нестационарной работы шестеренного насоса. Преимущество такого метода, по сравнению, например с методом деформируемых сеток, заключается в исключении проблем перестроения сетки при минимальных зазорах между шестернями и корпусом, а также деформацию границ [1]-[4]. Метод наложения сеток (технология Immersed solid в Ansys CFX) в основном используется для упрощения модели за счет замены общей сетки, представляющей собой свободное пространство течения жидкости и (или) газа, парой сеток. Основная сетка занимает всю рабочую зону насоса с неподвижными границами. Движущиеся детали представляются конечно-объемными сетками, внедренными в основную сетку. Балансовые соотношения решаются как на общей, так и на наложенных сетках, а для стыковки решений осуществляется интерполяция искомых полей с общей сетки на наложенную и обратно [5]. Отсутствие твердой стенки, с одной стороны, вносит погрешность в решение при проникновении потока внутрь накладываемой сетки, с другой – это проникновение сглаживает экстремальные условия потока вблизи запертых объемов и улучшает сходимость решения.

Математическая модель. Полная система уравнений с учетом k-ε модели турбулентности для фазы α, решаемая в ANSYS CFX для моделирования рассматриваемых в данной работе задач включает:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_j) = 0, \quad (1)$$

уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho^\alpha U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff}^\alpha \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad (2)$$

уравнения для турбулентной кинетической энергии и энергии диссипации:

$$\frac{\partial (\rho^\alpha k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu^\alpha + \frac{\mu_t^\alpha}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho^\alpha \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho^\alpha \varepsilon)}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu^\alpha + \frac{\mu_t^\alpha}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho^\alpha \varepsilon), \quad (4)$$

$$P_k = \mu_t^\alpha \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3 \mu_t^\alpha \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho^\alpha k \right), \quad (5)$$

турбулентная вязкость связана с k и ε следующим образом:

$$\mu_t^\alpha = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где P – давление; U – вектор скорости; ρ – плотность; $\mu_{eff}^\alpha = \mu^\alpha + \mu_t^\alpha$ – эффективная вязкость; μ_t^α – турбулентная вязкость; C_{z1} , C_{z2} , σ_k , σ_ε – константы; C_μ – константа в k - ε модели.

В зоне наложения сетки объекта D на основную в уравнения импульса добавляются компоненты $S_i = \gamma \beta C (U_i - U_i^F)$, где $\beta = \begin{cases} 1, & x \in D \\ 0, & x \notin D \end{cases}$, где γ – масштабный коэффициент,

устанавливающий баланс между точностью и сходимостью решения; C – коэффициент источника импульсов; U_i^F – скорости в погруженном объеме.

Образование кавитации моделируется с помощью уравнения Рэлея-Плессета:

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho R_B} = \frac{P_v - P}{\rho}, \quad \text{где } R_B \text{ – радиус пузырька; } P_v \text{ – давление}$$

насыщенных паров; σ – коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

Выбор параметров численного решения. Проведен на основе тестовой задачи стационарного течения жидкости в трубе с коническим кавитатором. Кавитатор моделировался в двух вариантах: в виде жесткой стенки (эталонное решение) и в виде погруженного домена Immersed solid. Исследованы два метода интерполяции переменных конвективных слагаемых в (1)-(2) и переменных в уравнениях турбулентности (3)-(4), используемые в Ansys CFX, а именно Upwind и High Resolution (HR). Также было рассмотрено влияние на решение коэффициента источника импульсов C . Решения в различных конфигурациях сравнивались с эталонным решением модели с твердыми стенками (№1). В качестве критериев оценки использованы выражения

$$k_V = \left| \frac{V_{\max}^i - V_{\max}^1}{V_{\max}^1} \right| \times 100\%, \quad k_{\Delta P} = \left| \frac{\Delta P^i - \Delta P^1}{\Delta P^1} \right| \times 100\% \quad \text{и} \quad k_\psi = \left| \frac{\psi^i - \psi^1}{\psi^1} \right| \times 100\% \quad \text{для сравнения}$$

значений максимальной скорости, падения давления и коэффициента объемного содержания

пара соответственно, а также комплексный критерий $k = \frac{k_V + k_{\Delta P} + k_\psi}{3}$. Результаты

исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Исследование характеристик численного решения

№	Конвективные слагаемые	Турбулентность	C	$V_{\max}$, м/с	k_V , %	ΔP , кПа	k_P , %	ψ	k_ψ , %	k , %
1	HR	HR	-	18.67	-	92.06	-	0.55	-	-
2	HR	Upwind	10	18.25	2.26	91.17	0.96	0.11	80.28	27.83
3	Upwind	HR	10	18.23	2.38	88.59	3.76	0.49	11.88	6.01
4	HR	HR	10	18.27	2.19	91.45	0.65	0.10	81.19	28.01
5	HR	HR	10	18.27	2.18	89.49	2.78	0.56	0.77	1.91
6	HR	HR	5	18.26	2.23	89.33	2.96	0.51	8.37	4.52
7	HR	HR	15	18.28	2.10	89.67	2.60	0.55	0.53	1.74
8	HR	HR	20	18.22	2.42	88.72	3.62	0.49	11.54	5.86

В случаях 2 и 4 наблюдается неверное качественное распределение фазы пары. Подобран оптимальный набор №7, максимально приближающий решение к эталонному. Показано, что модель с накладываемой сеткой корректно описывает конфигурацию кавитационных зон. Также была отмечена устойчивость численного решения модели с накладываемой сеткой. Оба варианта задачи были верифицированы с помощью экспериментальных данных об обтекании конического кавитатора, полученных при аналогичных параметрах течения.

Моделирование работы шестеренного насоса. Трехмерная модель насоса приведена на рис. 1. Рассмотрены три режима, соответствующие частотам вращения 7480 об/мин, 7020 об/мин и 2580 об/мин. На входе и выходе заданы значения избыточного давления P_{inp} и P_{out} . Подбор инструментов численного решения был произведен с учетом табл. 1. Для дискретизации по времени использовалась схема второго порядка.

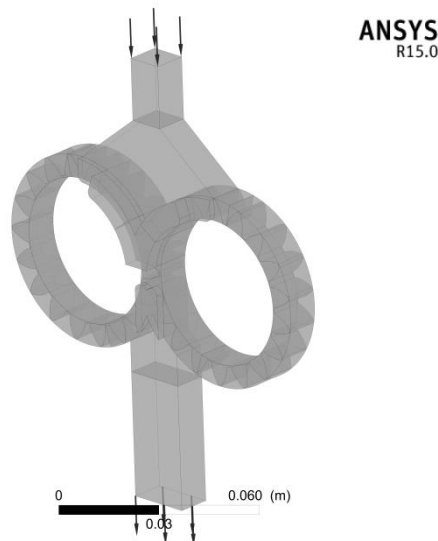


Рис. 1 - Расчетная модель шестеренного насоса

Для каждого режима получено численное решение, соответствующее стационарной работе насоса. На рис. 2 показано, что использование наложения сеток позволяет описать появление запертых объемов с характерными зонами повышенного и пониженного давления. При этом давление достигает значений насыщенных паров $P = -1.01$ МПа.

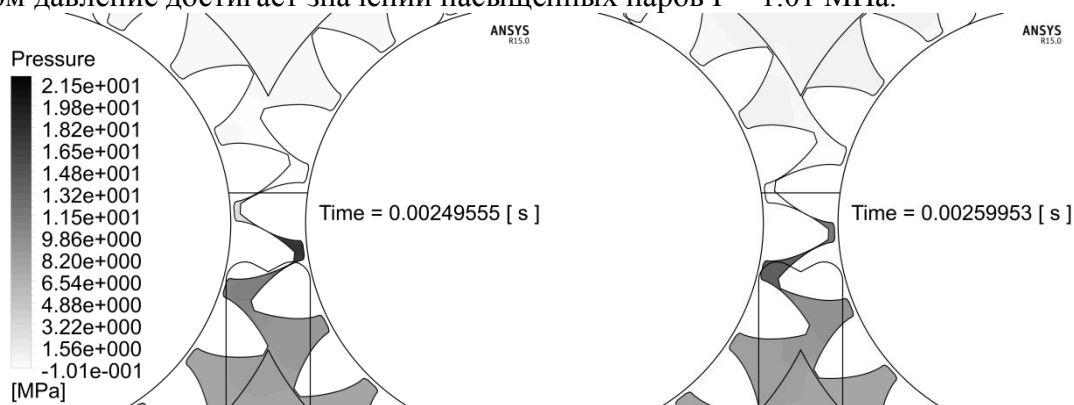


Рис. 2 - Появление запертых объемов, режим 1

Давление в зоне над запертыми объемами падает ниже уровня давления насыщенных паров, что приводит к появлению кавитации. Локальные зоны с максимальным содержанием пара находятся вблизи рабочих поверхностей зубьев, при этом концентрация пара для режимов 1 и 2 достигает 60% и 69% соответственно. В третьем режиме кавитация отсутствует. Из рис. 3 видно, что расчетная зона максимального уровня кавитации находится в центре рабочей поверхности зубьев, что соответствует данным натурных испытаний (рис. 4). В то же время наблюдаемые дефекты расположены только на одной из сторон зуба (рис. 4), соответствующей контакту ведущего и ведомого колес, тогда как расчет предсказывает их наличие с обеих сторон. Это связано с тем, что в численном аналоге между контактными

поверхностями всегда остается минимальный зазор, что приводит к периодической «смене роли» ведущей и ведомой шестерен. Ввод в модель различия между ведущей и ведомой шестернями может быть реализован на этапе дальнейшего уточнения модели, в частности уменьшение зазора между контактной парой зубьев и учет разницы скоростей вращения шестерен.

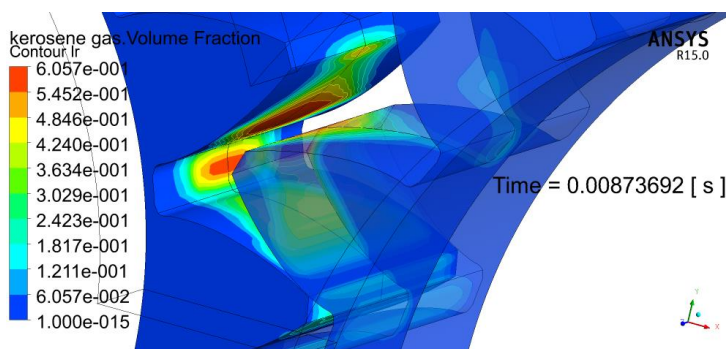


Рис. 3 – Образование зон кавитации вблизи центра зубьев (режим 2)



Рис. 4 – Внешний вид шестерен с кавитационным повреждением

Для верификации полученного решения проведено сравнение расчетного и теоретического значений объемного расхода (Q) для первых двух режимов работы. Относительная погрешность численного решения не превысила 10.6% для первого режима и 7.2% для второго. Таким образом, показано, что применение технологии Immersed Solid позволяет качественно верно и с приемлемой точностью моделировать работу шестеренного насоса, в условиях, способствующих образованию кавитации как на локальном (зоны кавитации), так и на интегральном (расход) уровнях.

Список литературы

1. Voorde J.V, Vierendeels J.A. grid manipulation algorithm for ALE calculations in screw compressors// In: 17th AIAA computational fluid dynamics conference, Canada, AIAA; 2005. p.4701.
2. Hesse J., Spille-Kohoff A., Hauser J., Schulze-Beckinghausen P. 2014. Structured meshes and reliable CFD simulations: TwinMesh for positive displacement machines // International screw compressor conference, TU Dortmund.
3. Hesse J., Spille-Kohoff A., Shorbady A.E., 2015. CFD simulation of screw compressor including leakage flows and rotor heating // 9th International Conference on Compressors and their Systems.
4. 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.
5. Смирнов Е.,М, Зайцев Д.К, Применение деформируемых сеток для численного моделирования течений в областях с подвижными границами // Научно-технические ведомости. 2006. N 1(47). С. 15-22.

05.02.09

А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин, А.А. Федулов, А.Е. Чигринский

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
механико-машиностроительный институт, кафедра металлургических и роторных машин,
Екатеринбург, andrey.karamyshev@yandex.ru

АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДА РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ МАШИНЫ РКМ-45

В работе представлены основы модели динамического нагружения радиально-ковочной машины РКМ-45, определены коэффициенты динамичности. Изложена методика определения коэффициента неравномерности движения.

Ключевые слова: *РКМ-45, динамическая модель, неравномерность движения, коэффициенты динамичности.*

В настоящее время на ОАО «ПНТЗ» совершенствуется технология изготовления теплообменных труб из коррозионностойких сталей аустенитного класса посредством волочения на самоустанавливающейся оправке. Для подготовки переднего конца трубы перед волочением в технологической линии волочильного стана ХВТ-80 используется радиально-ковочная машина НТП «РадиалПро» РКМ-45 с электромеханическим приводом и усилием 450 кН (рис. 1). В качестве рабочего инструмента применяются 4-е бойка, каждый из которых, закреплен на конце соответствующего рычага, совершающих качательное движение. Движение рычагам обеспечивается за счет вращающегося шпинделя с маховиком, привод которого производится от двигателя через ременную передачу [1].

Актуальность создания новых машин на базе конструкции РКМ-45, в частности, рассчитанных на обжатие труб большего диаметра, применение данных РКМ для пластического деформирования прутков из различных сталей и сплавов определяет необходимость проведения теоретического исследования нагруженности элементов привода машины и оценки составляющих его динамической модели.

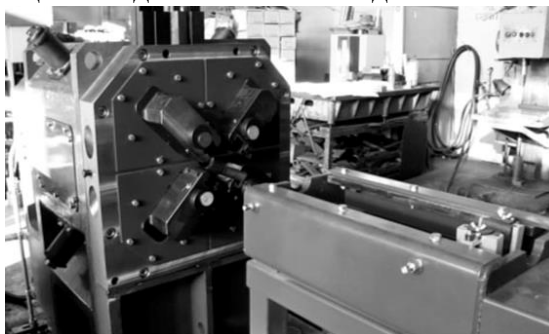


Рис.1. – РКМ - 45

Несоответствие между приведенными к начальному звену моментами сил движущих и сил сопротивления и периодическое изменение момента инерции механизма вызывают при установившемся движении машины периодические изменения угловой скорости, приближенно оцениваемой коэффициентом неравномерности движения [2]. Для оценки величины неравномерности движения РКМ-45 было использовано выражение в виде:

$$\delta = \left(\frac{30}{\pi \cdot n_{дв}} \right)^2 \int_{t_1}^{t_2} \frac{N_c(t) - N_{дв}}{J_{пр}(t)} dt,$$

где δ – коэффициент неравномерности движения, $N_c(t)$ и $N_{дв}$ – мощности сил сопротивления и электродвигателя соответственно, $J_{пр}(t)$ – приведенный момент инерции всех масс привода, t_1 и t_2 – пределы интегрирования, $n_{дв}$ – частота вращения вала электродвигателя.

Момент инерции масс привода $J_{пр}(t)$ определялся по выражению

$$J_{пр}(t) = J_{дв} + J_{м} + J_{р}(t),$$

где $J_{дв}$ – момент инерции вала двигателя, $J_{м}$ – момент инерции масс привода, вращающихся с постоянной скоростью $J_{р}(t)$ – момент инерции масс привода вращающихся с переменной во времени скоростью.

Для построения графика, представленного на рис. 2, было проведено теоретическое исследование с целью определения зависимости мощности, затрачиваемой на обжатие с максимальным технологическим усилием 450 кН, от времени внедрения рабочего инструмента (бойков) в металл заготовки при максимальном значении подачи 50 мм/с, в соответствии с методикой, представленной в работе [3]. Пределы интегрирования в выражении для неравномерности хода были определены путем нахождения точек пересечения кривой мгновенной мощности, соответствующей изменению мощности сил сопротивления $N_c(t)$, с прямой, соответствующей номинальной мощности установленного двигателя $N_{дв}$.

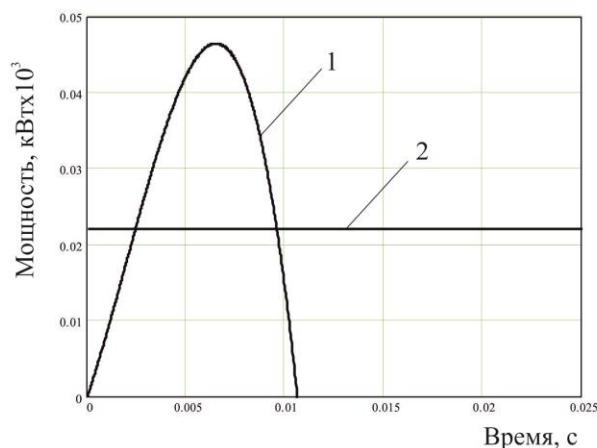


Рис. 2. – Изменение мощности сил сопротивления и мощности двигателя привода РКМ-45 в зависимости от времени:

1 – мощность сил сопротивления $N_c(t)$; 2 – мощность двигателя РКМ-45 $N_{дв}$

Привод машины оснащен асинхронным электродвигателем АИР 180S4, с номинальной мощностью 22 кВт и частотой вращения 1470 об/мин. В результате решения приведенного выражения получено значение коэффициента неравномерности движения $\delta = 0.0028$. Номинальная величина скольжения для АИР 180S4 составляет 2%, перегрузочная способность – 2.2, таким образом, установленный в приводе РКМ-45 электродвигатель и маховые массы привода обеспечивают нормальную работу машины.

Для теоретического исследования динамических нагрузок в элементах привода радиально-ковочной машины РКМ-45 была предложена его приведенная модель, представленная в виде многомассовой системы с четырьмя ветками (рис. 3).

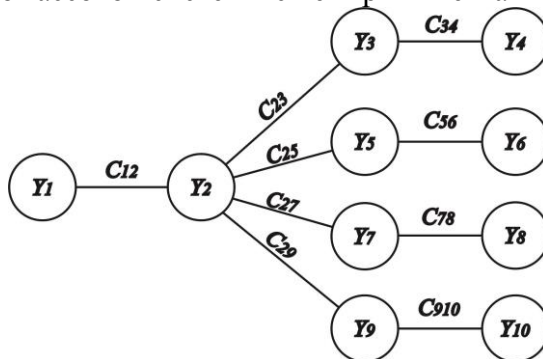


Рис. 3. – Динамическая модель привода

Динамика в представленной многомассовой модели описывается системой дифференциальных уравнений относительно упругих моментов [4]. Для первой ветки модели система уравнений имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{d^2}{d\tau^2} M_{12} &= \frac{M_1}{Y_1} C_{12} - C_{12} \frac{Y_1 + Y_2}{Y_1 Y_2} M_{12} + \frac{C_{12}}{Y_2} M_{23}, \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{23} &= \frac{C_{23}}{Y_2} M_{12} - C_{23} \frac{Y_2 + Y_3}{Y_2 Y_3} M_{23} + \frac{C_{23}}{Y_3} M_{34}, \\ \frac{d^2}{d\tau^2} M_{34} &= \frac{M_4(\tau)}{Y_4} C_{34} - C_{34} \frac{Y_3 + Y_4}{Y_3 Y_4} M_{34} + \frac{C_{34}}{Y_3} M_{23},\end{aligned}$$

где τ – время, M_{ij} – моменты упругих сил на соответствующих звеньях привода машины, C_{ij} – жесткости звеньев, Y_i – моменты инерции звеньев, M_1 – момент на валу электродвигателя привода, $M_4(t)$ – момент от технологической нагрузки, действующей на рычаги машины.

Момент от технологической нагрузки задавался функцией вида:

$$M_4(\tau) = \tan^{-1}(k_1 \tau)(\sin(k_2 \tau) + 1)k_3,$$

где k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, определяющие характер кривой нагружения.

Решение системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику привода РКМ-45, позволяет найти значения упругих моментов действующих на звенья привода машины, коэффициенты динамичности в упругих связях для каждого звена в любой момент времени при заковке заготовок. На рис.4 изображены графики зависимости коэффициентов динамичности Кд для каждого рычага радиально-ковочной машины от передаточного числа привода ременной передачи, полученные в результате расчета. Ременная передача, установленная в приводе РКМ-45, имеет передаточное число равное 2. Значения коэффициентов динамичности для рычагов машины, при данном передаточном числе, соответственно равны $K_{д1}=1.78$; $K_{д2}=1.2$; $K_{д3}=1.02$; $K_{д4}=0.98$. Расчеты по определению величин коэффициентов запаса прочности для рычагов по переменным напряжениям дают минимальное значение $n = 1.57$ (рычаг 1), что находится в диапазоне рекомендуемых величин от 1.5 до 2.5.

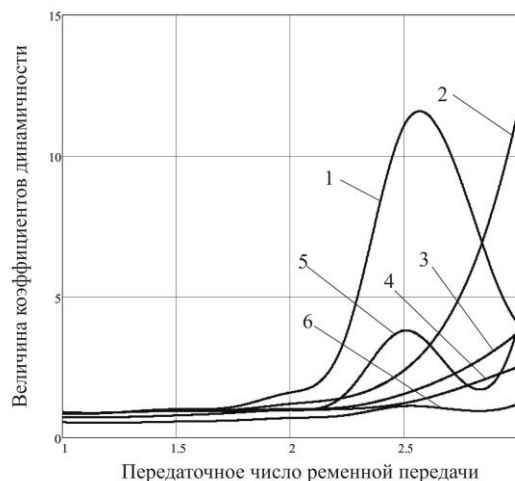


Рис. 4. – Зависимость коэффициентов динамичности элементов привода РКМ – 45 от передаточного числа ременной передачи:

1 – Кд1; 2 – Кд2; 3 – Кд2; 4 – Кд3; 5 – Кдш; 6 – Кдрп

Расчет динамических нагрузок, действующих на шпиндель машины, дает значение коэффициента динамичности $K_{дш} = 1.06$, при передаточном числе 2. При данном нагружении, минимальное значение коэффициентов запаса прочности по переменным напряжениям в опасных сечениях шпинделя $n = 1.52$, что находится в диапазоне рекомендуемых величин. Коэффициент динамичности ременной передачи привода, при том же передаточном числе, $K_{дрп} = 0.7$ (рис. 4). В результате определения максимальных усилий, действующих на ремни передачи, получено значение равное 510 Н, при номинальном значении 735 Н в соответствии с ГОСТ 1284.1-89.

Вывод: Проведенные исследования динамической нагруженности элементов привода РКМ-45 и величины неравномерности движения позволяют проводить оценку аналогичных по конструкции существующих и разрабатываемых радиально-ковочных машин с электромеханическим приводом и рычажным расположением рабочего инструмента, с целью получения наиболее рациональных конструкций элементов их привода.

Список литературы

1. *Карамышев А.П., Некрасов И.И., Паришин В.С. и др.* Ковочная машина. Патент на полезную модель № 159243. Приоритет от 08.06.2015 г.
2. *Артоболевский И.И.* Теория механизмов и машин: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Наука, 1975. с. 639.
3. *Карамышев А.П., Паришин В.С., Некрасов И.И. и др.* Определение усилия обжатия заготовок на радиально-ковочной машине AVS «Металлург». № 3, 2009. с.61-63.
4. *Иванченко Ф.К., Красношапка В.А.* Динамика металлургических машин. М.: Металлургия, 1983. с. 295

05.02.00

**А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов,
А. В. Котин, Е.В. Пликин, Е.С. Кречетов, Л.Н. Храпунова**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции,
Нижний Новгород, aleks_may@mail.ru

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Представлены результаты экспериментального исследования по отработке методики неразрушающего контроля повреждений конструкционных материалов элементов оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) при термической усталости с применением измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН».

Ключевые слова: экспериментальные исследования, неразрушающий контроль, термическая усталость.

Большая часть элементов оборудования ЯЭУ подвергается воздействию термоциклических нагрузок. Значительные колебания термических напряжений теплообменной поверхности, обусловленные пульсациями температуры теплоносителя, приводят к необратимому изменению физико-механических характеристик материала, зарождению и накоплению усталостных повреждений с последующим развитием дефектов. [1,2]

Количественные характеристики степени поврежденности конструкционных материалов при многоцикловой термоусталости в действующих установках рациональнее всего получать, используя методы и приборы неразрушающего контроля (НК). В НГТУ им. Р.Е. Алексеева проводились исследования по оценке накопления поврежденности в элементах оборудования с использованием структурно-чувствительного метода НК, а именно импульсного метода акустической структурометрии, реализованного в системе измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) «Астрон». Математическое обеспечение данного ИВК позволяет по результатам спектрально-акустических измерений диагностируемого параметра и на основании установленных зависимостей данного параметра от физико-механических характеристик проводить контроль объемной поврежденности материала.

Данные экспериментальные исследования являются одним из этапов апробации математического аппарата ИВК «АСТРОН», проводимой с целью обоснования возможности его применения для контроля оборудования и трубопроводов, определяющих ресурс ЯЭУ.

Накопление повреждений в материале образцов осуществлялось на экспериментальной установке для исследования процессов возникновения и развития повреждений при термической усталости. Схема установки, приведена на рисунке 1. Установка включает в себя следующие элементы: бак запаса дистиллированной воды (1); центробежный насос (2); бак переливной (3); вентиль запорный (4); клапан регулирующий (5); капельница-дозатор (6); инфракрасный датчик (7); исследуемый образец (8); нагревательные элементы (9); лабораторный автотрансформатор (10); персональный компьютер (11); клапан обратный (12); вентиль дренажный (13).

В качестве объекта исследования (рис.2) использовался трубный образец, представляющий собой полукруглый в сечении фрагмент трубы 60х5мм длиной 150 мм. Экспериментальные исследования осуществлялись на 10 образцах. Такое количество образцов продиктовано необходимостью проведения металлографических исследований на различных стадиях накопления поврежденности в обоснование предлагаемого акустического метода. Материал образцов – сталь аустенитного класса марки 12Х18Н10Т.

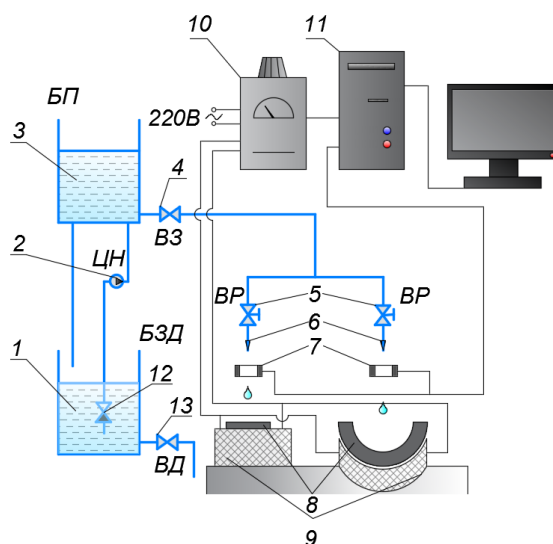


Рис. 1 - Экспериментальный стенд

Термоциклическое нагружение осуществлялось путем локальной капельной подачи дистиллированной воды с температурой 23°C – 27°C на нагретую поверхность образцов. Температура образцов в периферийной относительно зоны нагружения области поддерживалась в диапазоне 275°C – 285°C . Частота нагружения составляла 1 Гц.

Создание и поддержание заданной температуры образцов производилось при помощи электрических нагревательных элементов, представляющих собой облаченную в керамические изоляторы нихромовую проволоку, закрепленную на металлическом «полутрубном» ложементе. Автоматическая регистрация количества циклов нагружения образцов осуществлялась с помощью инфракрасного датчика и программного обеспечения, разработанного коллективом авторов.



Рис. 2 – Трубный образец

Определение амплитуды пульсаций температуры в локальных зонах нагружения образцов осуществлялось с помощью универсального тепловизора для научных и промышленных исследований FLIR SC7700. Размах пульсаций температуры составил 61°C .

Контроль поврежденности образцов производился на основании измерения задержек упругих продольных и поперечных волн различной поляризации с использованием ИВК «Астрон», а также визуального осмотра. Измерения осуществлялись согласно схеме расположения датчиков представленной рисунке 3.



Рис. 3 – Схема расположения датчиков

По результатам измерения задержек упругих волн рассчитывалась величина обобщенного акустического параметра D :

$$D = \frac{t_t^{\parallel} + t_t^{\perp}}{t_l},$$

где $t_t^{\parallel}$ – задержка поперечной волны с направлением поляризации вдоль рабочей части образца, $t_t^{\perp}$ – задержка поперечной волны с направлением поляризации поперек рабочей части образца, t_l – задержка продольной волны. После чего производился расчет изменения обобщенного акустического параметра ΔD по формуле:

$$\Delta D = D - D_0,$$

где D – текущее значение обобщенного акустического параметра, D_0 – значение обобщенного акустического параметра в исходном состоянии. Изменение параметра D было отмечено при достижении $3.6 \cdot 10^6$ циклов. График изменения обобщенного акустического параметра в точках контроля в зависимости от числа циклов термопульсаций представлен на рисунке 4.

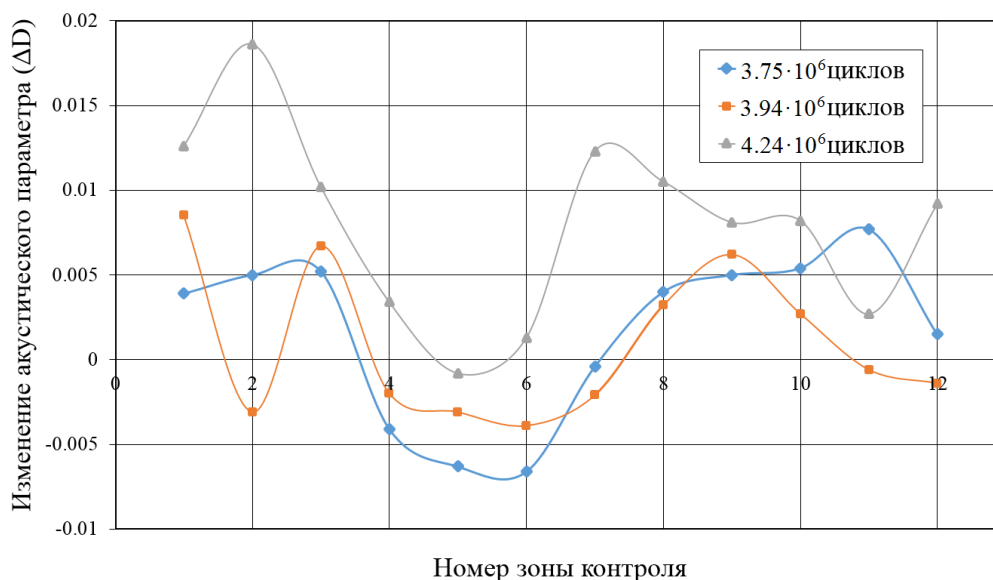


Рис.4 - Изменение обобщённого акустического параметра

Из графика видно, что с увеличением наработки циклов нагружения происходит рост ΔD , что свидетельствует о начале процесса накопления повреждений в материале образца.

Полученные зависимости задержек импульсов от количества циклов нагружения позволяют утверждать о структурных изменениях в материале. Результаты исследования свидетельствуют о работоспособности предложенной методики контроля поврежденности материала от термоциклических нагрузок образцов из сталей аустенитного класса. Однако, уточнение положений данной методики требует проведение дальнейших испытаний до появления микротрещин.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Судаков, А.В. Пульсации температур и долговечность элементов энергооборудования / А.В. Судаков, А.С. Трофимов. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
2. Углов А.Л. и др. Методика оценки поврежденности аустенитной стали при термопульсациях акустическим методом // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2015 г., №4, стр. 151–158.

05.02.00

И.М. Пышный к.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения
(УрГУПС), кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, igorkz45@mail.ru

ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПУТЕМ ЛУБРИКАЦИИ

Выполненный анализ лабораторных и натурных экспериментальных исследований интенсивности износа бандажей колесных пар позволил определить причины и способы повышения ресурса бандажей локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте, к которым можно отнести лубрикацию.

Ключевые слова: *промышленные локомотивы, колесные пары, износ бандажей, повышение ресурса.*

Бандажи колесных пар являются наиболее ответственными деталями механической части локомотива, износ которых представляет собой сложный процесс взаимодействия системы «колесо–рельс», определяющийся многими факторами. Интенсивность износа гребней бандажей на ряде промышленных предприятий, имеющих собственный подвижной состав, достигает 2 мм и более в месяц.

Так как железнодорожные цеха промышленных предприятий финансируются по «остаточному принципу» [1], необходимо искать способы повышения ресурса ходовых частей локомотивов, исходя из минимальных капитальных вложений с высокой отдачей. К таким способам можно отнести экономию проката черного металла, что позволит существенно увеличить межремонтные пробеги и снизить затраты на замену и обточку бандажей колесных пар локомотивов.

Тяжелые условия эксплуатации создали в трибосистеме «колесо–рельс» проблему повышенного износа, угрожающую безопасности движения поездов на железнодорожном транспорте необщего пользования. В структуре эксплуатационных отказов утрата работоспособности бандажей колесных пар локомотивов по подрезу гребня и боковой поверхности рельса является определяющей величиной, вызывающей большие эксплуатационные расходы [2].

Анализ протяженности железнодорожных путей необщего пользования шириной колеи 1520 мм выявил, что примерно на половине длины уложены рельсы типа 1-а, Р38, Р43, на другой половине – уложены рельсы Р50, Р65 и более тяжелые. Качество и состояние путей оставляет желать лучшего, а именно: имеется высокий процент загрязненности и запыленности пути; значительное число стрелочных переводов до 4 на 1 км; значительные уклоны пути (до 25 ‰) на заводах и до 40–60 ‰ – на открытых карьерных разработках; наличие большого числа кривых малого радиуса (100 м и менее).

Особенность работы железнодорожного транспорта необщего пользования как составного звена технологического процесса – большое разнообразие эксплуатационных условий: повышенные осевые (500–600 кН) и погонные (300–380 кН/м) нагрузки; жесткое рессорное подвешивание; огромное разнообразие массы, длины, габаритов, температур перевозимых грузов; специфические режимы управления локомотивом. Интенсивность бокового износа рельсов и гребней бандажей колесных пар находится в квадратической зависимости от этих нагрузок [3]. Например, при увеличении нагрузки на ось в среднем с 300 до 400 кН процесс износа возрастает в 2,7 раза, а удельный вертикальный износ головки рельсов в значительной степени зависит от продольного уклона профиля пути.

Выполненный анализ исследований позволил сформулировать следующие направления повышения ресурса бандажей колесных пар на промышленном железнодорожном транспорте: применение гребнесмазывателей твердого типа; применение автоматических масляных гребнесмазывателей, подбор профилей поверхности катания бандажа в

соответствии с профилем и планом рельсового пути; наплавка гребней бандажей колесных пар.

Для достижения поставленной цели составлены структурная схема исследования и даны возможные пути решения задачи (Рис. 1) [4].



Рис. 1 – Структура исследования и решения задачи

На основе усовершенствованной методики [5] регрессионного анализа среднего значения и среднеквадратического отклонения был спрогнозирован процесс изнашивания бандажей колесных пар; контролируемые параметры в эксплуатации – уменьшение толщины гребня и нарастание проката.

Анализ обработанного статистического материала показал, что контролируемые параметры бандажей колесных пар хорошо описываются нормальным законом распределения, плотность которого в классическом представлении выглядит

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(M-x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где x – случайная величина (период наработки, в месяцах); M , σ – соответственно среднее значение и среднеквадратическое отклонение случайной величины (уменьшение толщины гребня и нарастания проката) бандажей колесных пар локомотивов от наработки.

С увеличением наработки возрастает вероятность отказа P , которая для износа гребня будет равна

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{y_{доп}}^{M_y+3\sigma_y} \frac{1}{\sigma_y(x)} \cdot e^{-\frac{(x-M_y(x))^2}{2\sigma_y^2(x)}} dy. \quad (2)$$

По значениям формулы (2) строится зависимость отказа бандажа колесной пары от наработки и определяется 95 %-ный ресурс [6], с условием $P = 1 - 0,95$. В соответствии с

относительной погрешностью применяемого измерительного прибора КИП-01, заданная погрешность находится в пределах $\pm 5\%$. Поэтому целесообразно ограничить межремонтные пробеги 95 %-ным ресурсом.

Результат расчета коэффициентов уравнений линейной регрессии контролируемых параметров бандажей колесных пар тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18 [7] после установки на них АГС-8 представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений линейной регрессии износа гребней бандажей колесных пар тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18

Зависимость	Коэффициент уравнений линейной регрессии		Коэффициент корреляции, R_{yn}	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм ²
	A , мм	B , мм/месяц		
износ гребня до применения АГС-8				
$M(n)$	−0,239	0,109	0,977	0,148
$\sigma(n)$	0,074	0,039	0,944	0,196
износ гребня после применения АГС-8				
$M(n)$	0,106	0,026	0,967	0,142
$\sigma(n)$	0,209	0,016	0,829	0,273

В качестве примера приведены аналитические зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения значений износа гребня от наработки (Рис. 2).

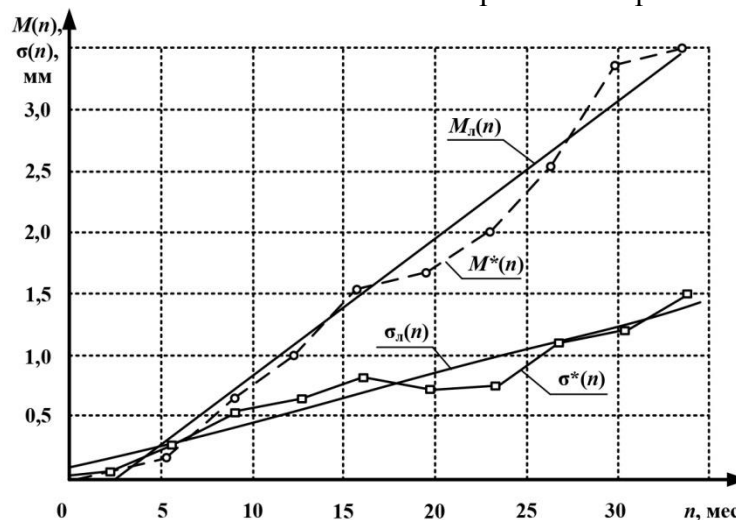


Рис. 2 – Зависимость контролируемого параметра от наработки

Сравнение интенсивностей изнашивания гребней бандажей до и после установки на тепловозы АГС-8 проходило следующим образом [8]:

– проверялась гипотеза о равенстве остаточных дисперсий $S_{0 \text{ без АГС}}^2$ и $S_{0 \text{ АГС-8}}^2$ ($H_0^{(1)}$; дисперсий $S_{0 \text{ без АГС-8}}^2 = S_{0 \text{ АГС-8}}^2$) по критерию Фишера:

$$\hat{F} = \frac{S_{0 \text{ без АГС-8}}^2}{S_{0 \text{ АГС-8}}^2}, \quad (3)$$

где $S_{0 \text{ без АГС-8}}^2$, $S_{0 \text{ АГС-8}}^2$ – большая из двух дисперсий соответственно;

– проверялась гипотеза о существенности отличия угловых коэффициентов линейных регрессий $H_0^{(2)}$: $B = B_{\text{без АГС-8}} = B_{\text{АГС-8}}$ по t -критерию Стьюдента [9]

$$t_B = \frac{B_{\text{без АГС-8}} - B_{\text{АГС-8}}}{S_B \sqrt{\frac{1}{(N_1 - 1) \cdot D_{n_1}} + \frac{1}{(N_2 - 1) \cdot D_{n_2}}}}, \quad (4)$$

$$S_B = \sqrt{\frac{(N_1 - 2) \cdot S_{0 \text{ без АГС-8}}^2 + (N_2 - 2) \cdot S_{0 \text{ АГС-8}}^2}{N_1 + N_2 - 4}}, \quad (5)$$

где B – расчетное значение углового коэффициента линейной регрессии; n – объем выборки значения числовой характеристики контролируемого параметра; S_0^2 – остаточная дисперсия эмпирических точек относительно линии регрессии; $D_{n(1, 2)}$ – эмпирическая дисперсия наработки n .

Результаты расчета 95 %-ного ресурса до смены бандажа после внедрения разработанного блока управления АГС-8 приведены в таблице 2, из которой видно, что ресурс по предельному прокату увеличился на 52 %.

Таблица 2 – Ресурс бандажей колесных пар тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18
с блоком управления, разработанного в УрГУПС

95 %-ный ресурс бандажей до смены	До применения АГС-8, мес.	После применения АГС-8, мес.	С блоком управления АГС-8, мес.
По предельному значению величины износа гребня	39,7	42,4	55,5
По предельному значению величины нарастания проката	25,1	27,8	42,3

Список литературы

1. *Пышный И.М.* Повышение ресурса бандажей колёсных пар локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте: Дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 144 с.
2. *Пышный И.М., Русаков А.Г.* Определение расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов при помощи энергетического паспорта железнодорожного участка пути // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 4. – С. 185–187.
3. *Пышный И.М.* Наноматериал продлевает срок службы бандажей колесных пар промышленных локомотивов // Упрочняющие технологии и покрытия. – М., 2015. – № 3. – С. 7–9.
4. *Пышный И.М.* Способы повышения ресурса бандажей колесных пар промышленных локомотивов // Научное обозрение. – 2015. – № 20. – С. 90–95.
5. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Модель эксплуатационного износа сложной технической модели // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1 (297). – С. 52–57.
6. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Измерение диаметра бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 22–24.
7. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Разработка блока управления системы гребнесмазывания тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18 // Научное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 188–193.
8. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Продление ресурса бандажей колесных пар // Технология машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 44–46.
9. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Увеличение срока службы бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 152–156.

05.02.00

И.М. Пышный к.т.н.

Уральский государственный университет путей сообщения
(УрГУПС), кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, igorkz45@mail.ru

ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ С ПОМОЩЬЮ ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Выполненный анализ лабораторных и натурных экспериментальных исследований интенсивности износа бандажей колесных пар позволил определить причины и способы повышения ресурса бандажей локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте, к которым можно отнести применение триботехнического состава.

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, износ бандажей, повышение ресурса.

Один из эффективных способов повышения ресурса бандажей на промышленном железнодорожном транспорте – обработка трущихся поверхностей триботехнический состав (ТС) получивший дальнейшее название – нанопористое антифрикционное покрытие (НАП). Реализуемый с помощью несложного оборудования нанесенный слой играет в трибологических парах роль «третьего тела», предотвращающего износ в паре «колесо-рельс» [1].

ТС НАП – это экологически безопасный состав, содержащий тонкодисперсные смеси минералов, добавок и катализаторов с размером зерна менее 10 мкм. Принцип действия ТС НАП заключается в формировании на поверхностях трения стеклокерамического покрытия, которое образуется послойно. Каждый слой можно характеризовать циклом, состоящим из нескольких этапов. Ввиду особенностей процесса обработки каждый цикл полностью завершается за один полный оборот колесной пары [2]. Эффект уменьшения износа колесных пар электровозов связан с образованием на гребне бандажа пленочных «зеркал» скольжения, которые снижают коэффициент трения и износ бандажей колесных пар промышленных электровозов ПЭ2^М (Рис. 1). Одновременно происходит процесс микрошлифования соприкасающихся поверхностей кристаллами ТС НАП, что приводит к уменьшению шероховатости до $R_a = 0,16$ мкм.

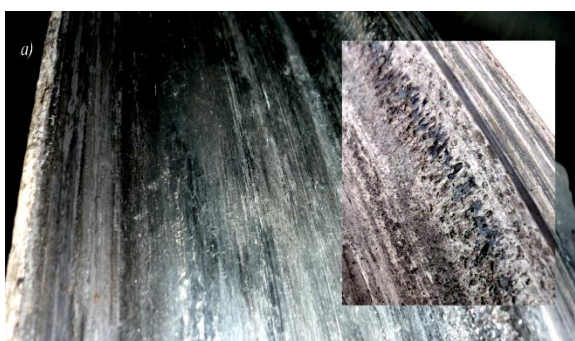


Рис. 1 – Обработка гребня: а – до применения ТС НАП; б – после применения ТС НАП

Однако было бы неверным проблему износа бандажей колесных пар локомотивов сводить лишь к образованию на выкружке гребня пленочных «зеркал» скольжения [3]. Существует дополнительный фактор предупреждения износа, образуемый ТС НАП – это компенсация водородного «истощения» металла бандажа, повышающего хрупкость и снижающего его стойкость к износу. В ТС НАП на основе серпентинита присутствуют силоксановые (мостиковые) связи Si-O-Si, при разрыве которых, вследствие разрушения (измельчения) минерала, образуются некомпенсированные, оборванные связи Si-O, являющиеся активными акцепторами водорода в форме H_и⁻. При их взаимодействии образуются

скомпенсированные силанольные группы Si-OH. Таким образом, тонко измельченный серпентин, обладающий большой удельной поверхностью и большим числом оборванных силансановых связей, создает благоприятные условия для связывания находящегося в зоне трения активного водорода, что препятствует его взаимодействию с металлом и предотвращает водородный износ, приводящий к хрупкости металла [4].

Если считать оборванные связи поверхностными дефектами силиката, то адсорбция водорода с образованием силанольных групп Si-OH – это способ энергетической компенсации таких дефектов, своего рода «самозалечивание» поверхностей трения при помощи серпентинита в составе ТС НАП. Таким образом, силикаты с оборванными Si-O-Si связями являются эффективными адсорбентами активного водорода и, следовательно, могут использоваться для решения проблемы водородного износа металлов в узле трения с экстремальными нагрузками (температура и давление), характерными для взаимодействия пары «колесо–рельс» [5].

С другой стороны, как показали исследования, в зоне трения пары «колесо–рельс» образуется температура до 600 °С, при которой ТС НАП переходит в форстерит: $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8 - 3Mg_2SiO_2 + 4H_2O$. Этот процесс является эндотермическим, т. е. требует затрат энергии (336 кДж на 1 моль ТС НАП), которая «гасится» реакцией разложения находящегося в зоне трения серпентинита. При этом указанная температура разложения ТС НАП относится к нормальному атмосферному давлению и с ростом давления существенно снижается.

Для сравнения интенсивности изнашивания гребней бандажей колесных пар [6], обработанных и необработанных ТС НАП на электровозах ПЭ2^М приписки ОАО «Ураласбест» эксплуатируемые в открытом карьере и имеющие выход на железнодорожные пути общего пользования был выполнен сравнительный анализ по разработанной в УрГУПС методике.

Результат расчета полученного статистического материала коэффициентов уравнений линейной регрессии контролируемых параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты уравнений линейной регрессии контролируемых параметров бандажей колесных пар промышленных электровозов ПЭ2^М

Контролируемый параметр	Зависимость	Коэффициенты уравнений регрессии		Коэффициент корреляции, R_1	Остаточная дисперсия, S_0^2 , мм ²
		A , мм	B , мм/месяц		
Толщина гребня	не обработанные ТС НАП				
	$M(n)$	0,397	0,099	0,989	0,211
	$\sigma(n)$	0,165	0,183	0,972	0,243
	обработанные ТС НАП				
	$M(n)$	– 0,130	0,535	0,962	0,154
	$\sigma(n)$	0,537	0,151	0,875	0,186

На основании данных полученных в таблице 1 строятся зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения износа гребней колесных пар промышленных электровозов ПЭ2^М от наработки для 2-х групп – необработанные и обработанные ТС НАП (Рис. 2).

Для подтверждения эффекта ТС НАП была разработана компьютерная модель расчета ресурса бандажей колесных пар промышленного электровоза ПЭ2^М и представлены результаты моделирования процесса изнашивания бандажей при наличии в зоне контакта пары «колесо–рельс» «третьего тела» [7]. Рассматривались две ситуации моделирования, отличавшиеся параметрами материалов поверхностей трения, обработанные и не обработанные триботехническим составом НАП. Исследования эволюции конфигурации профиля бандажей колесных пар проводились на основе модели износа ВНИИЖТ-1 (с профилем поверхности катания бандажа по ГОСТ 11018–2011), на базе программного комплекса численного интегрирования уравнений движения «Универсальный механизм» [8].

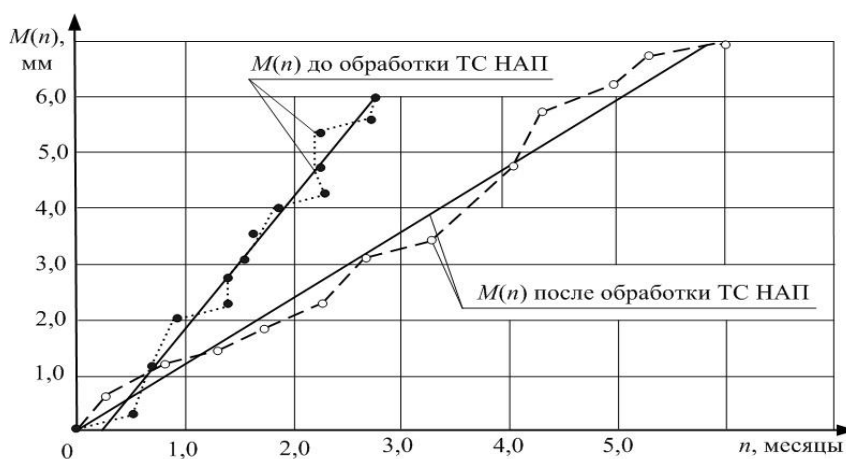


Рис. 2. Зависимости среднего значения износа гребня бандажей колесных пар до и после обработки ТС НАП

Во время рассмотрения процесса трения при компьютерном моделировании использовались закономерности механической теории и основных положений трибологии. С учетом некоторых допущений свойства «третьего тела» описываются коэффициентом трения μ , который в процессе эксплуатации достигает значений 0,45–0,50. Кроме того, процесс изнашивания зависит от упругих свойств материалов трущихся поверхностей, которые описываются коэффициентом Пуассона. Для используемой в настоящее время бандажной и рельсовой стали его значение принимается равным 0,28. Коэффициент Пуассона при использовании ТС НАП был уменьшен до значения 0,22 для учета влияния гребневых колодок на качество получаемого стеклокерамического покрытия.

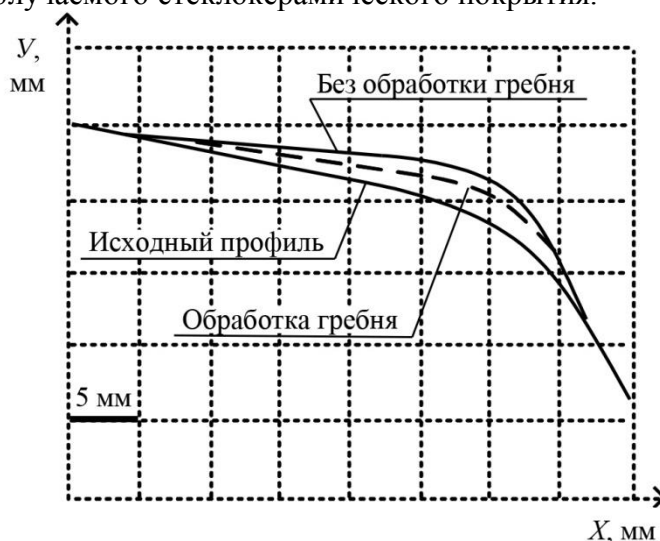


Рис. 3 – Характер износа гребня бандажа при пробеге электровоза 9855 км.

Для каждой ситуации моделирования проведен анализ эволюции профиля, состоящий из ста итераций. При изнашивании гребня бандажа на 8 мм моделирование останавливалось. В результате моделирования величина ресурса бандажа колесной пары до обточки, лимитируемой по минимальной толщине гребня, после обработки триботехническим составом НАП увеличивается в 1,95 раза и составляет 9855 км (Рис. 3). При среднемесечном пробеге электровоза 1385 км наработка бандажей до обточки составляет 7,12 мес [9].

Полученный результат подтверждается данными статистического анализа, что свидетельствует о правильном выборе изменяемых параметров при моделировании. Расхождение полученных результатов с экспериментальными данными не превысило 8 % [10].

Список литературы

1. *Пышный И.М.* Повышение ресурса бандажей колёсных пар локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте: Дис. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2014. – 144 с.
2. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2012. – Т. 60. – № 1. – С. 85–91.
3. *Пышный И.М.* Наноматериал продлевает срок службы бандажей колесных пар промышленных локомотивов // Упрочняющие технологии и покрытия. – М., 2015. – № 3. – С. 7–9.
4. *Пышный И.М.* Способы повышения ресурса бандажей колесных пар промышленных локомотивов // Научное обозрение. – 2015. – № 20. – С. 90–95.
5. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Модель эксплуатационного износа сложной технической модели // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2013. – № 1 (297). – С. 52–57.
6. *Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А.* Измерение диаметра бандажей колесных пар тягового подвижного состава // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 22–24.
7. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Разработка блока управления системы гребнесмазывания тепловозов ТЭМ2 и ТЭМ18 // Научное обозрение. – 2012. – № 4. – С. 188–193.
8. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Продление ресурса бандажей колесных пар // Технология машиностроения. – 2012. – № 6. – С. 44–46.
9. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Увеличение срока службы бандажей колесных пар промышленных тепловозов // Омский научный вестник. – 2011. – № 3 (103). – С. 152–156.
10. *Буйносов А.П., Пышный И.М.* Разработан бортовой локомотивный гребнесмазыватель «твердого» типа // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 3. – С. 92–96.

05.02.10

В.В. Семашко¹, Л.В. Судник¹ д.т.н., Д.Ю. Мазалов², В.С. Ивашко³ д.т.н.¹Обособленное хозяйственное подразделение «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством», Минск, РБ, lab414@mail.ru;²ФГБНУ ГОСНИТИ, Москва, РФ, 1117731@mail.ru;³Белорусский национальный технический университет, Минск, РБ.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН МЕТОДАМИ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

В работе представлены результаты исследования экспериментальных образцов, изготовленных по технологии сварки взрывом и термообработанных по традиционной технологии с различными температурами отпуска. Отработаны оптимальные режимы сварки и термической обработки, обеспечивающие материал необходимыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Установлено, что повышенная твердость и фрагментированная структура упрочненных слоев в многослойном изделии позволяет достичь высоких прочностных и вязкостных характеристик, а также минимизировать процесс абразивного изнашивания.

Ключевые слова: *сварка взрывом, упрочнение, композиционный материал.*

Импульсные методы обработки металлов эффективно используются при создании материалов с заданными физико-механическими свойствами и позволяют регулировать эксплуатационные параметры в нужном направлении [1]. Широко применяемые конструкционные материалы и технологии их упрочнения не обеспечивают необходимый эксплуатационный ресурс, что приводит к частым заменам комплектующих изделий, увеличению продолжительности нахождения агрегатов в ремонте и, следовательно, к удорожанию конечной продукции.

Широкие перспективы при решении данной проблемы открывает одна из технологий импульсной обработки – сварка взрывом, которая позволяет получить биметаллы и композиционные материалы из разнородных сталей. На примере многослойного материала, триботехнические поверхностные слои которого были выполнены из стали 65Г, а пластичная сердцевина из стали 3, показано, что реализуемый композит имеет более высокие характеристики, по сравнению с составляющими его компонентами.

В настоящей работе рассмотрены вопросы использования технологий импульсного нагружения для упрочнения материалов рабочих органов сельскохозяйственных машин, работающих в условиях ударно-абразивного изнашивания, а также исследовано влияние процесса сварки взрывом с последующей термомеханической обработкой на структурные изменения в композиционном материале и на процесс абразивного изнашивания в целом.

Изготовление композиционного материала. Расчет параметров сварки взрывом производили по программе WMASTER. В качестве исходных данных задавали: плотность, толщину, модуль сдвига, предел текучести, удлинение, температуру и удельную теплоту плавления, удельную теплоемкость и теплопроводность, параметры ударной адиабаты, тип взрывчатого вещества, его начальную плотность и критический диаметр, процентное содержание инертной добавки и показатель адиабаты продуктов взрыва.

В результате расчета были получены границы области свариваемости, а также следующие значения технологических параметров для оптимального режима сварки: величина заряда, в том числе величина его дополнительного усиления в точке инициирования, начальный зазор между свариваемыми заготовками и угол их установки (рис. 1).

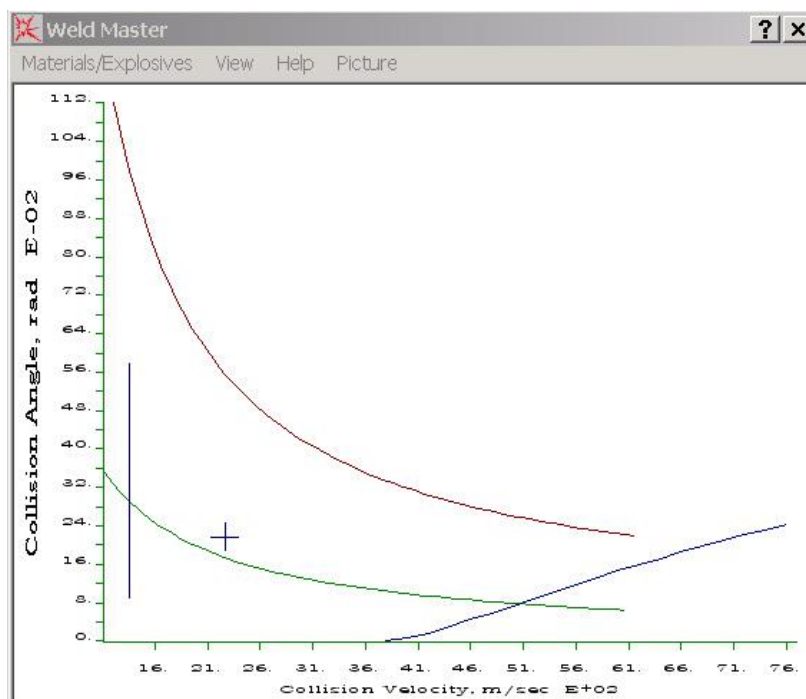


Рис. 1 – Программа для расчета параметров сварки взрывом WMASTER: графическое изображение четырех условий, ограничивающих диапазон оптимальных параметров сварки для композита ст. 65Г(2,5 мм) – ст. 3(3,0 мм) – ст. 65Г (2,5 мм)

Краткий протокол расчета режима для многослойного композита ст.65Г (2,5 мм) – ст. 3 (3,0 мм) – ст. 65Г (2,5 мм): скорость соударения – 2269 м/с; взрывчатое вещество – аммонит 6ЖВ; доля взрывчатого вещества – 67,0 %; плотность – 900 кг/м³; доля инертной добавки – 33 %; скорость детонации – 2673 м/с; критическая высота заряда – 7,0 мм; адиабатный коэффициент – 2,3. Схема сварки взрывом – угловая (рис. 2), максимальная высота заряда 51,35 мм; минимальная высота заряда 41,3 мм; зазор 7,68 мм, угол установки 3,52E-02 рад.

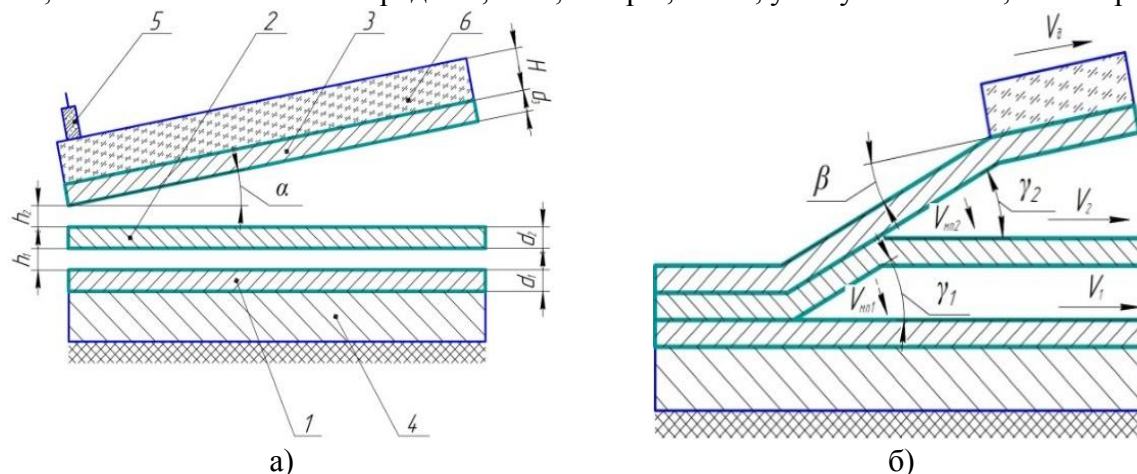


Рисунок 2 – Угловая схема сварки взрывом:

а) конфигурация до начала детонации; б) конфигурация во время детонации;

1 - неподвижная пластина (ст. 65 Г); 2 – промежуточная пластина (ст. 3);

3 - метаемая пластина (ст. 65Г); 4 - основание; 5 – детонатор; 6 - взрывчатое вещество (ВВ)

Технологический процесс сварки взрывом проводился на опытно-экспериментальном полигоне обособленного хозрасчетного подразделения «Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством» г. Минск.

Результаты исследования и их анализ. Твердость поверхностных слоев определялась при нормальной (20 ± 10 °С) температуре и в соответствии с требованиями ГОСТ 9013-59. Измерение микротвердости образцов проводилось на микротвердомере «Micromet-II» (нагрузка 100 г.) по ГОСТ 9450-76. Испытания на ударную вязкость проводились на копре маятниковым «TINIUS OLSEN IT 542» (США) при нормальной (20 ± 10 °С) температуре и в

соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 на образцы с U – образным надрезом. Испытания на трехточечный изгиб проводили на универсальной испытательной машине «Инстрон 1195» в соответствии ГОСТ 473.8-81.

Результаты лабораторных испытаний экспериментальных образцов композиционного материала приведены в таблице 1.

Таблица – Результаты лабораторных испытаний экспериментальных образцов

№ обр.	Режим термической обработки	Измеряемые параметры		
		Твердость, HRC	Ударная вязкость, МДж/м ²	Прочность, МПа
1	Без термической обработки	20,0	1,25	1770,5
2	Закалка на воду, без отпуска	64,5	0,95	4400,4
3	Закалка на масло, без отпуска	56,0	1,15	4257,6
4	Закалка на воду, низкий отпуск	60,0	1,23	3900,5
5	Закалка на масло, низкий отпуск	58,0	1,30	3878,2
6	Закалка на воду, средний отпуск	51,0	1,35	3663,5
7	Закалка на масло, средний отпуск	45,0	1,42	3531,4
8	Закалка на воду, высокий отпуск	40,0	1,52	2970,6
9	Закалка на масло, высокий отпуск	33,0	1,63	2705,1

После проведения отпуска, с выдержкой 1 час, в интервале температур от 200 °С до 500°С, твердость изменяется в пределах от 64,5 HRC до 33 HRC, ударная вязкость от 0,95 МДж/м² до 1,63 МДж/м², прочность от 4400,4 до 2705,1 МПа. После выдержки образцов при низкой температуре (200 °С) просматривается переход остаточного аустенита в мартенсит отпуска. Наиболее отчетливо данный факт проявился на образце после закалки на масло с последующим низким отпуском, что привело к увеличению твердости образца на 2-3 единицы.

Для современных условий обработки почвы в абразивной среде необходимо, чтобы триботехнические поверхности изделий обладали повышенной твердостью (60-65 HRC) и пластичной сердцевиной [2,3]. Ударная вязкость должна соответствовать значениям не менее 0,8-1,0 МДж/м²; прочность материала – 1500-1800 МПа; коэффициент абразивной износостойкости – не менее 3,0-3,5 [4]. Учитывая вышеперечисленные технические требования, предъявляемые к износостойким деталям, образцы 2–5 в полной мере соответствуют прочностным критериям.

Результаты лабораторных исследований подтверждают актуальность и перспективность направления исследования. Решение задачи повышения износостойкости изделий, работающих в условиях ударно-абразивных нагрузок, является проблемой имеющей научно-техническое значение. На сегодняшний день учеными предложено множество решений, позволяющих повышать один из параметров – «износостойкость – ударная вязкость», но не решать проблему в целом. Повышение значения одного из параметров неизменно приводит к снижению другого. Предложенная технология сварки взрывом в сочетании с традиционным методом закалки и отпуска позволяет достигать высоких показателей работоспособности, применяя в качестве поверхностных слоев дешевые хрупкие стали.

Список литературы

1. Смирнов Г.В. и др. Моделирование и применение высокоскоростных процессов сварки материалов взрывом // Автоматическая сварка. – 2009. – № 11. – С.16-22.
2. Ткачев, В. Н. Работоспособность деталей машин в условиях абразивного изнашивания. – М.: Машиностроение, 1995. – 334 с.
3. Севернев М. М. и др. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин // Под ред. Севернева М. М. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 333 с.
4. Шило И.Н. и др. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин. – Минск: БГАТУ, 2010. – 320 с.

05.02.00

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных, Т.А. Смертина

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

МНОГОУРОВНЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АРМИРУЮЩЕГО КАРКАСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Представлено многоуровневое исследование фильтрационных свойств армирующего каркаса полимерных композитов. Принятый подход основан на применении моделей механики многофазной жидкости на трех масштабных уровнях: уровень волокна, уровень ткани, уровень многослойной выкладки. Верхний уровень соответствует техпроцессу инфузии или пропитки под давлением. Численные модели реализованы в виде универсальных макросов САЕ пакета Ansys. Показано удовлетворительное соответствие данным эксперимента, по которым проведена верификация модели.

Ключевые слова: Многоуровневая модель, композиционный материал, вычислительная гидродинамика.

Введение. Ввиду широкого использования композитных материалов возникает проблема расчетной оценки их конструкционной прочности на этапе проектирования. Ее решение связано с целым комплексом задач и отличается большой сложностью, обусловленной, в частности, многообразием механизмов разрушения армированных пластиков, анизотропией материалов, значительным числом варьируемых переменных, а также возможным присутствием дефектов различного характера [1]. Наиболее часто встречаемыми дефектами в конструкции деталей авиационной техники являются смоляные карманы, поры, складки (или волны в одном или нескольких слоях) и расслоения. Такие дефекты могут образоваться на этапе инфузии или пропитки под давлением - RTM (Resin Transfer Molding) [2]. Помимо этого возникают дефекты, связанные с нарушением формы изделия после пропитки, связанные с сложным термомеханическим поведением полимерных материалов [3]. Разработка технологий RTM для создания ответственных конструкций невозможна без моделирования технологического процесса пропитки. В этой связи поставлена задача многоуровневого исследования фильтрационных свойств армирующего каркаса, учитывающего, в том числе, поверхностное натяжение связующего, особенности укладки волокон в жгутах и жгутов в ткани и другие факторы. В настоящей работе построена полная многоуровневая модель без учета указанных дополнительных факторов.

Математическая модель. Общая система уравнений, описывающая нестационарный процесс пропитки в пористой среде для фазы α , с учетом ламинарности течения, включает:

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_j) = 0, \quad (7)$$

уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial \rho^\alpha U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho^\alpha U_i U_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu^\alpha \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = - \frac{\partial P}{\partial x_i} - C_{Ri} U_i, \quad (8)$$

где U - вектор скорости, ρ - плотность, μ - динамическая вязкость, P - давление, C_{Ri} - коэффициенты линейных потерь.

Для всех поставленных задач было получено численное решение методом конечных объемов в пакете Ansys CFX.

Первый масштабный уровень. Главная задача на данном уровне состоит в определении фильтрующих свойств нитей ткани. Для этого рассмотрены две численные модели, определяющие характер течения жидкости в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

вдоль и поперек волокон. Предполагается, что волокна имеют круглое сечение радиуса r_f , расстояние между соседними волокнами a_f . Расчетные схемы моделей представлены на рис. 1. В качестве связующего рассматривается эпоксидная смола Araldite ly 8615. Модели имеют аналогичные граничные условия: скорость на входе $U_{in}=0.1\text{ мм/с}$, избыточное давление на выходе $P_{out}=0$, границы волокон представляют собой адиабатические стенки, остальные границы являются плоскостями симметрии. Исследуется ламинарное стационарное течение связующего. Жидкость движется свободно, линейные потери в (2) не учитываются ($C_{Ri}=0$).

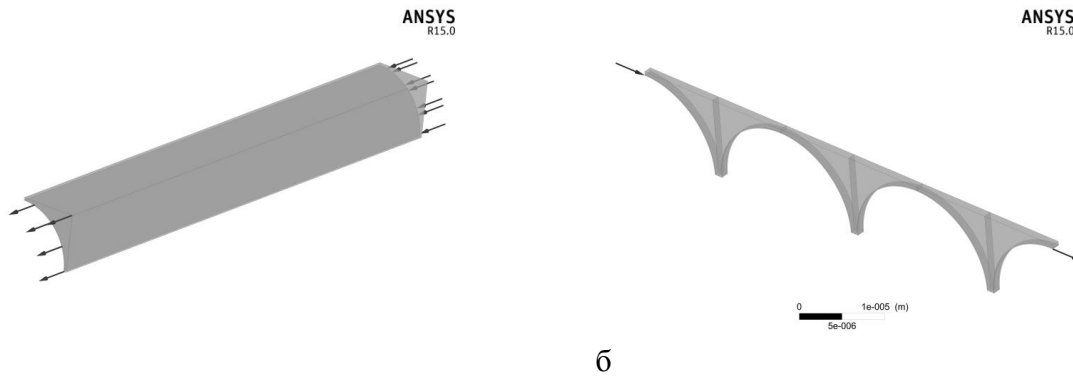


Рис. 1 – Расчетная схема задачи течения связующего: а) вдоль волокна, б) поперек волокна

Полученное численное решение системы (1)-(2) в дальнейшем используется для описания течения связующего внутри нити (пучка волокон), рассматриваемой в качестве пористой среды. Исходя из формулировки закона Дарси [4], выражение для эффективного линейного коэффициента потерь будет иметь вид

$$C_R = \frac{-\Delta P}{U_m L}, \quad (9)$$

где, U_m - средняя скорость потока в направлении пропитки, ΔP - перепад давления между выходом и входом. Найдены коэффициенты $C_{R1}=3.6 \cdot 10^{11} \text{ кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$, $C_{R2}=1.34 \cdot 10^{12} \text{ кг}/(\text{м}^3 \text{ с})$ вдоль и поперек волокна соответственно. Пористость среды нитей, уложенных по представленной схеме, определяется по формуле $\phi = V_0/V = \pi r_f^2 / (r_f + a_f)^2 = 0.294$, где V_0 - объем полостей, V - общий объем, включающий V_0 и объем волокон.

Второй масштабный уровень. В качестве расчетной модели выступает ячейка периодичности равнопрочной стеклоткани Porcher 7781, имеющей сатиновое 8-ремизное плетение. На данном уровне определяются фильтрующие свойства ткани для двух вариантов течения связующего: вдоль нитей основы ткани (рис. 2), и по нормали к плоскости ткани. Рассматривается один слой ткани, представляющий собой (в терминах ANSYS CFX) 8 доменов нитей утка, 8 доменов нитей основы, а также домен, включающий зону полости между нитями, занятую связующим. Данный домен имеет общую границу со всеми доменами нитей. Домены нитей общих границ между собой не имеют.

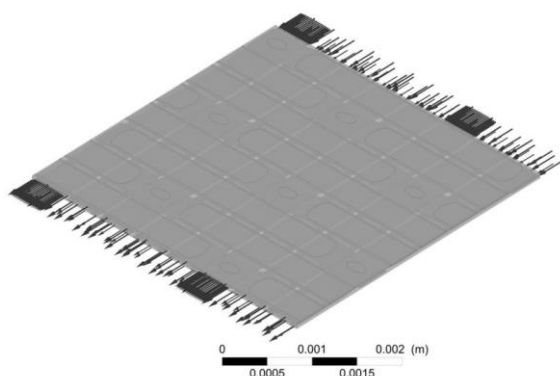


Рис. 2 – Расчетная схема протекания связующего через ткань

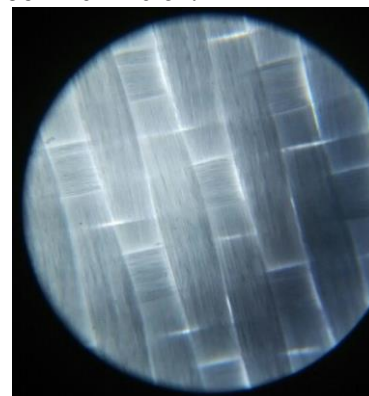


Рис. 3 – Фотография плетения ткани Porcher 7781

Все домены нитей представляют собой пористую среду с заданными значениями C_{R1} , C_{R2} , ϕ , полученными на предыдущем масштабном уровне. Автоматизированная генерация

конечно-объемной сетки реализована в пакете Ansys Mechanical APDL с помощью макроса на встроенном языке APDL. Автоматизированное создание проекта Ansys CFX (домены, граничные условия, интерфейсы) реализовано с помощью макроса на встроенном языке CEL с использованием языка Perl. Граничные условия для первого случая течения: давление на входе $P_{in}=0$, давление на выходе $P_{out}=-754$ Па, Верхняя, нижняя, а также боковые грани модели являются плоскостями симметрии. Граничные условия для второго случая: скорость на верхней границе $U_{in}=0.1$ мм/с, избыточное давление на нижней границе $P_{out}=0$, все боковые границы являются плоскостями симметрии. Для описания сопротивления пористой среды используется модель прямых потерь. Анизотропные свойства проницаемости основы и утка задавались с помощью направляющего вектора. Траектория нитей в зонах переплетения описывалась тригонометрическими функциями вида $y=T_t/2 \cdot \sin(\pi x/S+\varphi_0)$, T_t – полутолщина ткани, S – шаг плетения. В соответствии с данным законом аналитически вычислялись компоненты направляющего вектора главных осей анизотропии пористых доменов. Течение полагается ламинарным, стационарным.

Результаты численного решения описанных краевых задач далее используются при расчете течения связующего в процессе пропитки под давлением технологического пакета, рассматриваемой в качестве трансверсально изотропной пористой среды.. С помощью (3) получены линейные коэффициенты потерь $C_{R3}=8.14 \cdot 10^{11}$ кг/(м³с), $C_{R4}=7.8 \cdot 10^{10}$ кг/(м³с) для задачи течения вдоль и поперек ткани соответственно. Эффективный коэффициент пористости ткани вычислялся по формуле:

$$\phi_2 = \frac{V_0}{V} = \frac{\left(\sum_i^8 V_i^{warp} + \sum_i^8 V_i^{weft}\right) \phi_1 + V_0}{\sum_i^8 V_i^{warp} + \sum_i^8 V_i^{weft} + V_0},$$

где V_i^{warp} и V_i^{weft} объемы основы и утка соответственно. Полученное значение пористости равно 0.44.

Третий масштабный уровень. На данном моделируется процесс пропитки технологического пакета размерами 100х500 мм, включающего в себя 9 слоев ткани. Расчетная схема представляет собой параллелепипед заданных размеров. Граничные условия: давление на входе $P_{inp}=0$, давление на выходе $P_{out}=-98$ кПа (вакуум), все остальные границы являются твердыми адиабатическими стенками. Исследуется ламинарное нестационарное многофазное течение системы связующее-воздух. Для учета многофазности используется гомогенная модель. В качестве критерия сходимости на каждом шаге по времени используется абсолютное значение средней невязки $RMS=1e-5$. Начальные условия включают начальное распределение объемного содержания связующего $\gamma_s(x,0)=1$, $x \leq x_0$ и начальное распределение давления $P^0=\gamma_s(P_{out}-P_{in})x/x_0+P_{in}$, $x_0=10$ мм - длина заполненного связующим участка пакета в начальный момент времени.

В результате решения была получена эволюция фронта пропитки технологического пакета (рис. 4). Для верификации данных расчета проведен натурный эксперимент при аналогичных условиях.

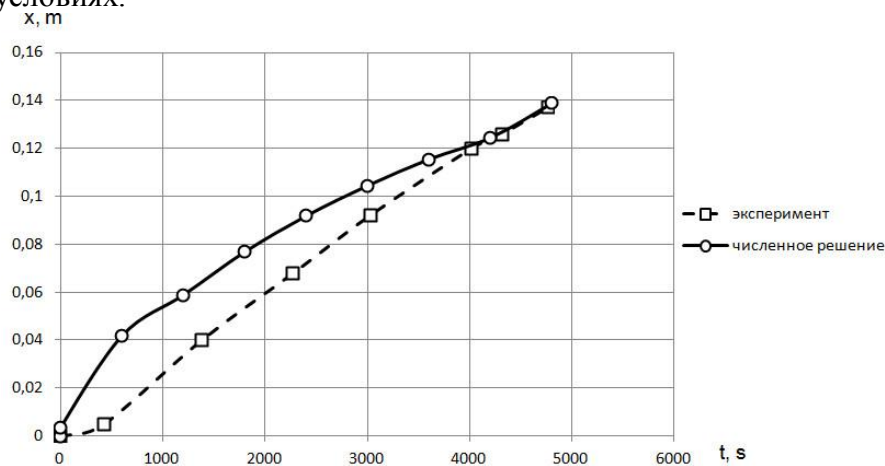


Рис. 4 – Движение фронта пропитки

Обсуждение результатов. Сравнение представленных на рис. 4 кривых показывает, что, в среднем, к завершению эксперимента фронты пропитки сравнялись. В то же время расчетная скорость фронта на начальном этапе выше наблюдаемой в опыте. Это может быть, в частности, связано с капиллярными эффектами, влияние которых при малых продвижениях фронта пропитки оказывается существенным. Использование многоуровневой модели позволяет на первом масштабном уровне учесть поверхностное натяжение и смачиваемость волокон при решении нестационарной двухфазной задачи, что является предметом дальнейших исследований. Кроме того, принятый подход является универсальным в отношении различных типов тканей при точном прогнозировании и проектировании режимов пропитки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 16-48-590809).

Список литературы

1. A.N. Anoshkin, V. Yu. Zuiko, M.A. Alikin, A.V. Tchugaynova. NUMERICAL SIMULATION OF MECHANICAL BEHAVIOR OF COMPOSITE SANDWICH PANELS WITH DEFECTS // VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. Create Island, Greece, 5–10 June 2016.
2. Laurenzi, S. and Marchetti, M. (2012). Advanced Composite Materials by Resin Transfer Molding for Aerospace Applications, Composites and Their Properties, Prof. Ning Hu (Ed.), ISBN: 978-953-51-0711-8, InTech, DOI: 10.5772/48172. Available from: <http://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/advanced-composite-materials-by-resin-transfer-molding-for-aerospace-applications>
3. Matveenko V.P., Smetannikov O.Yu., Trufanov N.A., Shardakov I.N. Models of thermomechanical behavior of polymeric materials undergoing glass transition// Acta Mechanica. 2012, V. 223, N 6, P. 1261-1284.
4. Brinkman, H.C. (1949) "A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles". Applied Scientific Research. 1: 27-34. doi:10.1007/BF02120313

05.02.00

А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев д.т.н., А.В. Котин, Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные тепловые станции,
Нижний Новгород, wisestjedi@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ

В работе представлены результаты численного моделирования теплогидравлических процессов в каналах теплообменного оборудования ЯЭУ с ленточными интенсификаторами различной геометрии.

Ключевые слова: численное моделирование, модель турбулентности, интенсификация теплообмена.

Проектирование теплообменного оборудования ЯЭУ сопряжено с решением ряда инженерных задач. Одной из наиболее важных – является выбор и расчёт теплообменной поверхности. Форма и компактность теплообменной поверхности определяет массогабаритные характеристики теплообменника в целом. Широко применяемые до настоящего времени методики расчета теплообменников основаны на использовании средних по всему объему параметров: температурного напора, условного среднего коэффициента теплоотдачи, эффективной площади контакта теплоносителей и др. Данные методики базируются целиком на опытных данных и теории подобия в форме обобщающих критериальных уравнений. В этих условиях точность расчета и проектирования теплообменных аппаратов целиком и полностью базируется на производственном опыте создания теплообменников, который является весьма специфическим и для переноса на новые объекты требует экспериментальной проверки.

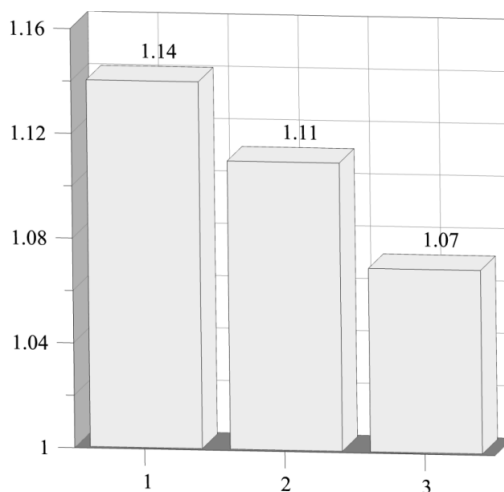
Оценка эффективности представляет собой набор критериев, показывающих лишь качественное различие между различными поверхностями теплообмена. Величина коэффициента эффективности показывает соотношение между приростом коэффициента теплоотдачи по сравнению с увеличением гидравлического сопротивления канала за счёт использования новой поверхности теплообмена. Однако, его величина не позволяет определить какие-либо количественные сравнительные характеристики. Количественная оценка сопряжена с проведением дополнительных экспериментальных исследований по определению требуемого параметра теплообменной поверхности (эквивалентной с точки зрения соотношения теплоотдачи и потерь на трение). В свою очередь, проведение необходимых экспериментальных исследований приводит к росту капитальных затрат при создании нового теплообменного оборудования.

С активным развитием технологий математического моделирования, в основе которых лежат фундаментальные уравнения гидрогазодинамики, стало возможно расчетным путем определять параметры потока различных сред (давления, скорости) с определением характеристик конвективного теплообмена. Применение технологии компьютерного моделирования процессов в теплообменниках позволит снизить затраты на их проектирование и выбрать рациональные конструкции и режимы их эксплуатации без проведения масштабных экспериментальных исследований. В связи с этим, целями данной работы являются:

- создание методики проведения численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в каналах с ленточными завихрителями;
- расчётная оценка эффективности применения ленточных интенсификаторов теплообмена с постоянным шагом навивки в каналах теплообменного оборудования.

Экспериментальные исследования интенсификации теплообмена

Экспериментальные исследования проводились на теплофизическом стенде ФТ-80, предназначенном для исследования процессов тепломассопереноса, теплогидравлических, ресурсных характеристик парогенерирующих элементов, а также процессов устойчивости и опрокидывания циркуляции. Подробное описание модели и методики проведенных экспериментальных исследований приведено в [1]. Сравнительный анализ интенсификаторов заключался в оценке их эффективности с точки зрения рациональной интенсификации. В основе метода лежит сравнение интенсивности теплоотдачи в канале с завихрителем и без него при равных величинах мощности на прокачку теплоносителя. Полученные значения коэффициента эффективности приведены на рис. 1.



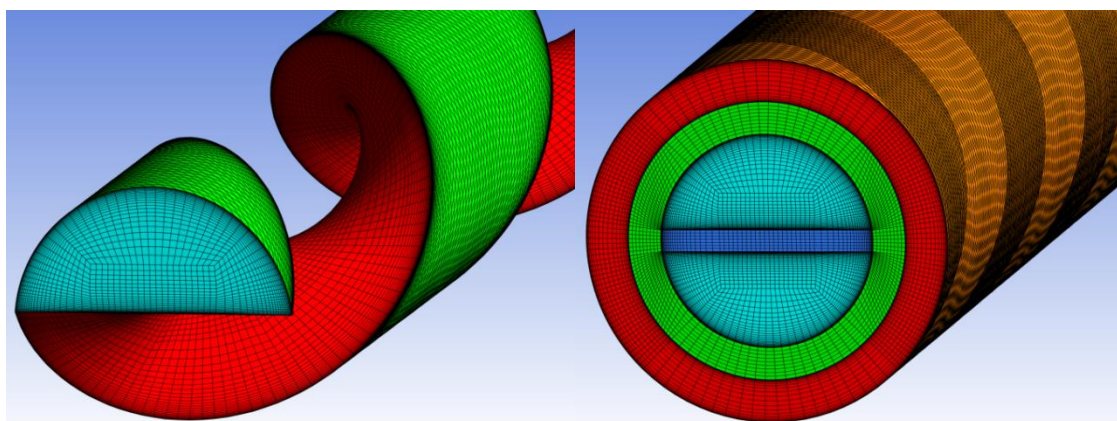
1 – $s/d = 4$; 2 – $s/d = 6$; 3 – $s/d = 8$;

Рис. 1-Коэффициент эффективности

Величина коэффициента определенная в рамках выбранного метода позволяет производить лишь качественное сравнение выбранного канала с каналом без вставки ($k_{эфф}=1$). При проведении инженерных расчётов необходимо обладать количественными соотношениями, на основе которых можно оценить уменьшение массогабаритных характеристик проектируемого оборудования, за счёт применения модернизированной теплообменной поверхности. Наиболее важным параметром является длина теплообменной поверхности, так как её величина определяет компактность теплообменника в целом.

Численное моделирование теплогидравлических процессов

На первом этапе, по результатам аналитического обзора современных подходов к моделированию теплогидравлических процессов в каналах сложной формы, была выбрана модель турбулентности напряжений Рейнольдса BSL RSM[2]. В этой модели уравнение переноса решается для каждой из шести компонент тензора рейнольдсовых напряжений, что позволяет учитывать большинство эффектов, присущих турбулентному закрученному течению. В ходе исследований было изготовлено две конечно-элементные модели. Первая – упрощенная модель канала, включающая в себя половину области охлаждающей жидкости, необходимая для проведения моделирования гидродинамических процессов в изотермической постановке (рис. 2а), вторая – полная модель канала, включающая области жидкостей и теплообменной поверхности (рис. 2б). Длина моделей соответствует высоте активной части канала 2280 мм. Размерность конечно-элементных моделей составила 11 млн. элементов, 50 млн. элементов соответственно.

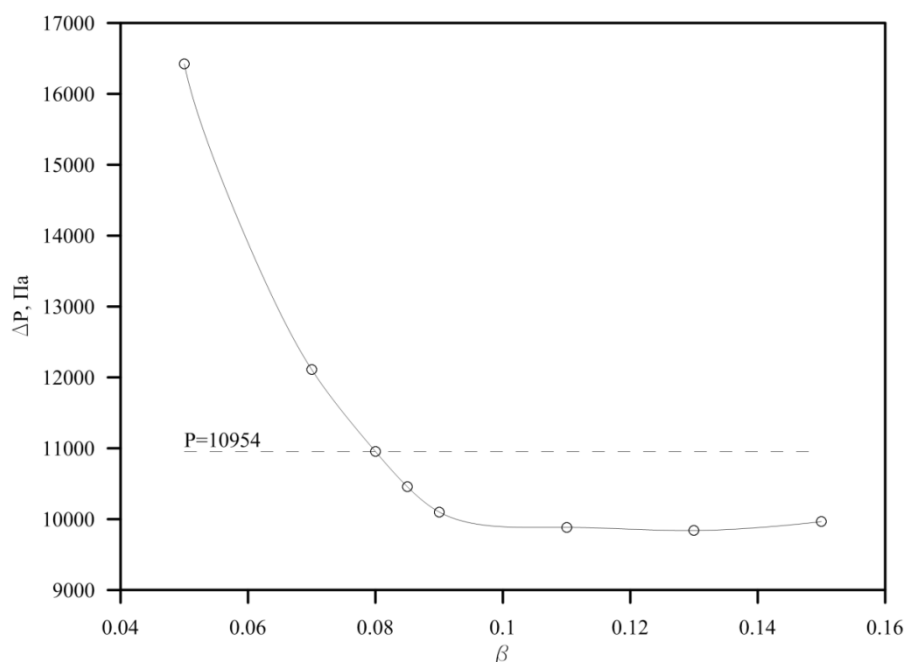


а) упрощенная модель канала

б) полная модель канала

Рис. 2-Сеточные модели

Следующий этап включал в себя цикл расчётных исследований, направленных на определение оптимальных параметров BSL RSM модели турбулентности. Одним из определяющих параметров является коэффициент β^* [3]. Данный коэффициент входит в соотношение корреляции давления и скорости деформации в уравнении для тензора турбулентных напряжений Рейнольдса и отвечает за перераспределение энергии между компонентами тензора. Подбор необходимого значения коэффициента проводился для режима, соответствующего наибольшему расходу рабочего тела, в рекомендованном разработчиками диапазоне изменения параметра: 0.05-0.15. Полученная зависимость гидравлического сопротивления канала от коэффициента β^* представлена на рис. 3. Пунктиром на рисунке обозначено экспериментальное значение гидравлического сопротивления при максимальном расходе. Анализ полученного распределения позволил определить оптимальное значение β^* равное 0.08.

Рис. 3-Зависимость гидравлического сопротивления канала от β^*

Заключительный этап включал в себя моделирование процесса теплообмена в канале с ленточным завихрителем с шагом навивки 40 мм во всем диапазоне параметров экспериментальных исследований, а также моделирование теплообмена в канале без вставки. Для определения эквивалентной, с точки зрения теплоотдачи, длины кольцевого канала без вставки был проведен цикл из 4 расчётов для каждого экспериментального режима. В ходе каждого цикла исследовалась зависимость температуры выхода нагреваемого теплоносителя от длины модели. В качестве реперных величин длины модели были выбраны 2280 мм, 2508 мм, 2736 мм, 2964 мм. Другие параметры греющего теплоносителя и рабочего тела

соответствовали экспериментальным значениям. По результатам моделирования определены эквивалентные длины кольцевых каналов для каждого режима и для интенсификатора в целом.

Заключение

В результате расчётных исследований процессов гидродинамики и теплообмена в каналах с ленточными завихрителями было установлено:

- BSL – RSM модель турбулентности позволяет с необходимой точностью проводить численное моделирование теплогидравлических процессов в каналах закрученной формы;
- оптимальное значение коэффициента β^* корреляции давления и скорости деформации в уравнении для тензора турбулентных напряжений Рейнольдса равно 0.08;
- применение ленточного интенсификатора с шагом навивки 40 мм с коэффициентом эффективности 1.14 в каналах теплообменного оборудования позволит сократить длину теплообменной поверхности на 13%.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Соборнов А.Е. Экспериментальное исследование процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различной геометрии / Соборнов А.Е. [и др.]// Журнал "Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева" №2 (99), 2013. С. 134-141.
2. Menter, F. R. Best Practice: Scale-Resolving Simulations in ANSYS CFD. - ANSYS Germany GmbH, 2012. – 70 p.
3. Белов, И.А. Моделирование турбулентных течений / И.А. Белов, С.А. Исаев. – Санкт-Петербург, 2001. – 109 с.

05.02.00

**А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев д.т.н., А.В. Котин,
Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, М.А. Легчанов к.т.н.**

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные тепловые станции,
Нижний Новгород, wisestjedi@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ

В работе представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию теплогидравлических процессов в каналах теплообменного оборудования ЯЭУ с ленточными интенсификаторами различной геометрии.

Ключевые слова: *оценка эффективности, интенсификация теплообмена, гидравлическое сопротивление.*

Наиболее рациональным способом повышения энергетической эффективности оборудования ЯЭУ, позволяющим избежать значительного роста массогабаритных характеристик теплообменного оборудования, является интенсификация процессов тепломассопереноса [1]. Наиболее доступными, с точки зрения капитальных затрат, являются пассивные методы интенсификации. Действие таких методов направлено на турбулизацию или разрушение пограничного слоя, а также на модернизацию теплообменной поверхности. Характерной особенностью, присущей пассивным методам является возникновение вторичных течений теплоносителя, что, с одной стороны, вызывает значительное увеличение величины локального коэффициента теплоотдачи, а, с другой, приводит к росту величины гидравлического сопротивления канала [2].

Таким образом, применение различных методов интенсификации теплообмена невозможно без комплексного анализа процессов тепломассопереноса в потоке теплоносителя и без оценки эффективности выбранного метода интенсификации.

В рамках данной работы проводились экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями большой протяженности ($l \approx 240d$) в диапазоне параметров, соответствующих режимам эксплуатации теплообменного оборудования ядерных энергетических установок [3]. Основными целями данной работы являлись:

- выбор оптимальной геометрической формы интенсификатора теплообмена на основе результатов рациональной оценки эффективности их применения;
- создание экспериментальной базы для верификации численных методов, предназначенных для определения характеристик потока при движении жидкости в каналах криволинейной формы.

Экспериментальный стенд и методика проведения экспериментов

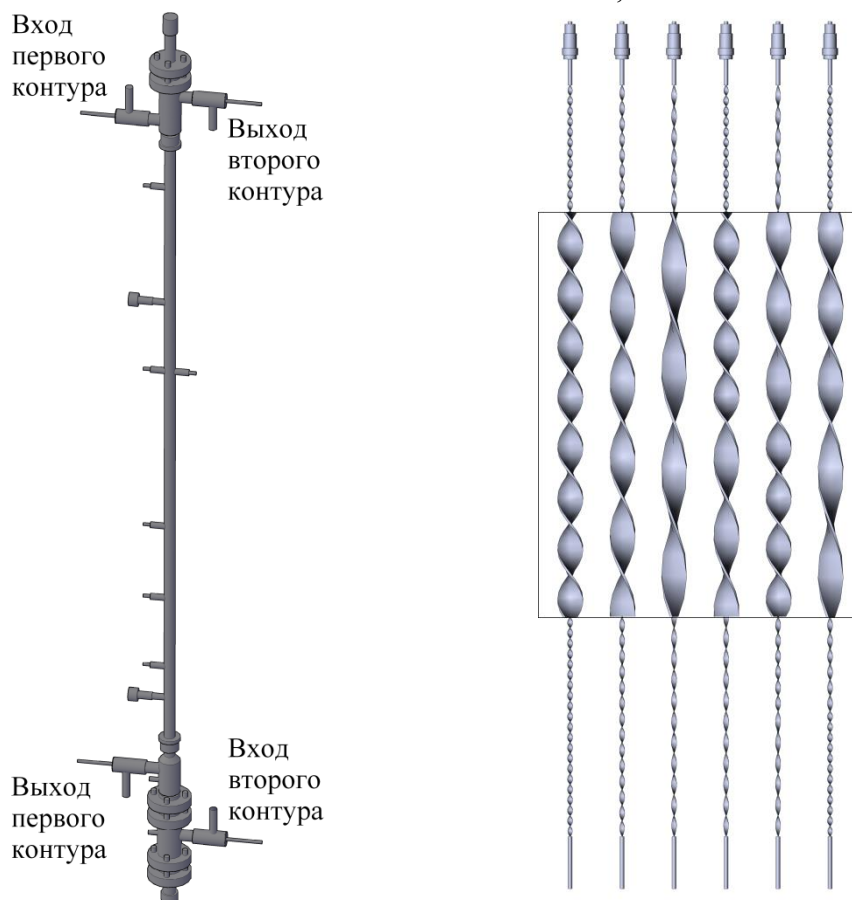
Экспериментальные исследования интенсификации теплообмена проводились на теплофизическом стенде ФТ-80, предназначенном для исследования процессов тепломассопереноса, теплогидравлических, ресурсных характеристик парогенерирующих элементов, а также процессов устойчивости и опрокидывания циркуляции. В состав стенда входит три гидравлических контура. Первый и второй контуры являются гидравлически замкнутыми и находятся под избыточным давлением, в диапазоне от 1.0 до 18.0 МПа, третий контур незамкнут и служит для охлаждения основного оборудования.

Общий вид экспериментальной модели, предназначенной для исследования теплогидравлических характеристик потока теплоносителя, представлен на рис. 1а. Общая длина модели составляет 2940 мм. Длина активной части теплообменной поверхности составляет 2440 мм. Измерение температуры теплоносителей и теплообменной поверхности

производится в 11 сечениях по высоте модели.

Ленточный завихритель представляет собой полосу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм и шириной 9.8 мм, закрученную вокруг центральной оси (рис. 1б). Длина интенсификатора теплообмена соответствует длине активной части теплообменной трубы экспериментальной модели. Всего было изготовлено шесть ленточных завихрителей:

- 1) три с постоянным относительным шагом навивки $s/d = 4, 6$ и 8 соответственно;



а) - экспериментальная модель; б) - ленточные завихрители

Рис. 1-Экспериментальный участок:

- 2) с чередующимся шагом навивки $s/d = 4-6-8-6-4$, при этом длина центрального участка с шагом 80 мм наибольшая;

- 3) с чередующимся шагом навивки $s/d = 8-6-4-6-8$, длина центрального участка с шагом 40 мм наибольшая;

- 4) с уменьшающимся шагом навивки $s/d = 8-6-4$.

Экспериментальные исследования проводились при давлении в первом контуре 11 МПа и давлении во втором контуре 5 МПа. Температура теплоносителя первого контура на входе в экспериментальную модель поддерживалась на уровне $250 \div 260^{\circ}\text{C}$. Температура теплоносителя второго контура на входе в модель составляла $40 \div 50^{\circ}\text{C}$. Режим движения теплоносителя второго контура - ламинарный с макровихрями[3].

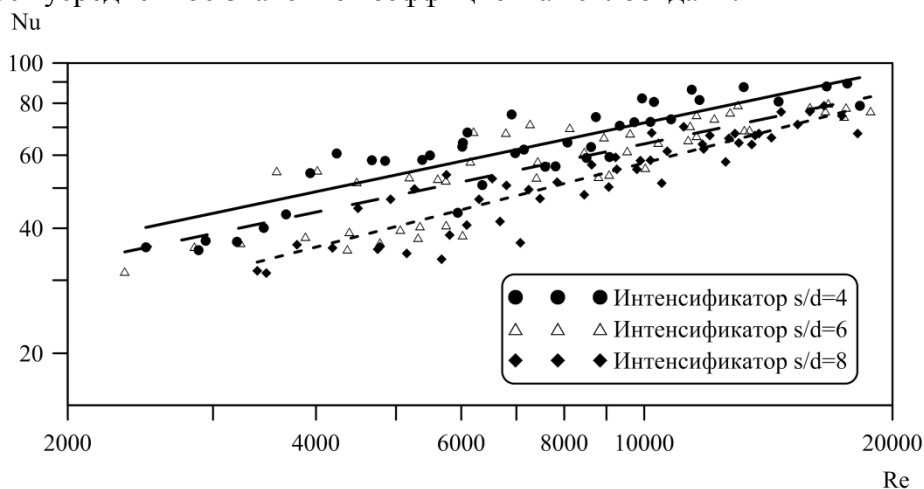
Результаты экспериментальных исследований

Анализ полученных значений позволил заключить, что для всех интенсификаторов с увеличением расхода нагреваемого теплоносителя наблюдается рост интенсивности теплоотдачи. Данный вывод полностью согласуется с теоретическими представлениями о структуре закрученных потоков [2]. Увеличение местного коэффициента теплоотдачи связано с возрастающим влиянием вторичных течений на процессы теплообмена.

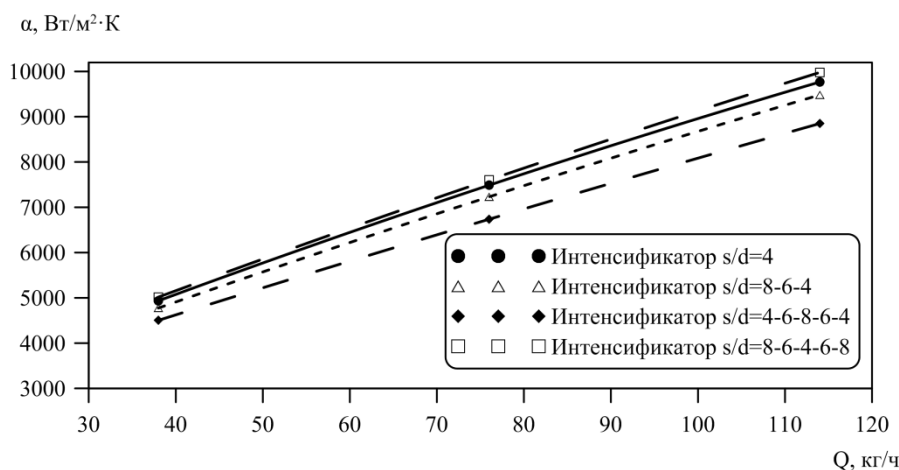
Для проведения сравнительного анализа интенсивности теплопередачи при использовании интенсификаторов постоянного шага навивки были построены зависимости $Nu(Re)$ при фиксированном значении расходов теплоносителей. Характерная зависимость при максимальном расходе греющего теплоносителя представлена на рис. 2.

В ходе обобщения полученных данных было установлено, что среди интенсификаторов с постоянным шагом навивки наибольший эффект во всем диапазоне значений расхода греющего теплоносителя достигается при применении завихрителя с шагом 40 мм.

Для оценки теплопередачи при использовании интенсификаторов с переменным шагом использовалось усредненное значение коэффициента теплоотдачи.

Рис. 2-Зависимость $Nu-Re$

Построены зависимости усредненного значения коэффициента теплоотдачи от расхода нагреваемой жидкости при фиксированных значениях расхода греющего теплоносителя (рис.3).

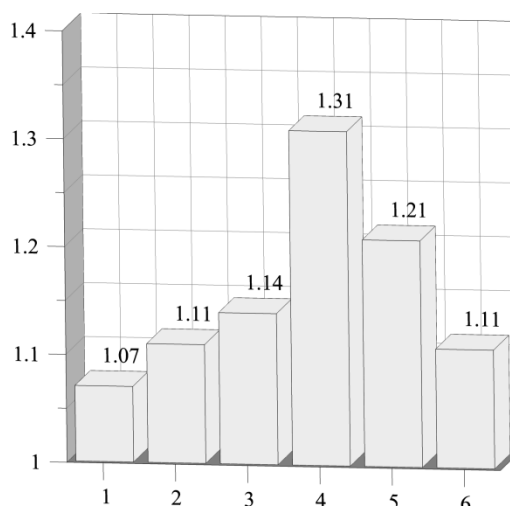
Рис. 3-Зависимость $\alpha(Q)$

Анализ построенных зависимостей позволил сделать вывод о наибольшей эффективности в интенсификации процесса теплообмена ленточного завихрителя с чередующимся относительным шагом навивки $s/d = 8-6-4-6-8$ во всем диапазоне значений расхода греющего теплоносителя.

Для проведения более корректного сравнения эффективности применения интенсификаторов теплообмена следует так же сравнивать их вклад в увеличение гидравлического сопротивления, вследствие усложнения геометрической формы канала. Установлено, что наибольшей величиной гидравлического сопротивления обладает канал с ленточным завихрителем с чередующимся относительным шагом навивки $s/d = 8-6-4-6-8$. Таким образом, применение интенсификатора с $s/d = 8-6-4-6-8$ с одной стороны обеспечивает наибольшее значение коэффициента теплоотдачи, а, с другой, приводит к наибольшему увеличению величины гидравлического сопротивления канала. Такая неоднозначность затрудняет выбор наиболее оптимальной геометрии завихрителя и диктует необходимость проведения сравнительного анализа интенсификаторов на основе критерия эффективности.

Оценка эффективности применения ленточных завихрителей

Сравнительный анализ интенсификаторов заключался в оценке их эффективности с точки зрения рациональной интенсификации [1]. Результат оценки представлен на рис. 4.



1 – $s/d = 8$; 2 – $s/d = 6$; 3 – $s/d = 4$; 4 – $s/d = 8-6-4-6-8$; 5 – $s/d = 4-6-8$; 6 – $s/d = 4-6-8-6-4$

Рис. 4-Коэффициент эффективности применения ленточных завихрителей

Заключение

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований процессов гидродинамики и теплообмена в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различного шага навивки, позволил установить что наиболее эффективным, с точки зрения рациональной интенсификации, завихрителем является ленточный завихритель с чередующимся шагом навивки $s/d = 8-6-4-6-8$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Будов В.М., Дмитриев С.М. «Форсированные теплообменники ЯЭУ». – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174с.
2. Щукин В.К. «Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил». – М.: Машиностроение, 1980. – 240с.
3. Соборнов А.Е. Экспериментальное исследование процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различной геометрии / Соборнов А.Е. [и др.]// Журнал "Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева" №2 (99), 2013. С. 134-141.

05.02.00

А.Е. Хробостов к.т.н., А.В. Варенцов, Н.С. Волков, Н.П. Курбатова, А.Н. Терехин

Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции,
Нижний Новгород, vav88@mail.ru

**ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В
ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ
ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ
ДЕФЛЕКТОРОВ**

В работе представлены комплексные исследования по определению гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов.

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В АО «ОКБМ Африкантов» разработана конструкция ТВС-КВАДРАТ для активной зоны реакторов типа PWR, конкурентоспособная с зарубежными аналогами по надежности, безопасности, экономичности и технологичности. В частности, в конструкции ТВС-КВАДРАТ использованы конструкторские решения по каркасу ТВС и дистанционирующей решетке, которые позволяют повысить эксплуатационную надежность ядерного топлива в реакторах PWR [1].

Исследования проводились в НГТУ им. Р.Е. Алексеева на аэродинамическом экспериментальном стенде. Экспериментальная модель представляет собой фрагмент ТВС-КВАДРАТ реактора типа PWR и выполнена в полном геометрическом подобии со штатной топливной сборкой [2].

На основе проведенных комплексных исследований определены гидродинамические характеристики потока и выявлены особенности течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR с дефлекторами типа «косой гиб», «прямой гиб», «обратный гиб» [3].

За любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии $\Delta l/d_z = 3 - 5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб» (рис.1а,б), и на расстоянии $\Delta l/d_z = 10 - 12$ за дефлекторами типа «прямой гиб» ($\Delta l/d_z$ – характерные отрезки распространения возмущений; l/d_z – координата с расположением сечения измерения вектора скорости, где l – длина до сечения измерения от выхода модели, d_z – гидравлический диаметр.) (рис.1в).

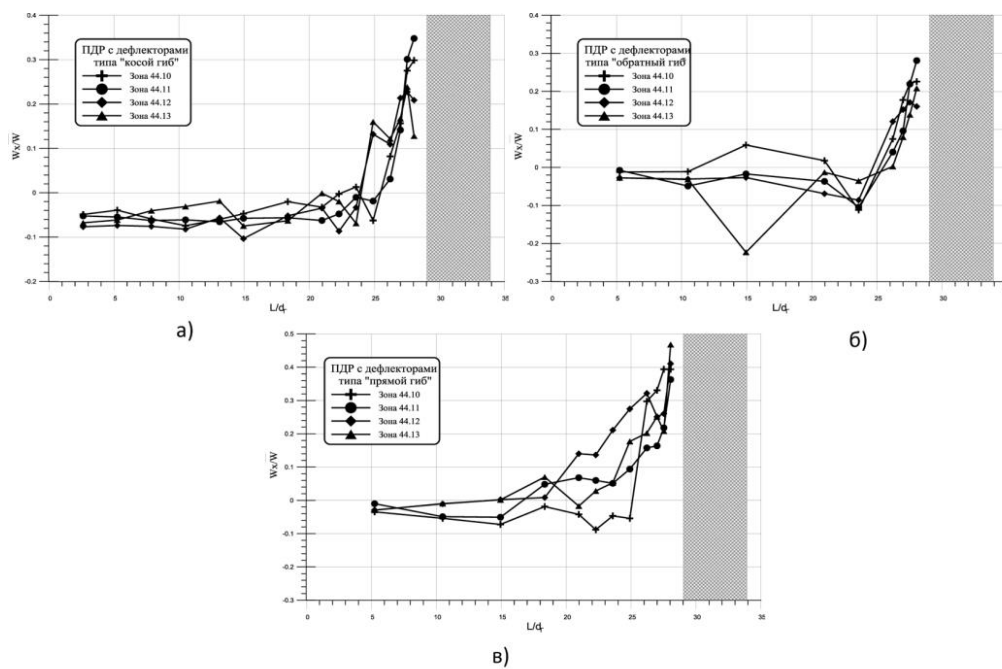


Рис. 1 - Распределение относительных скоростей ($w_x / \bar{w}$) при постановке ПДР с исследуемыми дефлекторами для зон №№ 44.10, 44.11, 44.12, 44.13, а) дефлектора типа «косой гиб», б) дефлектора типа «обратный гиб», в) дефлектора типа «прямой гиб»

В районе направляющего канала за ПДР с различными типами дефлекторов выделим парные ячейки по варианту расположения дефлекторов:

1. Ячейки, где дефлекторы направляют теплоноситель в аналогичные ячейки области НК.
2. Ячейки, где дефлекторы направляют поток из области НК в стандартные ячейки.

В ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d \approx 5-8$ от решетки (рис.2а,б), омывая поперечным потоком два прилегающих твэла.

При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь в этой же области затухает на расстоянии $\Delta l/d \approx 14$ за ПДР (рис.2в).

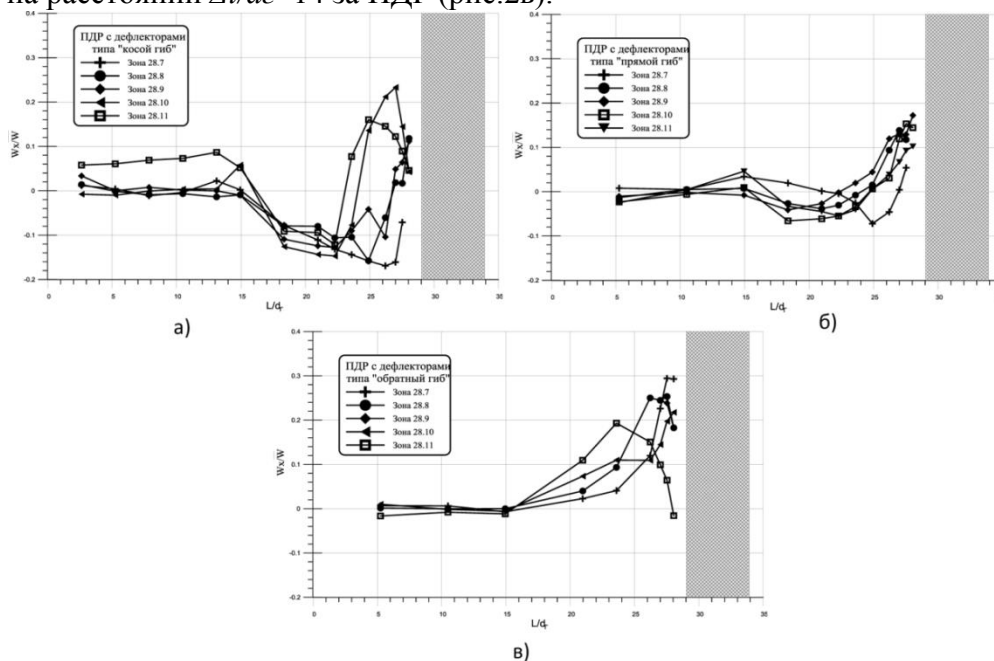


Рис. 2 - Распределение относительных поперечных скоростей ($w_y / \bar{w}$) при постановке ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» для зон №№ 28.7, 28.8, 28.9, 28.10, 28.11; а) дефлектора типа «косой гиб», б) дефлектора типа «прямой гиб», в) дефлектора типа «обратный гиб»

Длина затухания возмущений, вызванных ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» заканчивается на расстоянии $\Delta l/d_z \approx 10 \div 14$ (рис.3)

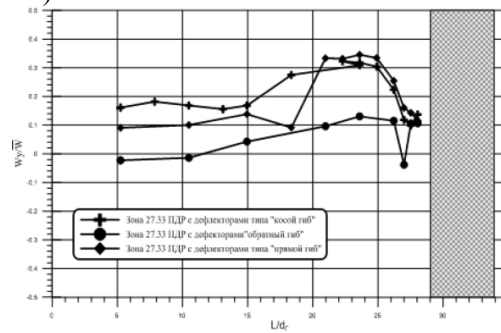


Рис.3 - Распределение относительных поперечных скоростей ($w_y / \bar{w}$) при постановке ПДР с дефлекторами типа «косой гиб», «обратный гиб» и «прямой гиб» для зоны № 27.33

Различие ориентации дефлекторов и площадей проходных сечений ячеек, прилежащих к НК, и стандартных ячеек ТВС-КВАДРАТ, приводит к перераспределению расходов теплоносителя за ПДР. Непосредственно за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» наблюдается вытеснение расхода, которое достигает 30% по отношению к расходу через стандартную ячейку, и на выходе из модели различие расходов между данными ячейками составляет 10% (рис. 4а). В случае установки ПДР с дефлекторами типа «обратный гиб» и «прямой гиб» происходит изменение расхода теплоносителя через эти ячейки на 15-20% по сравнению с расходом через стандартную ячейку и остается практически неизменным на всей длине исследуемого участка (рис.4б,в).

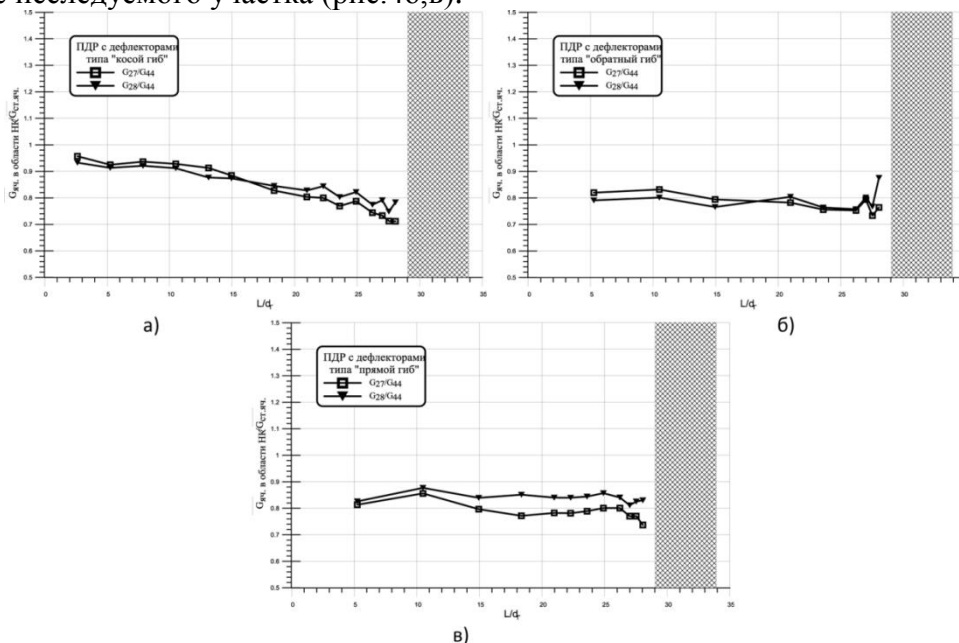


Рис. 4 - Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки №27 и №28 (прилежащие к НК) к стандартной ячейке №44 при постановке ПДР с исследуемыми дефлекторами; а) дефлектора типа «косой гиб», б) дефлектора типа «обратный гиб», в) дефлектора типа «прямой гиб»

Заключение

На основе проведенных комплексных исследований определены гидродинамические характеристики потока и выявлены особенности течения теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR с дефлекторами типа «косой гиб», «прямой гиб», «обратный гиб»:

а) за любым из исследуемых типов дефлекторов образуется вихревое течение, которое прекращается на расстоянии $\Delta l/d_z = 3 - 5$ за дефлекторами типа «косой гиб» и «обратный гиб», и на расстоянии $\Delta l/d_z = 10 - 12$ за дефлекторами типа «прямой гиб».

б) в ячейках НК, где дефлекторы направляют поток в стандартные ячейки, за ПДР с дефлекторами типа «косой гиб» и «прямой гиб» возникает вихрь с длиной затухания $\Delta l/d_z \approx 5-8$ от решетки, омывая поперечным потоком два прилежащих твэла. При постановке решетки с дефлекторами типа «обратный гиб», вихрь в этой же области затухает через $\Delta l/d_z \approx 14$ за ПДР.

в) длина затухания возмущений за ПДР в ячейках, прилежащих к НК, с дефлекторами типа «прямой гиб», «косой гиб» и «обратный гиб» составляет $\Delta l/d_z \approx 10 \div 14$.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от «03» декабря 2014 г. года (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А. и др. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах. 2013.
2. Сергеев Д. А., Кандауров А. А., Троицкая Ю. И., Пахолков В.В., Рогожкин С. А., Шепелев С. Ф. Система измерений полей скорости методом particle image velocimetry для исследования теплогидравлических процессов в крупномасштабной модели перспективного реактора БН// Приборы и техника эксперимента
3. Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Легчанов М.А. и др. Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками. 2013, Т.5. №3, С.98-107.

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ (05.11.00)**

05.11.00

А.А. Баринов, С.М. Дмитриев д.т.н., А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, lxbarinov92@mail.ru

**АДАПТАЦИЯ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ КОНДУКТОМЕТРИИ ДЛЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕШЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНЫМ УСТАНОВКАМ**

Рассмотрены принципы действия измерительных систем с использованием матричных кондуктометров. Дано описание созданной измерительной системы и экспериментального стенда. Разработаны методики исследований, проведены первичные эксперименты. Созданный лабораторно-методический комплекс адаптирован к проведению модельных исследований гидродинамики в реакторных установках.

Ключевые слова: *измерительная система, кондуктометрия, ядерный реактор, гидродинамика теплоносителя, турбулентные потоки.*

Введение

Гидродинамические процессы, происходящие при движении теплоносителя, оказывают существенное влияние на работу оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) [1]. Ввиду сложности протекающих процессов подобные исследования требуют использования методов, обеспечивающих высокое пространственное и временное разрешение физических величин, характеризующих гидродинамику потока. Этим требованиям удовлетворяет метод матричной кондуктометрии [2, 3], использование которого требует создания высокоскоростных и высокоточных многоканальных измерительных систем. Отработку применения данного метода целесообразно производить путем постановки тестовых гидродинамических экспериментов в каналах простой геометрии ввиду наличия представительных результатов, полученных другими методами.

Для решения данных задач в НГТУ им. Р.Е. Алексеева был создан лабораторно-методический комплекс, включающий экспериментальный стенд, тестовые модели и кондуктометрическую измерительную систему с датчиками матричного типа.

Описание экспериментального стенда

Экспериментальный стенд (рис. 1) для исследований процессов тепломассопереноса представляет собой два смежных разомкнутых гидравлических контура, через которые прокачивается специально подготовленная вода. В состав экспериментального стенда входят: экспериментальная модель; сетчатый датчик; насосы; генератор измерительного сигнала; измерительный комплекс; блок управления.

Экспериментальная модель представляет собой канал определенных геометрических параметров, которые выбраны с учетом выполнения условия геометрического подобия с реальными тепловыделяющими сборками ядерного реактора. Модели имеют универсальные присоединительные фланцы, объединенные с трубными досками, в которых закрепляются стержни. Их конструкция позволяет вносить изменения в расположение и компоновку стержневого пучка. Для проведения исследований изготовлены модели каналов круглого сечения, стержневого пучка с квадратной упаковкой стержней а также модель разделенного на половину длины квадратного канала.

Конструкция датчика (рис. 2) позволяет изменять взаимное расстояние между слоями групп электродов. На нижнем фланце СД помещена система клемм для возможности оперативного подключения измерительной схемы к блоку обработки сигнала.

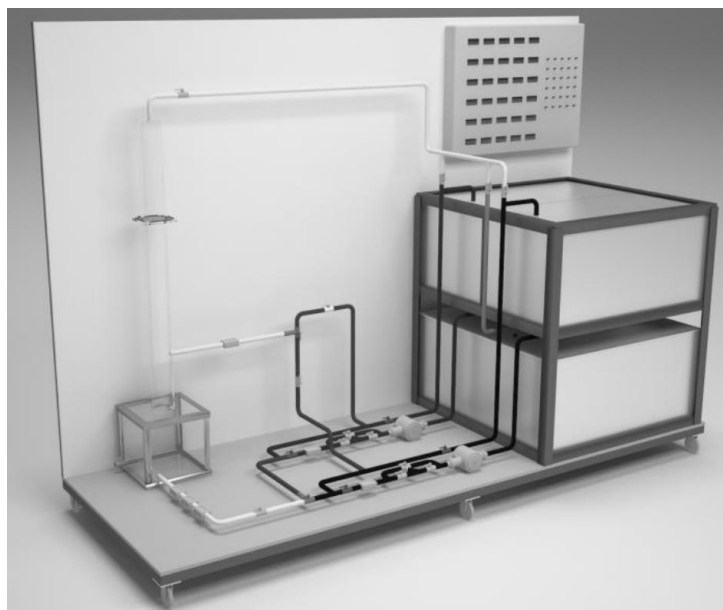


Рис. 1– Общий вид экспериментального стенда

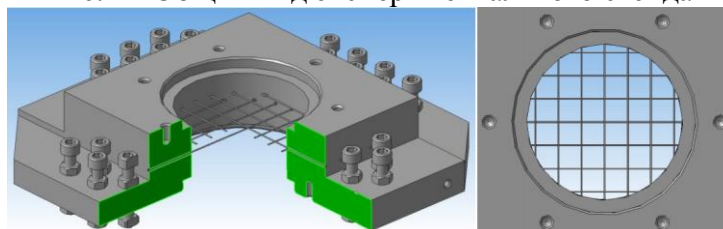


Рис. 2 – Конструкция сетчатого датчика (в разрезе и вид сверху)

Струны СД изготовлены из нержавеющей стали, диаметр струн 0,35-0,5 мм, такой размер не вносит серьезных возмущений в поведение крупных вихревых структур в турбулентном потоке. В корпусе датчика предусмотрена система натяжения электродов, так как набегающий поток среды приводит к деформации струн, что искажает результаты.

Циркуляция среды в контурах стенда обеспечивается насосами, которые имеют ступенчатую регулировку частоты вращения ротора. В совокупности с регулировкой гидравлического сопротивления контура это дает возможность изменять режим течения среды в модели в широких диапазонах чисел Рейнольдса. На циркуляционном трубопроводе закреплены технологические датчики, контролирующие параметры среды. Генератор измерительного сигнала предназначен для подачи на ячейки датчика переменного напряжения заданной частоты и амплитуды. Схема генератора разработана с учетом необходимости усиления по току и стабильности амплитуды колебаний при различной мощности нагрузки (ячейки датчика). Возможности генератора позволяют изменять параметры подаваемого сигнала по амплитуде и частоте.

Для проведения экспериментальных исследований с использованием матричного сеточного зонда необходима электронная автоматизированная многоканальная система сбора и обработки сигналов.

Методики планируемых экспериментов

Процесс теплоотвода от твэлов активной зоны ядерного реактора определяется многими факторами. В первую очередь к ним относятся локальные гидродинамические характеристики потока. Применение метода сетчатой диагностики, основанного на регистрации пространственного распределения комплексной проводимости жидкости, позволяет выполнить детальное исследование этих параметров. В настоящий момент разработаны методики для исследования локальных характеристик потока. Перечислим планируемые эксперименты.

1. Исследование по изучению перемешивания потока в экспериментальной модели (ЭМ) на различных режимах течения среды. После выбора режима течения среды согласно матрице испытаний, солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению

движения потока, подается в начальный участок ЭМ до сетчатого датчика. Далее производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от числа Рейнольдса.

2. Исследование по изучению перемешивания потока ЭМ при различных положениях впускного зонда. Устанавливается положение впускного зонда по высоте ЭМ и режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд, расположенный по направлению движения потока, подается в ЭМ. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках. Устанавливается следующее положение впускного зонда по высоте ЭМ, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строятся картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от координаты впускного зонда.

3. Исследование по изучению осевого профиля скорости потока в ЭМ. Устанавливается режим течения среды согласно матрице испытаний. Солевой трассер через впускной зонд равномерно подается в сечение ЭМ, расположенное на определенном расстоянии от сетчатого датчика. Далее с помощью сетчатого датчика производится замер концентрации трассера во всех исследуемых ячейках последовательно в течение определенного интервала времени. После этого прекращается подача солевого трассера. Устанавливается следующий режим течения среды, и производятся соответствующие замеры для всей матрицы испытаний. По полученным данным строится осевой профиль скорости потока.

Разработан комплекс мер, направленных на апробацию и представительность результатов, также оценена погрешность экспериментальных данных.

Заключение

Детальное исследование гидродинамики внутриреакторных процессов является актуальной задачей, из-за необходимости обоснования теплотехнической надежности реакторных установок, верификации современных системных кодов и программ трехмерных теплогидравлических расчетов [6]. В настоящее время создан лабораторный стенд для отработки и апробации методик по использованию метода сетчатой кондуктометрии в исследовании процессов реакторной гидродинамики. Определены условия работы датчика, проведен анализ физико-химических явлений, оказывающих влияние на работу измерительной системы в целом. Полученные результаты являются базисом, на основе которого обеспечивается дальнейшее развитие данного метода исследований внутриреакторных потоков теплоносителя. Использование матричного сетчатого датчика обеспечивает высокое пространственно-временное разрешение картины течения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013. – 540 с.
2. Графов, Б.М. Электрохимические цепи переменного тока / Б.М. Графов, А.М. Укше. – М.: Наука, 1973. – 128 с.
3. Prasser, H.M. Novel experimental measuring techniques required to provide data for CFD validation // Nuclear Engineering and Design. 2008. № 238. P.744770.
4. Kwak, G. The effects of salt type and salinity on formation water viscosity and NMR response / H. Kwak, G. Zhang, S. Chen // International Symposium of the Society of Core Analyst. – Toronto, Canada, 2005.
5. Электрохимия / Ф. Миомандр [и др.]. – М.: Техносфера, 2008. – 360 с.
6. Методы обоснования теплотехнической надежности активных зон водо-водяных реакторов на тепловых нейтронах / А.А. Баринов [и др.] // Атомная энергия – Москва, 2016. – Т. 120. № 5. – с. 270-275.

05.11.00

А.А. Баринов, С.М. Дмитриев д.т.н., А.Е. Хробостов к.т.н.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт ядерной энергетики и технической физики, кафедра Атомные и тепловые станции
Нижний Новгород, lxbarinov92@mail.ru

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ СОЛЕВОЙ ПРИМЕСИ В ПОТОКЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Проведено исследование характерных особенностей турбулентной диффузии примеси в экспериментальной модели при помощи метода матричной кондуктометрии. Получено хорошее согласие полученных оценок осредненных характеристик потока с данными других исследователей. Выполнены замеры по определению характеристик турбулентных вихревых структур. По результатам данных исследований оценены временные и геометрические масштабы вихрей, распределения спектральной плотности энергии турбулентности в ядре потока.

Ключевые слова: турбулентная диффузия, смешение потоков, кондуктометрия, ядерный реактор, гидродинамика теплоносителя.

Введение

Развитие современных методов расчета процессов смешения неизотермических потоков и потоков с различной концентрацией примеси, приобретающее особую важность при обосновании режимов работы ядерных энергетических установок (ЯЭУ), требует внедрения вихреразрешающего моделирования течений жидкости. Данный подход подразумевает интегрирование балансовых уравнений, описывающих динамику турбулентных вихрей, оказывающих наиболее сильное влияние на процессы смешения. Для верификация расчетов такого типа необходимо использование измерительных методов и приборов, способных восстановить определенные характеристики вихревых структур. Созданный в НГТУ им. Р.Е.Алексеева лабораторно-исследовательский комплекс позволяет проводить исследование процессов турбулентного смешения потоков жидкости при помощи метода пространственной кондуктометрии.

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд представляет собой два независимых гидравлических контура через которые прокачивается специально-подготовленная вода. Основными элементами гидравлического контура являются: экспериментальная модель (ЭМ), сетчатый кондуктометрический датчик, ресиверная емкость, насосы, питательные баки, дренажный бак, трубопроводы и арматура. В состав лабораторного комплекса также входят: измерительный комплекс, блок управления электропотребителями стенда. Схема стенда приведена на рисунке 1.

Контроль солёности сред основного потока и трассера осуществлялся с помощью двухканального кондуктометра, позволяющего одновременно измерять проводимость и температуру. Измерительные датчики закреплены на трубопроводе вблизи от места подачи сред в экспериментальную модель.

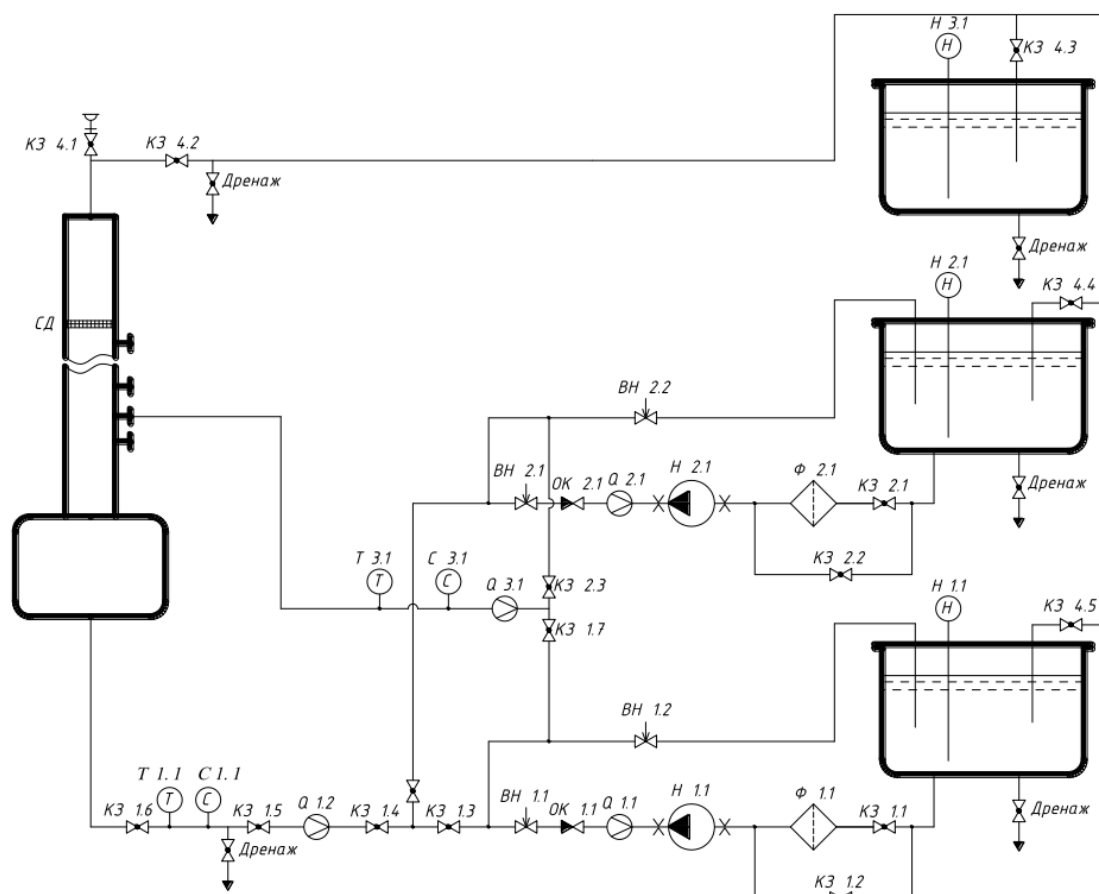


Рис.1– Гидравлическая схема стенда

Экспериментальная модель представляет собой канал круглого поперечного сечения (рисунок 2). Длина модели выбрана с учетом протяженности участка гидродинамической стабилизации потока. Предусмотрена возможность подачи трассера на различных расстояниях от плоскости сетчатого датчика. Модель и сетчатый датчик изображены на рисунке 2.

Разработанный программный комплекс «Кондуктометрия» представляет собой компьютерный интерфейс для управления и постоянного мониторинга данных, получаемых с сетчатого датчика. В программном комплексе реализованы возможности построения распределения измеряемого сигнала, записи значений в файл, построение энергетических спектров, расчет автокорреляционных функций.

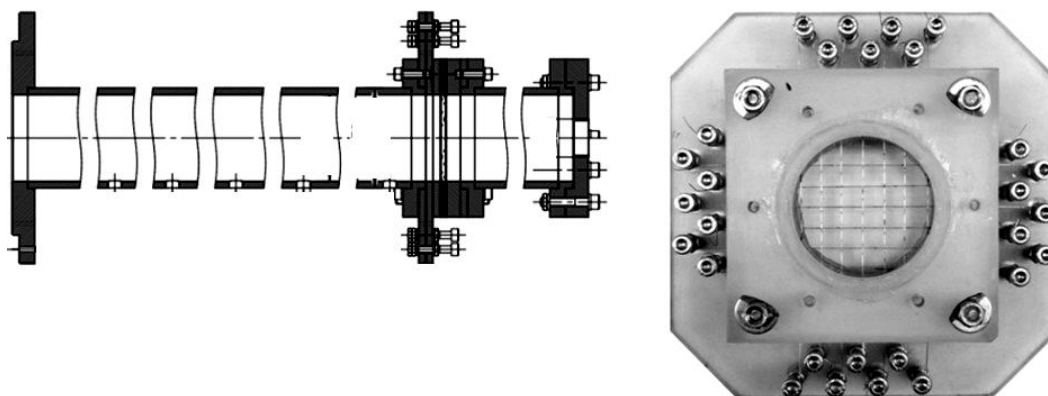


Рис.2– Экспериментальная модель (повернута на 90° по часовой стрелке) и сетчатый датчик

Методика исследований

Методика проведения исследований гидродинамических процессов течения среды заключалась в следующем: солевой трассер через инъекционный капилляр изокинетически подавался в центр канала соосно направлению потока. С помощью сетчатого датчика

проводился замер уровня напряжения в каждой измерительной ячейке в характерных сечениях по длине экспериментальной модели.

В качестве величины, характеризующей концентрацию среды-трассера в ячейках датчика, удобно использовать безразмерную относительную концентрацию - измерительный скаляр $\varphi_{i,j}$ [4]:

$$\varphi_{i,j} = \frac{U_{i,j} - U_{\text{фон } i,j}}{\frac{\lambda_{\text{трассер}}}{\lambda_{\text{опорн}}} \cdot U_{\text{опорн } i,j} - U_{\text{фон } i,j}} \quad (1)$$

где $U_{i,j}$ – измеряемый сигнал ячейки i,j , $U_{\text{фон } i,j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, заполненного средой основного потока с некоторым балансным (фоновым) содержанием, $\lambda_{\text{трассер}}$ – удельная проводимость трассера, $\lambda_{\text{опорн}}$ – удельная проводимость калибровочного (опорного) раствора, $U_{\text{опорн } i,j}$ – сигнал, снимаемый с ячейки датчика, заполненного калибровочным раствором. В результате калибровки находятся значения $U_{\text{опорн } i,j}$ для всех ячеек датчика.

Для описания вихревой структуры потока использовался частотно-энергетический спектр пульсаций [5], как функция волнового числа.

Выводы по результатам исследования гидродинамических процессов течения среды

На основе анализа экспериментальных данных были получены нижеследующие результаты.

1. Получены временные реализации измерительного скаляра (1) при расстоянии от инъекционного капилляра до сечения датчика 0,5-6,5D.

2. По полученным для других ячеек реализациям определялись средние по времени значения, а также пульсационные составляющие измерительного скаляра. Усредненные значения использовались для построения распределения измерительного скаляра, а на основе пульсационных составляющих строился частотно-энергетический спектр (рисунок 3).

3. Построенные зависимости радиальной дисперсии трассера для характерных сечений ЭМ аппроксимируются зависимостью, близкой по форме к графику функции Гаусса. Форма зависимости согласуется с теорией Тейлора, согласно которой распределение частиц трассера в турбулентном потоке подчиняется модели «случайного блуждания», что подтверждается рядом исследований [6].

4. Построен частотно-энергетический спектр пульсаций трассера (рис. 3) в центральной измерительной ячейке. Анализ графика позволяет выделить диапазон волновых чисел основных энергонесущих вихрей: $k=20...75 \text{ м}^{-1}$ (что соответствует характерным размерам 13-50 мм). Полученная оценка размера крупных вихрей в потоке соответствует диаметру гидравлического канала.

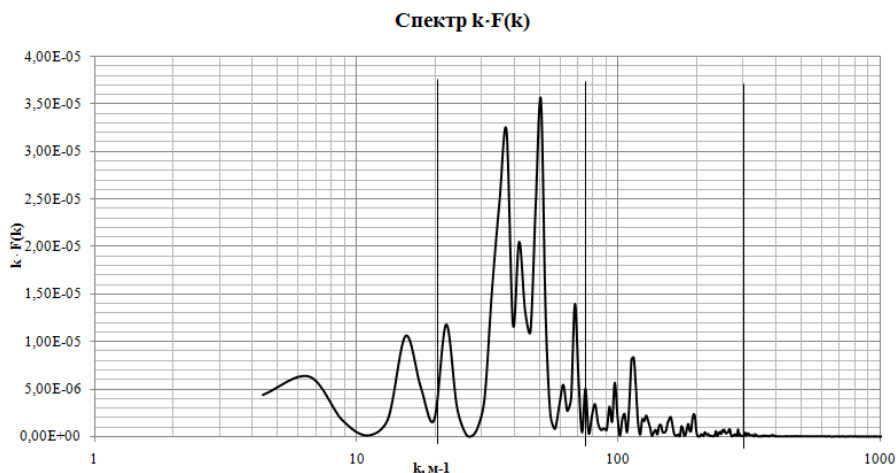


Рис.3– Частотно-энергетический спектр
(центральная ячейка, подача трассера на расстоянии 5D, Re=7200)

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 3 декабря 2014 г. (в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218).

Список литературы

1. Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах: учебник / С.М. Дмитриев [и др.]. – М.: Машиностроение, 2013. – 540 с.
2. *Баринов, А.А.* Внедрение метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / *А.А. Баринов [и др.]* // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. №1. С. 139-145.
3. *Ylonen, A.T.* High-resolution flow structure measurements in a rod bundle/ *A.T. YLONEN.* - Lappeenranta University of Technology, 173, 2013.
4. *Bulk, F.P.* An Experimental Study on Cross-Flow Mixing in a Rod-Bundle Geometry using a Wire-Mesh/ *F.P. Bulk.* - Delft University of Technology, 77, 2012.
5. Руслловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях / *В.С. Боровков.* – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 286 с.
6. *Taylor, G.* The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe/ *G. Taylor.* – Proceedings of the Royal Society of London, 223:446–468, 1954.

05.11.00

Д.С. Мукатин¹, И.В. Нелин к.т.н.,² Д.А. Смирнов³¹ПАО Научно производственное объединение "Алмаз",
Москва, d.mukatin@mail.ru;²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
факультет Радиовтуз МАИ,
кафедра 44-3 «Аналоговые и цифровые радиоэлектронные системы»,
Москва, kaf-44-3@yandex.ru;³АО Всероссийский научно исследовательский институт радиотехники
Москва, pot0606@yandex.ru

СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ ЧЕРЕДОВАНИЕ СВЁРТОЧНЫХ КОДОВ

Рассматривается возможность увеличения пропускной способности радиоканала, в котором применяются методы добавления избыточной информации для увеличения вероятности правильного приёма информационного сообщения. Увеличение помехоустойчивости канала связи, как правило, связано с уменьшением пропускной способности. Предложен метод динамического изменения пропускной способности канала связи в зависимости от условий передачи информации.

Ключевые слова: *сверточный код, радиосвязь, чередование кодовых последовательностей, помехозащищённость.*

Основные принципы рассматриваемого метода помехозащищённости.

В настоящее время для того чтобы принять сообщение с заданной степенью искажения кроме увеличения мощности излучаемого сигнала и уменьшения собственных шумов приёмника применяют добавление в информационную последовательность избыточной информации. Во многих случаях для добавления информации используют свёрточные коды. При использовании метода добавления избыточной информации скорость передачи информационного сообщения замедляется, но при этом существенно снижаются требования к отношению сигнал/шум на приёмной стороне [1].

Как правило каждый применяемый свёрточный код рассчитан на определённый вид помех, вследствие чего при изменении помеховой обстановки теряет свою эффективность. Отметим, что в случае изменения помеховой обстановки целесообразным становится изменение применяемого свёрточного кода. Также отметим, что свёрточные коды применяются в системах двусторонней и односторонней связи. В системах передачи информации с применением односторонней связи изменение структуры свёрточного кода во время работы может быть применено в случае возможности прогнозирования на передающей стороне изменения помеховой обстановки в области приёма сигнала. В системе с двусторонней связью кроме изменения свёрточного кода за счёт прогнозируемого изменения помеховой обстановки, возможно применение изменения свёрточного кода по фактическому обнаружению несоответствия количества ошибочно принятых символов в заданном диапазоне значений.

В случае применения нескольких кодовых последовательностей в системе с односторонней связью возможен вариант, когда для корректного приёма потребуется обеспечить на приёмной стороне длительность кодовой последовательности, которую возможно принять классической декодируемой системой, но при этом будет проверяться и вариант других задействованных кодов. В результате будет выбираться наиболее приемлемый вариант. Принять решение о приемлемости расшифрованного сообщения можно на основе не только количества исправленных символов, но и по наличию условного периодического сигнала. При переходе от одной кодовой последовательности к другой потребуется на вход кодера подавать нули до момента выхода из кодера последнего

информационного символа. После этого возможно переключиться на кодирование иным кодом и, соответственно, передавать последовательности, сформированные иным кодом. Отметим, что при переходе от кода к коду скорость передачи полезной информации может уменьшиться за счёт добавления нулевых символов. При добавлении периодического условного сигнала количество добавляемых нулевых отчётов можно уменьшить.

В случае применения систем с двусторонней связью для получения требуемого отношения сигнал/шум на приёмной стороне возможно чередование сверточных кодов, длительность которых не позволяла ранее приведённым декодерам с заданной степенью точности декодировать информационное сообщение. В частности это может достигаться оперативным повторением переданной информации.

В случае применения чередования различных сверточных кодов, в которых декодирование зависит от условного сигнала, вероятность правильного приёма сообщения начинает зависеть не только от вероятности ошибки правильного приёма информационного сигнала, но и от вероятности правильного приёма служебного сигнала.

В случае односторонней связи и при отсутствии служебного сигнала, влияющего на вариант выбора декодирующей структуры, а также при наличии требуемого разрыва между потоками данных от различных свёрточных кодов, для декодирования потребуется обеспечить такие различия между свёрточными кодами, которые позволят разделить кодовые последовательности даже при максимально допустимом искажении информационной последовательности.

В случае наличия условного сигнала требование к различию используемых свёрточных кодов для их отличия на принимающей стороне можно снизить.

Целесообразность применения

Применение чередования свёрточных кодов в приёмопередающих системах будет целесообразным, если пропускная способность информационных данных в системе будет выше, чем в системе без применения чередования свёрточных кодов.

$$D_1 + d + C < D_2 \quad (1)$$

где: D_1 - длина сообщения за часть условного временного интервала при кодировании кодом с большим числом добавленных символов; d - длина сообщения за часть условного временного интервала при кодировании кодом с меньшим числом добавленных символов; C - длина служебных слов; D_2 - длина сообщения за весь условный временной интервал при кодировании кодом с большим числом добавленных символов.

$$D_1 = D_i \cdot n_{Di} \quad (2)$$

где: D_i - длина единичного сообщения у кода с большим числом добавленных символов; n_{Di} - количество единичных сообщений у кода с большим числом добавленных символов.

$$d = d_i \cdot n_{di} \quad (3)$$

где: d_i - длина единичного сообщения у кода с меньшим числом добавленных символов; n_{di} - количество единичных сообщений у кода с меньшим числом добавленных символов.

$$D_2 = D_i \cdot (n_{Di} + n_{di}) \quad (4)$$

Зависимость вероятности ошибки при различном количестве бит информационной последовательности и количества накапливаемых отчётов.

Будем изменять количество бит в служебном слове (A_{sl_sl}) от 1 до 20, количество служебных слов (A_{sl_slov}) от 1 до 10. При моделировании примем допущение, что вероятность ошибки декодирования на 1 бит будет $P_{ow2} = 6.5 \cdot 10^{-3}$.

Вероятность правильного приёма служебного слова:

$$P_{pp2_sl} = (1 - P_{ow2})^{A_{sl_sl}} \quad (5)$$

Вероятность ошибки приёма служебного слова:

$$P_{ow2_sl} = (1 - P_{pp2_sl}) \quad (6)$$

Зависимость ошибки приёма служебных слов при повторении:

$$P_{pp2_sl_sl} = P_{ow2_sl}^{A_{sl_slov}} \quad (7)$$

Полученная зависимость вероятности ошибки при различном количестве бит информации и количества накапливаемых отчётов приведена на рисунке 1.

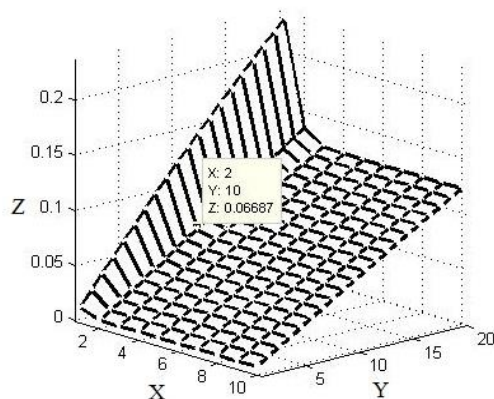


Рис. 1 - Зависимость вероятности ошибки при различном количестве бит информационной последовательности и количества накапливаемых отчётов.

На рисунке 1 ось X соответствует A_{sl_slor} , ось Y соответствует A_{sl_sl} , ось Z соответствует $P_{pp2_sl_sl}$.

Зависимость ошибки принимаемого сообщения от количества служебных слов:

$$P_{pp2_ow_so} = (1 - (1 - P_{pp2_sl_sl}) \cdot (1 - P_{ow2_sl})) \quad (8)$$

Приведём полученный график зависимости принимаемого сообщения от количества служебных слов на рисунке 2.

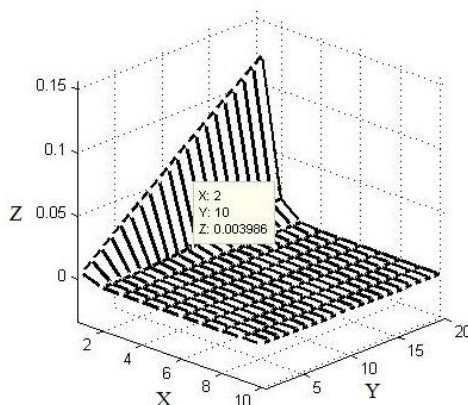


Рис. 2 - Зависимость ошибки принимаемого сообщения от количества служебных слов.

На рисунке 2 ось X соответствует A_{sl_slor} , ось Y соответствует A_{sl_sl} , ось Z соответствует $P_{pp2_ow_so}$.

Возможности дальнейшего развития систем.

Для случая односторонней передающей системы и множества принимающих устройств возможно иное применение систем с изменяемым кодом. При модернизации передающей системы, изменении положения передатчика, изменении помеховой обстановки либо при иных изменениях могут появиться ситуации, при которых возможно изменение отношения сигнал/помеха на входе принимающих устройств. Это могут быть как временные изменения, так и постоянные. Отметим, что при этом заменить или изменить на множестве принимаемых аппаратах декодирующие устройства весьма затратное дело. В случае, если есть возможность реализовать новые принимающие и передающие устройства с дополнительным каналом, которого не было на прежних устройствах, становится возможным более рационально использовать пропускную способность информационного канала. Например, если применялся код 1/2, то реализовав новые устройства на основе перфорированного кода 1/2, получим код 2/3. Если при передаче на место перфорации поставим символ другой последовательности, то длина кодового сообщения не изменится, но при этом изменится пропускная способность. Поэтому для старых устройств добавленный символ будет ошибочным, но за счёт повышения отношения сигнал/шум эта ошибка будет исправляться, а для новых устройств данная последовательность будет обладать большей пропускной способностью.

Описанный выше принцип также применим и для предлагаемых устройств с перестраиваемыми кодовыми свёрточными последовательностями. Но в отличие от рассмотренного случая не потребуется использовать дополнительный канал, вместо этого нужно по-иному обрабатывать в новых устройствах принимаемые последовательности, при этом условный сигнал останется прежним, а передаваемое сообщение будет кодироваться по-иному.

Возможный вариант применения.

Предположим, что на земле стоит принимающая система с антенной отслеживающей искусственный спутник земли или направленной на геостационарный спутник, на котором расположен передатчик. При таком взаимном расположении на принимающей стороне помимо полезного сигнала принимаются и помехи, которые мы разделим на два типа: помехи приходящие из космоса (помехи от солнца, звёзд, т.п.), и помехи, появляющиеся в результате различных эффектов в земной атмосфере (эффект авроры, переотражения различных сигналов излучаемых с земли и т.п.). При этом видим, что помехи приходящие из открытого космоса могут быть не только спрогнозированы, но и измерены на космическом аппарате, в тоже время при наличие обратного канала с земли может быть передан сигнал, увеличивающий или уменьшающий избыточность передаваемого сообщения. Соответственно передаваемая информационная последовательность может содержать необходимую в определённый временной интервал избыточность, а не максимальную, рассчитанную на крайний или усреднённый случай.

Заключение

С развитием техники объём передаваемой информации на различные дистанции непрерывно возрастает, вследствие чего возрастают и требования к передающей и приёмной аппаратуре. Для возможности передачи всё более объёмных информационных сообщений в разрабатываемой аппаратуре используется множество различных систем и методов. Причём с развитием техники и технологий появляется возможность и потребность использовать ранее недоступные средства и методы повышения технических характеристик, в частности пропускной способности радиоканала.

Список литературы

1. Волков Л.Н. Системы цифровой радиосвязи. / Л.Н. Волков, М.С. Немировский, Ю.С. Шинаков. – М.: Экотрендз, 2005. – 392 с.

05.11.00

А.Е. Терлыч, И.И. Аликина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра «Конструирование и технологии в электротехнике»,
Пермь, ktei@pstu.ru

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ

Предложены зависимости для инженерных расчетов частичных емкостей кабелей с секторными жилами как функции от сечения жилы и толщины изоляции, а также методика получения подобных выражений на основе регрессионного анализа результатов численного моделирования электрического поля в кабеле, полученных в среде инженерных расчетов ANSOFT Maxwell.

Ключевые слова: кабель с секторными жилами, электрическая емкость кабеля, моделирование.

Потребность в расчете электрической емкости силовых кабелей возникает при расчетах элементов систем электроснабжения. Так, например, величина емкости кабеля важна для определения однофазных токов короткого замыкания на землю в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью [1].

Для расчета частичных емкостей кабелей с круглыми жилами можно использовать известные аналитические выражения емкости двух соосных или несоосных, охватывающих друг друга цилиндров, а также выражение для емкости двухпроводной линии [2]. Однако расчет емкости кабелей с более сложной формой токопроводящих жил приходится вести по приближенным выражениям, которые не всегда обеспечивают даже «инженерную» точность. Так, например, авторы [3] рассматривают расчет емкости трехжильного кабеля с секторными жилами лишь приближенно с заменой секторной жилы на эквивалентную круглую.

Точные расчеты емкости кабелей сложных конструкций можно провести с использованием численного моделирования электрических полей при помощи специализированных программных средств [4]. Однако в инженерной практике такой подход используется редко, так как требует приобретения соответствующего программного обеспечения и необходимой квалификации для работы с ним.

В настоящей работе предложен подход, который позволяет получить сравнительно простые зависимости частичных емкостей кабеля от геометрических параметров на основе регрессионного анализа результатов численного моделирования электрического поля в кабеле. Для моделирования электрического поля в кабеле авторами использовался конечно-элементный пакет ANSOFT Maxwell.

Внешний вид кабеля с секторными жилами и бумажно-пропитанной изоляцией приведен на рис. 1. На рис. 2 представлена геометрия модели для расчета частичных емкостей кабеля.



Рис. 1. Конструкция кабеля с секторными жилами

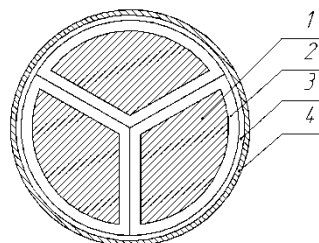


Рис. 2. Модель кабеля. 1 – токопроводящая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – поясная изоляция; 4 – металлический экран

В модели сделаны следующие допущения. Радиусы скругления секторной жилы стремятся к нулю. Для оценки погрешности определения емкости при таком допущении была решена тестовая задача. В задаче сравнивались значения частичных емкостей жилы с

наибольшим возможным радиусом скругления, наименьшим сечением жилы и наибольшей толщиной изоляции [5] с соответствующими значениями емкостей кабеля с жилой без скругления (рис. 3). Результат решения задачи показал, что максимальная погрешность в определении емкости без учета радиусов скругления жилы не превышает 2,1% для любых сочетаний площади сечения жилы и толщины изоляции.

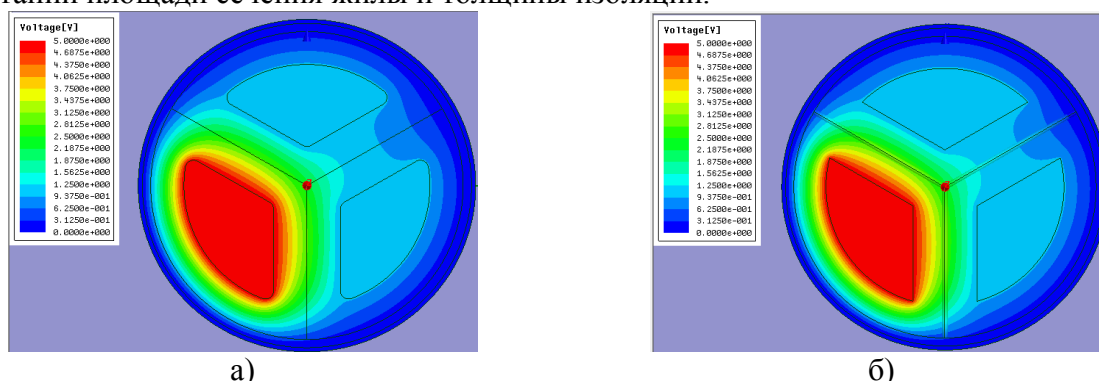


Рис. 3. Модели кабеля: а) со скруглением жилы; б) – без скругления.

Также в модели было сделано допущение о том, что значения диэлектрической проницаемости фазной и поясной изоляции одинаковы. Если они не одинаковы, то в модели необходимо использовать эквивалентное значение диэлектрической проницаемости сложной (комбинированной) изоляции, которая определяется по соотношениям объемов составных ее частей [6].

В таблице 1 представлены значения фазной C_F (между двумя жилами) и поясной C_P (между жилой и экраном) частичных емкостей в зависимости от площади сечения жилы S , толщины фазной Δ_F и поясной Δ_P изоляции при величине диэлектрической проницаемости равной 3,5.

Таблица 1. Значения фазной C_F и поясной C_P емкостей в зависимости от площади сечения жилы S , толщины фазной Δ_F и поясной Δ_P изоляции.

S , мм ²	Δ_F , мм	Δ_P , мм	C_P , пФ/м	C_F , пФ/м	S , мм ²	Δ_F , мм	Δ_P , мм	C_P , пФ/м	C_F , пФ/м
70	1,0	0,5	625,7	606,9	120	3,0	0,5	371,8	226,3
70	1,0	1,0	518,3	519,1	120	3,0	1,0	342,1	213,5
70	1,0	1,5	450,0	473,8	120	3,0	1,5	318,4	203,6
70	2,0	0,5	396,0	245,3	120	4,0	0,5	305,9	183,0
70	2,0	1,0	353,3	227,3	120	4,0	1,0	287,1	174,8
70	2,0	1,5	321,8	214,4	120	4,0	1,5	271,4	168,1
70	3,0	0,5	303,2	182,4	185	1,0	0,5	964,8	642,3
70	3,0	1,0	279,9	172,4	185	1,0	1,0	792,7	570,5
70	3,0	1,5	261,4	164,9	185	1,0	1,5	683,3	527,8
70	4,0	0,5	252,5	149,0	185	2,0	0,5	591,5	372,1
70	4,0	1,0	237,6	142,8	185	2,0	1,0	524,0	343,1
70	4,0	1,5	225,2	137,6	185	2,0	1,5	474,4	322,4
95	1,0	0,5	715,2	472,8	185	3,0	0,5	441,6	271,0
95	1,0	1,0	590,8	421,4	185	3,0	1,0	405,2	255,0
95	1,0	1,5	511,6	390,8	185	3,0	1,5	376,3	242,7
95	2,0	0,5	447,7	278,9	185	4,0	0,5	360,1	217,2
95	2,0	1,0	398,5	257,9	185	4,0	1,0	337,1	207,3
95	2,0	1,5	362,2	243,1	185	4,0	1,5	318,0	199,2
95	3,0	0,5	339,9	205,9	240	1,0	0,5	1087,0	725,2
95	3,0	1,0	313,1	194,4	240	1,0	1,0	891,6	643,6
95	3,0	1,5	291,8	185,4	240	1,0	1,5	767,3	595,1
95	4,0	0,5	281,1	167,1	240	2,0	0,5	661,8	418,0
95	4,0	1,0	264,	159,9	240	2,0	1,0	585,5	384,8
95	4,0	1,5	249,9	153,8	240	2,0	1,5	529,2	361,3
120	1,0	0,5	793,6	526,1	240	3,0	0,5	491,2	302,6
120	1,0	1,0	654,2	468,3	240	3,0	1,0	450,1	284,6
120	1,0	1,5	565,5	434,0	240	3,0	1,5	417,5	270,7

120	2,0	0,5	492,8	308,0	240	4,0	0,5	398,5	241,5
120	2,0	1,0	437,9	284,5	240	4,0	1,0	372,7	230,2
120	2,0	1,5	397,4	267,9	240	4,0	1,5	351,2	221,0

На основе результатов численного моделирования были получены регрессионные модели вида: $C = f(\Delta_{\Pi}, \Delta_{\Phi})$.

Полученная модель, связывающая частичную емкость C_{Π} между жилой и экраном кабеля, имеет вид:

$$C = a + \frac{b}{\Delta_{\Phi}} + c \cdot \ln(\Delta_{\Pi}) + \frac{d}{\Delta_{\Phi}^2} + e \cdot \ln(\Delta_{\Pi})^2 + f \cdot \frac{\ln(\Delta_{\Pi})}{\Delta_{\Phi}}, \quad (1)$$

где Δ_{Φ} – толщина фазной изоляции, Δ_{Π} – толщина поясной изоляции, a, b, c, d, e, f – коэффициенты модели, представленные таблице 2.

Таблица 2. Значения коэффициентов модели (1) для частичной емкости C_{Π}

$S, \text{мм}^2$	a	b	c	d	e	f
70	103,627	582,782	18,415	-168,232	-11,595	-181,163
95	108,655	675,572	21,955	-193,621	-13,326	-210,430
120	112,884	756,817	25,062	-215,704	-14,831	-236,084
185	121,449	936,774	31,868	-265,756	-18,170	-292,275
240	127,261	1065,717	36,704	-301,632	-20,552	-332,363

Для расчета частичных емкостей между жилами C_{Φ} также может использоваться выражение (1), со значениями коэффициентов a, b, c, d, e, f , представленными в табл. 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов модели (1) для частичной емкости C_{Φ}

$S, \text{мм}^2$	a	b	c	d	e	f
70	49,833	390,433	6,909	-71,976	-3,243	-71,957
95	52,169	452,448	8,031	-82,696	-3,951	-83,847
120	54,697	504,334	9,229	-90,167	-4,335	-94,325
185	58,613	624,009	11,876	-111,450	-5,319	-117,605
240	60,864	711,002	13,483	-127,469	-6,139	-133,783

Оценка адекватности полученных моделей для частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} производилась по величине средней ошибки аппроксимации $\bar{\epsilon}$, которая не превышает 0,3% и 0,2% соответственно, во всем диапазоне номинальных сечений жилы.

В качестве альтернативы модели (1) может быть использована более простая модель вида:

$$C = a \cdot \Delta_{\Phi}^b \cdot \Delta_{\Pi}^c, \quad (2)$$

где a, b, c – коэффициенты модели, представленные в таблице 4 для расчета частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} . Однако средняя ошибка аппроксимации по данной модели для частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} больше, но не превышает 3,9% и 1,9% соответственно.

Таблица 4. Значения коэффициентов модели (2).

$S, \text{мм}^2$	модель для расчета C_{Π}			модель для расчета C_{Φ}		
	a	b	c	a	b	c
70	519,129	519,129	-0,584	-0,225	-0,584	-0,225
95	591,654	591,654	-0,602	-0,231	-0,602	-0,231
120	655,119	655,119	-0,615	-0,235	-0,615	-0,235
185	793,777	793,777	-0,637	-0,241	-0,637	-0,241
240	892,779	892,779	-0,649	-0,245	-0,649	-0,245

На рис. 4 приведена графическая зависимость частичной емкости C_{Π} от толщин фазной и поясной изоляции кабеля с сечением токопроводящих жил 120 мм^2 , полученная по модели (1). Из рисунка видно, что толщина фазной изоляции влияет на частичную емкость C_{Π} кабеля в большей степени, нежели толщина поясной изоляции, особенно при малых толщинах фазной изоляции.

Также на основе результатов численного моделирования были получены регрессионные модели, позволяющие рассчитать величины частичных емкостей, задавшись сечением токопроводящей жилы S и толщиной фазной изоляции при заданной толщине поясной изоляции. Модель имеет вид:

$$C = a + b \cdot S + \frac{c}{\Delta_{\Phi}} + d \cdot S^2 + \frac{e}{\Delta_{\Phi}^2} + f \frac{S}{\Delta_{\Phi}} + g \cdot S^3 + \frac{h}{\Delta_{\Phi}^3} + i \frac{S}{\Delta_{\Phi}^2} + j \frac{S^2}{\Delta_{\Phi}}, \quad (3)$$

где S – сечение токопроводящей жилы; Δ_{Φ} – толщина фазной изоляции.

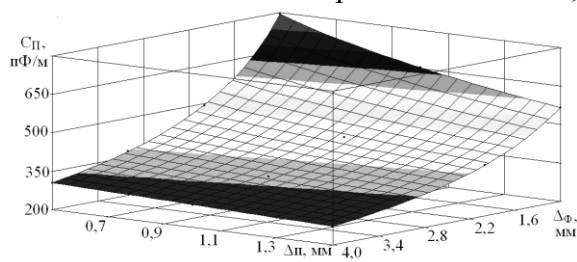


Рис. 4. Зависимость частичной емкости C_{Π} от толщин фазной и поясной изоляции кабеля с сечением жил 120 мм^2

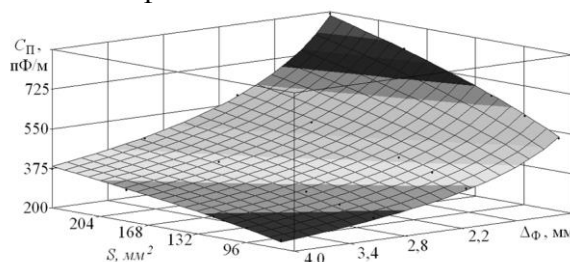


Рис. 5. Зависимость частичной емкости C_{Π} от площади сечения жилы и толщины фазной изоляции кабеля с толщиной поясной изоляции 1 мм.

При толщине поясной изоляции равной 1 мм значения коэффициентов для расчета поясной и фазной емкостей приведены в таблице 5.

Таблица 5. Значения коэффициентов модели (3)

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
для расчета C_{Π}	30,688	0,930	503,553	$-4,849 \cdot 10^{-3}$	-434,624	3,872	$8,886 \cdot 10^{-6}$	177,272	-0,824	$-3,196 \cdot 10^{-3}$
для расчета C_{Φ}	11,212	0,574	291,730	$-3,239 \cdot 10^{-3}$	-190,989	2,684	$6,264 \cdot 10^{-6}$	78,640	-0,343	$-2,555 \cdot 10^{-3}$

Средняя ошибка аппроксимации $\bar{\epsilon}$ модели (3) для частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} не превышает 0,2%.

В качестве альтернативы модели (3) может быть использована более простая модель вида:

$$C = a \cdot S^b \cdot \Delta_{\Phi}^c,$$

где a , b , c – коэффициенты модели, представленные в таблице 6 для расчета частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} при толщине поясной изоляции равной 1 мм. Средняя ошибка аппроксимации данной модели для частичных емкостей C_{Π} и C_{Φ} не превышает 1,5% и 1,2% соответственно.

Таблица 6. Значения коэффициентов модели (4)

коэффициенты	для расчета C_{Π}	для расчета C_{Φ}
a	88,423	57,5835
b	0,419	0,439
c	-0,601	-0,723

На рис. 5 приведена графическая зависимость частичной емкости C_{Π} от площади сечения жилы и толщины фазной изоляции кабеля с толщиной поясной изоляции 1 мм, полученная по модели (3).

Список литературы

1. Зацепин Е.П., Калинин Е.В. Особенности расчета емкостных токов замыкания на землю // Вести высших учебных заведений черноморья. 2010. №4(22). С. 22-26
2. Лысенко В.Г., Семенов С.В. Об остаточном напряжении в высоковольтном кабеле // Энергобезопасность и энергосбережение. 2014. №2 (56). С. 5-9
3. Колесник Г.П., Сбитнев С.А. Современные технические средства передачи электроэнергии: Методические указания / Владим. гос. ун-т. –Владимир, 2014. – 50 с.
4. Кандаков С.А. Методика определения первичных погонных емкостей закрытых электропередач на основе расчета электростатического поля // Сборник научных трудов НГТУ. 2004. № 3(37). С. 47-52
5. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия [Текст]: – Введ. 1975-01-01. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2002
6. Ренне В.Т., Багалеи Ю.В., Фридрих И.Д. Расчет и конструирование конденсаторов. – Киев.: Техника, 1966. – 326 с.

05.11.06

**В.Н. Хмелёв д.т.н., Р.Н. Голых к.т.н., А.В. Шалунов д.т.н.,
В.А. Нестеров к.т.н., В.А. Шакура, Е.В. Ильченко**

Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, grn@bti.secna.ru

**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ КАВИТАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
АБСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ
№ МК-4515.2016.8

В статье предложена конструкция ультразвукового излучателя с трубчатым рабочим инструментом для интенсификации абсорбции. Путём конечно-элементного анализа колебаний разработанной конструкции установлено, что для обеспечения равномерного распределения колебаний масса утолщения в месте крепления рабочего инструмента к концентратору должна составлять половину массы ультразвукового излучателя. Разработанная конструкция может служить основой для изготовления лабораторного или промышленного образца излучателя для ускорения абсорбции.

Ключевые слова: ультразвук, абсорбция, газовая смесь, конструкция, трубчатый рабочий инструмент.

Разделение смеси газов, как существующей в природе, так и образуемой в результате той или иной химической реакции – это одна из необходимых стадий производства окислителей, инертных или горючих газов, которые применяются в химической промышленности, технике, медицине и системах автономного жизнеобеспечения [1–2].

Сложность проблемы разделения газов состоит в том, что существующие способы (мембранные, абсорбция, адсорбция) не обеспечивают достаточную для промышленности производительность (не менее 200 000 м³/ч).

Один из перспективных способов увеличения производительности разделения газов – интенсификация абсорбции кавитационно-акустическим (или ультразвуковым) воздействием [3], которое способствует увеличению межфазной поверхности и коэффициента диффузии. Это обеспечит многократное ускорение процесса абсорбции, тем самым выведя технологии разделения газовых смесей на новый промышленный уровень. Кавитационно-акустическое воздействие позволяет интенсифицировать абсорбцию независимо от химического состава разделяемых газов и жидких абсорбентов. Установка источников ультразвука (УЗ) не потребует изменения конструкции и функциональных возможностей абсорберов. Однако, несмотря на преимущества кавитационно-акустического воздействия, на сегодняшний день отсутствуют излучатели, позволяющие осуществлять эффективное УЗ воздействие на тонкие плёнки жидкостей с большой площадью растекания.

Поэтому выявление оптимальной конструкции излучателя, обеспечивающей максимальную вводимую энергию в жидкость-абсорбент, является актуальной задачей.

Для воздействия на жидкость-абсорбент на сегодняшний день известны излучатели с грибовидным и многозонным рабочим инструментом [4]. Недостатком излучателей с грибовидным инструментом является малая поверхность воздействия и, как следствие, малый объём кавитационной зоны. Недостатки многозонного излучателя – большая дисперсия времени пребывания жидкости-абсорбента из-за вихревых акустических течений и неравномерности распределения амплитуд колебаний.

Поэтому для устранения вышеуказанных недостатков необходимо передавать колебания через стенки объёма, в котором протекает абсорбционный процесс. Этой возможностью обладает предложенная конструкция излучателя с трубчатым рабочим инструментом (рисунок 1).

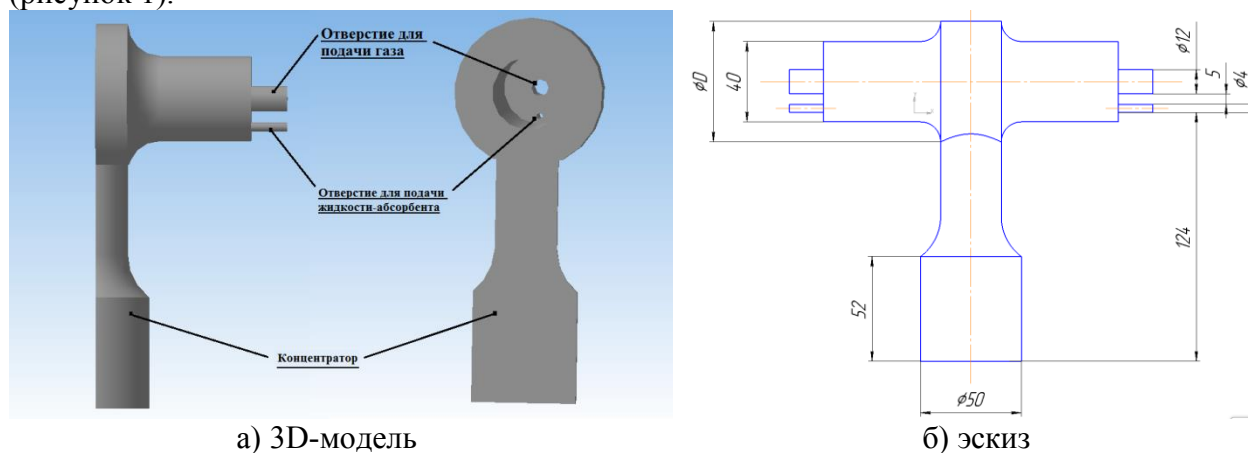


Рисунок 1 – Излучатель с трубчатым рабочим инструментом

Преимущества данной конструкции:

- малая дисперсия времени пребывания жидкости-абсорбента;
- высокая надежность излучателя за счет жесткости конструкции;
- равномерность диффузии по объёму жидкости-абсорбента из-за отсутствия взаимной компенсации колебаний.

Для разработки таких излучателей используется компьютерное моделирование, которое позволит сократить время определения конструктивной схемы и геометрических параметров излучателя, обеспечивающих максимальную эффективность абсорбции.

В ходе компьютерного моделирования был произведён:

- 1) модальный анализ конструкции излучателя для выявления его собственных частот, обеспечивающих максимальные амплитуды колебаний;
- 2) расчёт полных и направленных деформаций (вдоль оси симметрии концентратора) для выявления распределения амплитуд и направлений колебательных смещений излучателя.

Для первоначального анализа модели излучателя диаметр утолщения трубчатого рабочего инструмента D (см. рисунок 1б) в месте его крепления к концентратору был выбран таким образом, чтобы масса утолщения превышала массу оставшейся части трубы, т.е. равным 60 мм. Это обеспечит близкое к равномерному распределение колебаний, поскольку минимум амплитуд будет сосредоточен в месте утолщения. Остальные размеры выбирались фиксированными согласно эскизу, представленному на рисунке 1б. Материал модельного излучателя – титан ВТ-5.

Результаты расчётов представлены на рисунке 2. На левой части рисунка 2 представлены цветные распределения амплитуд полных смещений излучателя, а на правой – амплитуд направленных смещений вдоль оси симметрии концентратора при различных диаметрах утолщения D . Все расчёты проведены на резонансной частоте излучателя, равной 15,99 кГц.

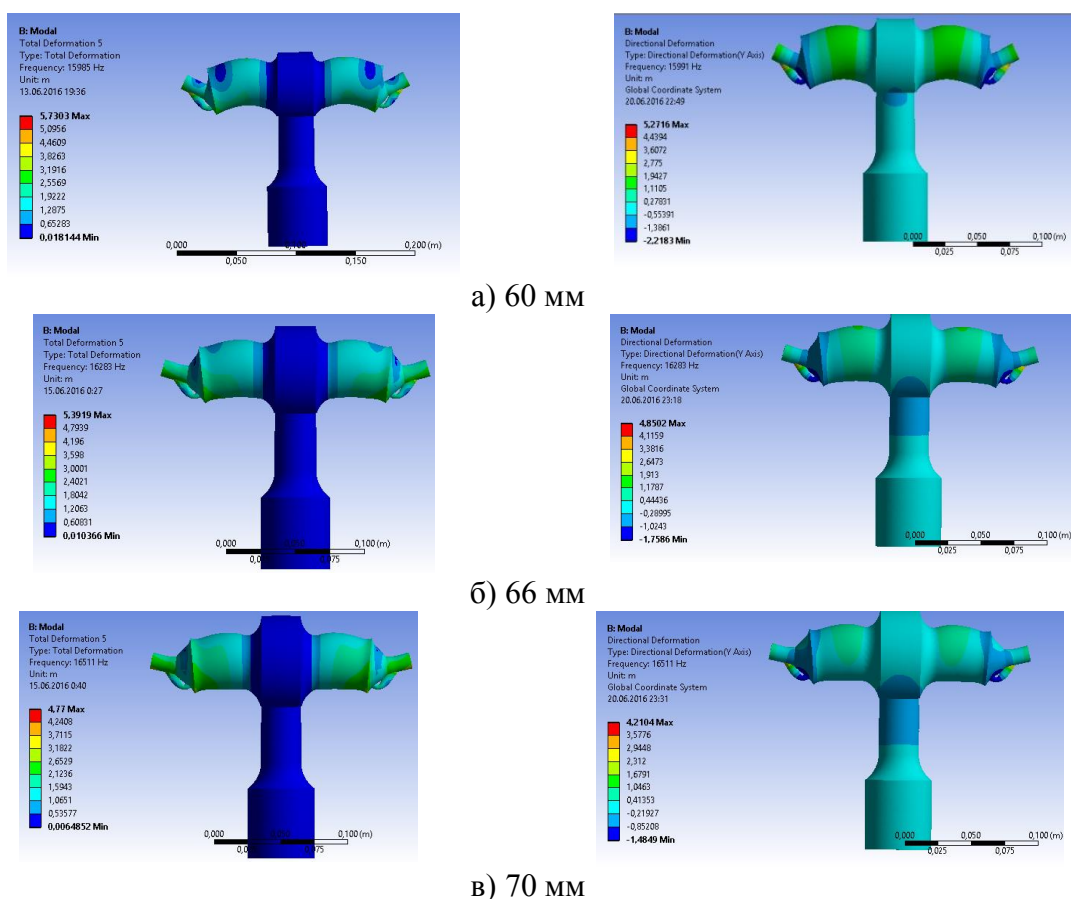


Рисунок 2 – Распределения амплитуд полных и направленных деформаций излучателя при различных диаметрах утолщения

Из представленных расчётов следует, что дальнейшее увеличение размера утолщения свыше 60 мм приводит к тому, что колебания становятся близкими к продольным. Наибольшие амплитуды нормальных колебаний достигаются в верхней части инструмента, которая не контактирует с жидкостью. Это приведёт к снижению УЗ энергии, передаваемой жидкости-абсорбенту.

Поэтому наиболее подходящей выбрана конструкция с диаметром утолщения, равным 60 мм, поскольку для неё характерны максимальные амплитуды колебаний в нижней части трубчатого инструмента, контактирующей с жидкостью-абсорбентом, что обеспечивает максимальную производительность абсорбции.

Разработанная конструкция излучателя может служить основой для создания опытного образца, который может быть использован для лабораторных исследований процесса абсорбции и для промышленных абсорбционных установок с применением ультразвукового воздействия.

Список литературы

1. Шлейкин, А.Г. Мембранные процессы в биотехнологии [Текст] / А.Г. Шлейкин, Н.Е. Панова // Учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 49 с.
2. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст] / А.Г. Касаткин – М.: Химия, 1973. – 750 с.
3. Хмелёв, В.Н. Исследование процесса взаимодействия кавитационных пузырьков с границей раздела «жидкость-газ» для выявления режимов, обеспечивающих максимальное увеличение поверхности контакта фаз / В.Н. Хмелёв [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья – 2014. – №6. – С. 362–364.
4. Хмелёв, В.Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции / В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, С.Н. Цыганок, С.В. Левин – Барнаул: АлтГТУ, 2013. – 196 с.

05.11.06

**В.Н. Хмелев д.т.н., А.В. Шалунов д.т.н., Р.С. Доровских,
В.А. Нестеров к.т.н., Р.Н. Голых к.т.н.**

Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, shalunov@bti.secna.ru

СПОСОБ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ ЖИДКОСТЕЙ

В статье рассмотрен способ кавитационного ультразвукового (УЗ) распыления вязких жидкостей. Для объяснения физических явлений происходящих в распыляемой жидкости, предлагается модель. Она описывает поэтапное преобразование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты в энергию капиллярных волн, затрачиваемую на увеличение свободной поверхности жидкости, т.е. образование капель.

Ключевые слова: *ультразвук, распыление, вязкие жидкости, физическая модель, кавитация, оптимальные режимы.*

При наложении механических колебаний УЗ частоты на тонкую пленку жидкости на ее поверхности возникает сеть капиллярных волн, с гребней которых может происходить отрыв капель жидкости. Этот процесс называется УЗ распылением. Среди множества теоретически возможных механизмов УЗ распыления жидкости [1–3] наиболее исследованным и экспериментально подтвержденным является кавитационно-волновой, согласно которому капиллярные волны образуются на поверхности пленки жидкости за счет захлопывания кавитационных пузырьков (рис. 1).

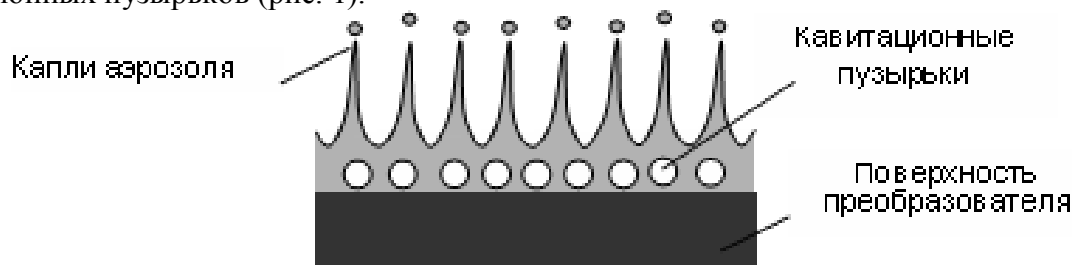


Рис. 1 – Механизм образования капель аэрозоля

С энергетической точки зрения очевидно, что энергия УЗ колебаний, создаваемых излучающей (колеблющейся) поверхностью, претерпевает ряд преобразований. Первоначально энергия первичного воздействия (ультразвуковых колебаний) концентрируется в энергию высокой плотности в виде периодических высокоамплитудных ударных волн взрывающихся кавитационных пузырьков. Затем энергия ударных волн, распространяясь по толщине слоя жидкости, достигает свободной поверхности «жидкость-газ», переходя в поверхностную энергию капиллярных волн и в увеличение свободной поверхности жидкости из-за отрыва капель от гребней капиллярных волн

Поэтому предлагаемая для дальнейшего исследования модель включает в себя рассмотрение всех стадий преобразования энергии в слое распыляемой жидкости, а именно:

- 1) определение амплитуды звукового давления в зависимости от толщины слоя распыляемой жидкости с учетом вязкости жидкости;
- 2) установление зависимости радиуса кавитационного пузырька от амплитуды звукового давления, а, следовательно, и от толщины слоя жидкости; определение максимального значения радиуса пузырька;
- 3) определение амплитуды давления во фронте ударной волны, возникающей при захлопывании кавитационного пузырька максимально возможного радиуса.

В рамках первого этапа на основании уравнения продольных колебаний тела ограниченной формы [4] были получены зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя (1):

$$P_A = v_0 \rho \omega \left| \frac{\sin \gamma h}{\gamma \cos \gamma h} \right| \quad (1)$$

где P_A – амплитуда звукового давления, Па; v_0 – амплитуда колебательной скорости на поверхности УЗ преобразователя, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; ω – циклическая частота, с⁻¹; h – толщина слоя жидкости, м; γ – постоянная распространения волны, равная

$$\gamma = k + i\beta = \frac{\omega}{c} + i\left(\frac{2\eta\omega^2}{3\rho c^3}\right) \quad (2)$$

где c – скорость звука жидкости, м/с; η – вязкость жидкости.

На основании полученного выражения (1), в рамках второго этапа рассмотрения и анализа модели был проведен расчет параметров кавитации, возникающей в жидкости на излучающей поверхности УЗ преобразователя под действием этого давления. Расчеты проводились на основании уравнения Херринга-Флинна [5] и полученной зависимости амплитуды звукового давления в слое жидкости от толщины этого слоя.

$$R \left(1 - 2 \frac{U}{c_0} \right) \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{4U}{3c_0} \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \cdot P_K + \frac{R U}{\rho c_0} \left(1 - \frac{U}{c_0} \right) \frac{dP(R)}{dt} = 0, \quad (3)$$

где R – радиус кавитационной полости, м; σ – поверхностное натяжение жидкости, Дж/м²; c_0 – скорость звука в жидкости, м/с.

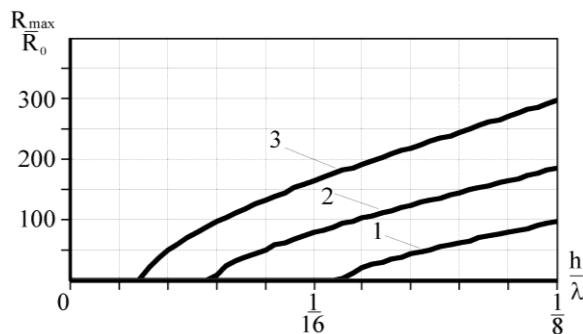
$$P(R) = P_{G_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1} + P_{II} - \frac{2\sigma}{R}; \quad U = \frac{dR}{dt};$$

$$P_K = P_0 - P_{II} - v_0 \rho \omega \left| \frac{\sin \gamma h}{\gamma \cos \gamma h} \right| \sin(\omega t) + \frac{4\eta U}{R} + \frac{2\sigma}{R} - \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma_1};$$

где P_{G_0} – давление газа в пузырьке, Па, P_0 – атмосферное давление, Па; P_{II} – давление пара, определяемое температурой жидкости, Па; γ_1 – показатель политропы, определяющий состояние газа в полости.

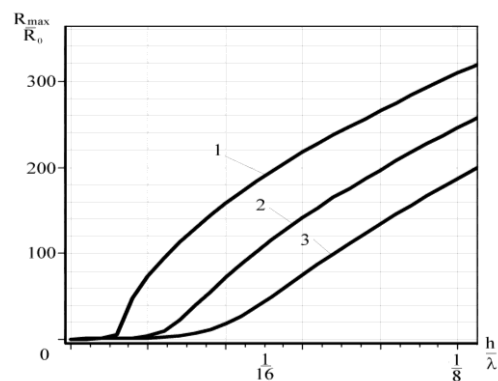
На рис. 2 представлены полученные зависимости относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя воды при различных амплитудах УЗ воздействия (рис. 2,а) и для жидкостей с разной вязкостью (рис. 2,б) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.

Из первого графика видно, что при увеличении толщины слоя жидкости на поверхности преобразователя происходит увеличение радиуса кавитационного пузырька. Это обусловлено улучшением условий выхода УЗ энергии в слой распыляемой жидкости. Анализ графиков на рис. 2,б показывает, что с ростом вязкости для возникновения кавитации требуется более толстый слой жидкости.



1 – 4 мкм; 2 – 12 мкм; 3 – 20 мкм

а) при различных амплитудах УЗ воздействия



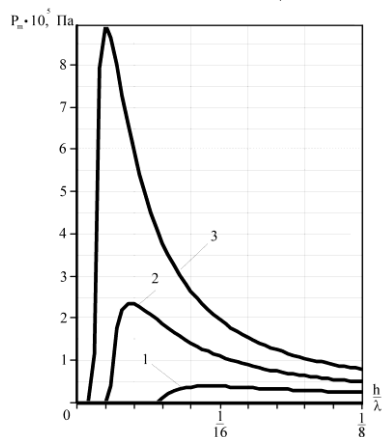
1 – $\eta=0,82 \cdot 10^{-3}$ Па·с; 2 – $\eta=50$ Па·с;
3 – $\eta=100$ Па·с

б) для различной вязкости

Рис. 2 – Зависимость относительного максимального радиуса кавитационного пузырька от толщины слоя

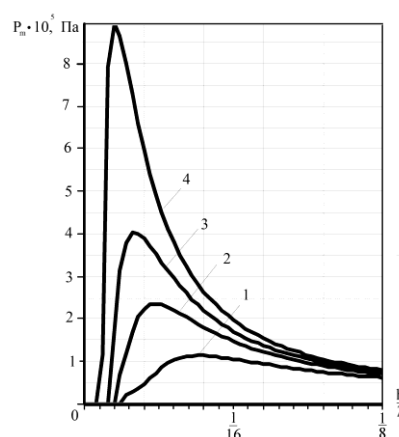
В рамках третьего этапа анализа модели на основе результатов исследования явления подводного взрыва, выполненного Коулом [7] на модели, представляющей взрыв как расширение сферы под действием заполняющего ее газа, были получены зависимости амплитуды давления во фронте ударной волны на поверхности жидкости от толщины слоя при различных амплитудах УЗ воздействия (рис. 3,а для воды) и для жидкостей с разной вязкостью (рис. 3,б) при постоянной амплитуде УЗ воздействия, равной 20 мкм.

Из графика на рис. 3,а видно, что кривые имеют максимум, отличный для каждой амплитуды колебаний поверхности УЗ преобразователя. Этот максимум соответствует той толщине слоя, при которой давление во фронте ударной волны на поверхности жидкости будет максимальным, то есть именно при такой толщине слоя будет достигнут максимум производительности УЗ кавитационного распыления.



1 – 4 мкм; 2 – 12 мкм; 3 – 20 мкм

а) при различных амплитудах УЗ воздействия



1 – $\eta = 200 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 2 – $\eta = 100 \text{ Па}\cdot\text{с}$;
3 – $\eta = 50 \text{ Па}\cdot\text{с}$; 4 – $\eta = 0,82 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$

б) для различной вязкости

Рис. 3 – Зависимость давления ударной волны на поверхности жидкости от толщины слоя жидкости

По максимуму кривых, представленных на рис. 3,б можно также определить оптимальную толщину слоя жидкости, при которой производительность УЗ распыления в слое будет максимальной при заданной амплитуде колебаний преобразователя. Это означает, что для обеспечения максимальной производительности УЗ распыления при заданной амплитуде колебаний необходимо поддерживать определенную толщину слоя жидкости, рассчитываемую на основании значения вязкости для каждой конкретной жидкости. Эта толщина слоя будет оптимальной для рассматриваемой жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ
№МД-4753.2016.8.

Список литературы

1. Lang R.J. Ultrasonic atomization of liquids // The Journal of the Acoustical Society of America. 1962. – V. 34. – P. 6-8.
2. Lugovskoy A., Physical analogue of the process of ultrasonic liquid nebulisation in a thin layer / A. Lugovskoy, A. Lyashok // Journal of mechanical engineering NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», 2013. – P. 110-114.
3. Ворожцов Б.И. Взрывная генерация высокодисперсных жидкокапельных аэрозолей и их эволюция / Б.И. Ворожцов, О.Б. Кудряшова, А.Н. Ишматов, И.Р. Ахмадеев, Г.В. Сакович // ИФЖ, 2010. – Т. 83. – № 6. – С. 1084-1103.
4. Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.

05.11.06

**В.Н. Хмелев д.т.н., А.В. Шалунов д.т.н., В.А. Нестеров к.т.н., Р.С. Доровских,
Р.Н. Голых к.т.н., К.В. Шалунова к.т.н., А.А. Нестеров**

Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
Бийск, nva@bti.secna.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Статья посвящена исследованию влияния анизотропии механических свойств материала на распределение колебаний ультразвуковых дисковых излучателей. Такие излучатели предназначены для создания высокоинтенсивных колебаний в газодисперсных средах. В результате исследований установлено, что при 4,5 % анизотропии происходит снижение равномерности амплитуд колебаний более чем в 5 раз.

Ключевые слова: ультразвук, дисковый излучатель, резонансная частота, амплитуда, анизотропия механических свойств.

В настоящее время ультразвуковые (УЗ) колебания высокой интенсивности широко используются для интенсификации технологических процессов в различных средах (коагуляция, сушка, распыление, пеногашение и т.д.). Созданные в последние годы дисковые излучатели не получили широкого распространения, т.к. не позволяют интенсифицировать перечисленные процессы в промышленных масштабах. Это вызвано тем, что они обладают невысокой эффективностью из-за малой площади излучения, низкой амплитуды колебаний излучателя, что приводит к ограничению мощностных характеристик всей системы и не позволяет создавать акустические поля высокой интенсивности. При этом сложность создания излучателей больших диаметров обусловлена появлением неравномерности амплитуд колебаний излучателя, вследствие чего в его материале возникают высокие механические напряжения, приводящие к разрушению диска. Одной из возможных причин проявления неравномерности колебаний является наличие анизотропии механических свойств в материале, из которого изготавливаются излучатели. В связи с этим, для оптимизации конструкций дисковых излучателей было проведено исследование влияния анизотропии механических свойств на распределение амплитуд колебаний. Исследования были проведены на акустическом излучателе в виде диска ступенчато-переменного сечения диаметром 420 мм, работающем на 7-й кольцевой моде колебаний. Форма излучателя и ультразвуковая колебательная система показаны на рис. 1.

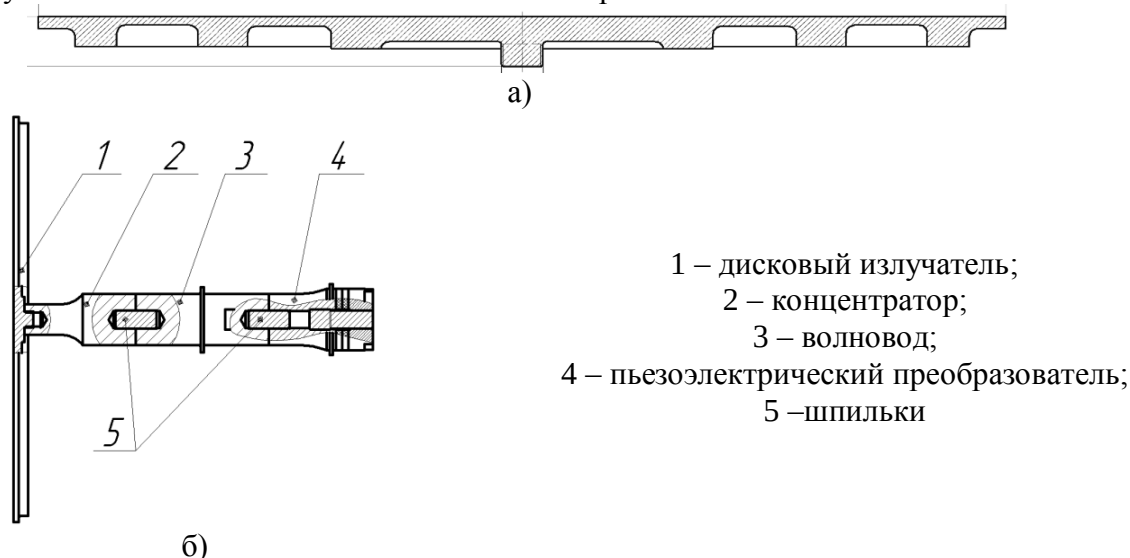


Рис. 1. Форма дискового излучателя (а) и ультразвуковая колебательная системы (УЗКС) (б)

Разработка пьезопреобразователя и концентратора УЗКС осуществлялась по известным методикам [1,2]. Конструкция ультразвукового дискового излучателя рассчитана с помощью метода конечных элементов (МКЭ) таким образом, чтобы обеспечивалась равномерная амплитуда колебаний на каждом кольцевом участке. При этом разница амплитуд между различными тонкими кольцевыми участками не превышала 10%.

Анизотропия материалов связана с их структурной неоднородностью и существенным различием упругих и прочностных свойств при различных видах нагружения. При разработке УЗ дисковых излучателей, изготавливаемых из пластин, важными характеристиками материала являются значения модуля Юнга в поперечном и продольном направлениях, т.к. они влияют на равномерность распределения колебаний на различных кольцевых резонансных модах дискового излучателя. На рисунке 2 приведен график зависимости модуля Юнга образца титанового сплава ВТ-1-0 от направления, в котором проводилось контрольное испытание

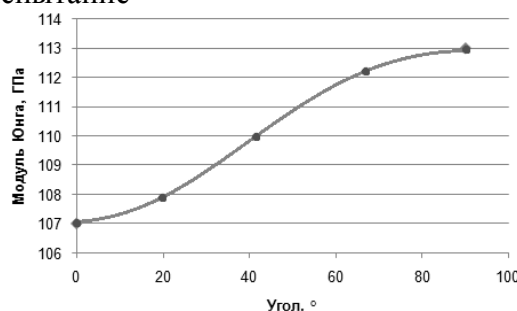


Рис. 2. Анизотропия модуля Юнга листа титан

На рисунке 3 показаны распределения колебаний при различных значениях модуля Юнга в продольном направлении, при этом в поперечном и вертикальном направлениях модуль Юнга был задан постоянным.

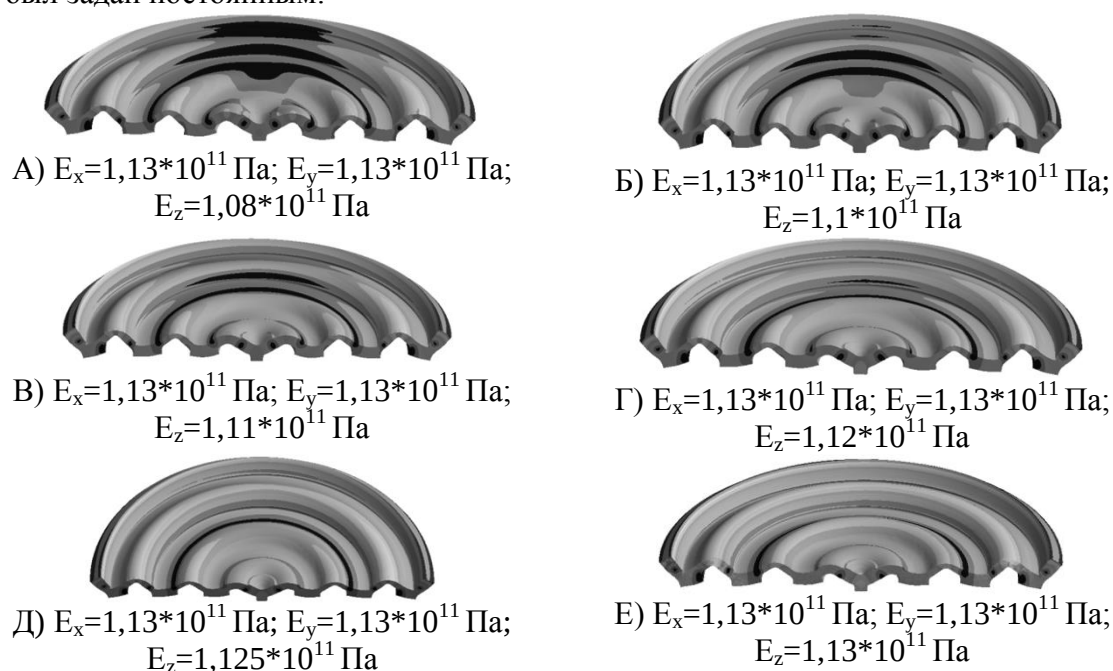


Рис. 3. Распределение колебаний дискового излучателя в зависимости от значений модуля Юнга в продольном направлении

Темные участки на трехмерных моделях, показанных на рисунке 3 указывают на малые значения амплитуд колебаний («нули колебаний»). В результате выполненных расчетов получена зависимость, показанная на рисунке 4.

Анализ полученных данных показывает, что чем больше разница модулей Юнга в продольном и поперечном направлениях, тем ниже равномерность распределения колебаний дискового излучателя.

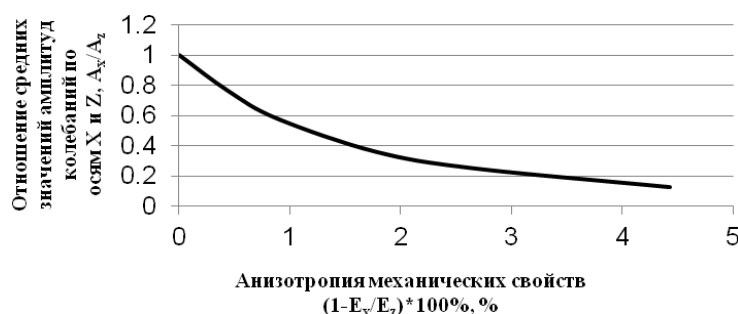


Рис. 4. Зависимость отношения средних значений амплитуд колебаний по осям X и Z от анизотропии механических свойств

Далее, для подтверждения теоретических результатов был изготовлен УЗ дисковый излучатель из титановой пластины, обладающей анизотропией механических свойств. Для визуального определения расположения «нулей» колебаний и сравнения распределений с теоретическими на поверхность дискового излучателя был нанесен индикаторный порошок. Таким образом, при запуске дискового излучателя на рассчитанной моде частички порошка отбрасывают с колеблющихся участков диска в области нулей колебаний. На рисунке 5 приведены фото излучателей и расположение «нулей» колебаний (а – исходный излучатель, б – излучатель с анизотропией).



Рис. 5. Картины «нулей» колебаний на поверхности дисковых излучателей

Анализ картины «нулей» колебаний и сравнение ее с теоретическими расчетами позволили установить, что материал излучателя обладает 4,5 % анизотропией, что соответствует измерениям модуля Юнга заготовки излучателя. Дальнейшие исследования были направлены на определение относительных значений амплитуд колебаний дискового излучателя с использованием приемного пьезопреобразователя с сухим точечным контактом для сопоставления с результатами теоретических расчетов. В результате измерений было установлено, что отношения измеренных значений амплитуд колебаний на разных участках диска расходятся с теоретическими значениями не более чем на 10%. Это свидетельствует об адекватности использованной для расчетов модели колеблющегося твердого тела. Проведенные далее модельные расчеты позволили оптимизировать конструкцию дискового излучателя для обеспечения равномерности амплитуд колебаний (рисунок 5,б). Полученная остаточная неравномерность может быть связана с наложением паразитных мод на рабочую кольцевую моду колебаний.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-41-220768 р_а.

Список литературы

1. *Khmelev, V.N. Multifrequency Ultrasonic Transducer with Stepped-Plate Disk / A. N. Galahov, A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, S.N. Tsyganok, S.S. Khmelev, A.N. Lebedev, K.V. Shalunova // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2009: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2009. – P.250–253.*
2. *Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов в газовых средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского Государственного университета, серия: технические науки. – 2010. – Вып.1 – С.148–153.*
3. *Ультразвуковая технология / Под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.*

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ (05.13.00)

05.13.01

И.З. Ахметзянов, В.С. Каримов

Казанский (приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт (филиал), кафедры системного анализа и информатики,
Набережные Челны, kvs-chelny@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КВАЗИАДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВХОДУ ПРИ НЕДОСТУПНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ

Было найдено аналитическое решение задачи синтеза квазиадаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по входу на основе технологии вложения систем. Наблюдатель полного порядка применялся для воспроизведения вектора состояния объекта. Получено множество решений задачи синтеза с условиями существования этих решений.

Ключевые слова: наблюдатель полного порядка, объект управления, запаздывания по входу, компенсация запаздываний, технология вложения систем.

Решение задач аналитического конструирования эффективных систем управления сложными многосвязными объектами, функционирующими в условиях неопределенностей, как параметрических, так и внешней среды, можно строить в классе адаптивных систем.

В теории автоматического управления нашли применение системы, приближающиеся по своим свойствам к адаптивным (квазиадаптивные системы). Их основным достоинством является простота технической реализации, обусловленная во многом отсутствием цепей настройки коэффициентов регуляторов [1].

Существенным фактором, затрудняющим реализацию законов управления, является наличие запаздываний в каналах управления объекта [2].

Для управления многосвязным объектом с запаздываниями по входу (управлению), функционирующим при неполноте информации о векторе состояния, предлагается метод синтеза закона управления, основанный на аналитическом решении задачи синтеза квазиадаптивной системы автоматического управления (САУ) с эталонной моделью и компенсационно-наблюдательным устройством. Поиск закона управления будет проводиться для случая синтеза по вынужденной составляющей рассогласования замкнутой динамической системы.

Пусть поведение динамического объекта с сосредоточенными запаздываниями по управлению может быть представлено в виде дифференциально-разностных уравнений:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t - \tau_i), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где $\tau_0 = 0$, $0 < \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ – постоянные времена запаздываний, $i = 0, 1, \dots, l$, $y(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных, $x(t) \in R^n$ – фазовый вектор объекта управления. Матрица A имеет размер $n \times n$, $B_i - n \times s$, $C - m \times n$. $u(t - \tau_i) \in R^s$ – вектор входных переменных.

Начальные условия зададим с учетом запаздывания сигналов в объекте управления – формально будем рассматривать отрицательные моменты времени $t < 0$, предполагая, что в объекте происходили динамические процессы до начального момента времени:

$$x(t) = \varphi_x(t), \quad t_0 - \tau \leq t \leq t_0,$$

где τ – наибольшее время запаздывания.

Компенсационно-наблюдательную схему управления, одновременно вычисляющую текущий фазовый вектор $x(t)$ объекта и компенсирующую запаздывания в контуре

управления в этом случае можно описать уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = Ax_1(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t - \tau_i), & y_1(t) = Cx_1(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + L(y(t) - y_1(t)) + \sum_{i=0}^r B_i u(t), \end{cases} \quad (2)$$

где $x_1(t)$ – фазовый вектор состояния модели объекта, $y_1(t)$ – вектор выхода модели объекта, L – матрица наблюдателя, $\hat{x}(t)$ – воспроизведенный вектор состояния объекта.

Проанализируем процессы в компенсационно-наблюдательной схеме, присоединенной к объекту управления, рассмотрев уравнения (1) и (2). Для этого найдем матричную передаточную функцию (МПФ) $F_{\hat{x}}^u(p)$ от управляющего сигнала $u(t)$ к фазовому вектору состояния компенсационно-наблюдательного устройства $\hat{x}(t)$. Применим преобразования Лапласа к уравнениям (1) и (2):

$$\begin{cases} px(p) = Ax(p) + \sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} u(p), & y(p) = Cx(p), \\ px_1(p) = Ax_1(p) + \sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} u(p), & y_1(p) = Cx_1(p), \\ p\hat{x}(p) = A\hat{x}(p) + L(y(p) - y_1(p)) + \sum_{i=0}^r B_i u(p). \end{cases} \quad (3)$$

Из системы уравнений (3) получим уравнение:

$$\hat{x}(p) = (pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i u(p). \quad (4)$$

Следовательно, МПФ $F_{\hat{x}}^u(p) = (pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i$, может соответствовать объекту управления

$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t)$, что свидетельствует о компенсации запаздываний по управлению и воспроизведении вектора состояния объекта.

Целью управления будет являться эталонная модель поведения синтезируемой системы управления, которая описывается в пространстве состояний следующими уравнениями:

$$\dot{x}_M(t) = A_M x_M(t) + B_M v(t), \quad y_M(t) = C_M x_M(t), \quad (5)$$

где $y_M(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных модели объекта, $x_M(t) \in R^n$ – вектор состояния модели объекта, A_M, B_M, C_M – матрицы пространства состояний эталонной модели, $v(t) \in R^n$ – вектор управления на входе системы.

Пусть закон управления в общем случае описывается матричным уравнением:

$$v(p) = K(p)(\hat{y}(p) - y_M(p)) + u(p), \quad (6)$$

где $K(p)$ – МПФ регулятора размера $n \times s$.

Требования к синтезируемой системе управления зададим на основе сигнала рассогласования $\Delta y = \hat{y} - y_M$ МПФ $E_{\Delta y}^v(p)$:

$$E_{\Delta y}^v(p) = E_{\hat{y}}^v(p) - E_{y_M}^v(p),$$

где $E_{\hat{y}}^v(p)$ – желаемые МПФ.

Задача управления: для ОУ (1), цели управления (5) и закона управления (6) необходимо найти МПФ регулятора или условия ее определяющие, при которых поведение САУ будет описываться желаемой МПФ $E_{\Delta y}^v(p)$.

На первом этапе метода вложения систем [3] с учетом уравнений (1), (2), (5), (6) составим проблемную матрицу (проматрицу) рассматриваемой задачи.

На втором этапе определим матрицы вложения α и β , используемые при вложении систем:

$$\alpha = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_s]^T, \quad \beta = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_n \ -I_n \ 0 \ 0 \ 0] \text{ при } \omega = E_{\Delta y}^v(p),$$

где ω – образ синтезируемой системы – желаемая МПФ.

Проблемная матрица:

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} (pI_n - A) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} & 0 \\ -C & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (pI_n - A) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} & 0 \\ 0 & 0 & -C & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L & 0 & L & (pI_n - A) & 0 & 0 & 0 & -\sum_{i=0}^r B_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (pI_n - A_M) & 0 & 0 & -B_M \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -C_M & I_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K(p) & 0 & K(p) & -I_s & I_s \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}.$$

На третьем этапе после выполнения последовательной факторизации матриц $\Omega = \Sigma \Xi$, $\alpha = \Sigma \delta$, $\beta = \pi \Xi$, $\omega = \pi \delta$ (π , δ , Ξ , Σ – вспомогательные матрицы), можно получить уравнения, которым должна удовлетворять МПФ регулятора $K(p)$ синтезе по вынужденной составляющей $E_{\Delta y}^v(p)$ рассогласования Δy замкнутой динамической системы:

$$\begin{cases} \pi_{\bar{x}}(p) \sum_{i=0}^r B_i K(p) C = C - \pi_{\bar{x}}(p) (pI_n - A), \\ \pi_{x_M}(p) (pI_n - A_M) = \pi_{\bar{x}}(p) \sum_{i=0}^r B_i K(p) C_M - C_M, \\ E_{\Delta y}^v(p) = \pi_{x_M}(p) B_M + \pi_{\bar{x}}(p) \sum_{i=0}^r B_i, \end{cases} \quad (7)$$

где $\pi_{x_M}(p)$, $\pi_{\bar{x}}(p)$ – вспомогательные дробно-полиномиальные матрицы.

Из системы уравнений (7) с помощью аппарата канонизации матриц при $C_M = C$ можно определить множество регуляторов $K(p)$:

$$\{K(p)\}_{\mu, \eta} = X \sum_{i=0}^r B_i [C - X(pI_n - A)] C + \overline{X \sum_{i=0}^r B_i} \mu(p) + \eta(p) \overline{C}^L, \quad (8)$$

где $\mu(p)$ и $\eta(p)$ – вспомогательные дробно-полиномиальные матрицы соответствующих размеров, а $X = E_{\Delta y}^v \left[\sum_{i=0}^r B_i - (pI_n - A)(pI_n - A_M)^{-1} B_M \right]^{-1}$.

Условия разрешимости уравнений (7), а значит и существования множества решений (8) имеют вид:

$$\overline{X \sum_{i=0}^r B_i} [C - X(pI_n - A)] = 0, \quad [C - X(pI_n - A)] \overline{C}^R = 0.$$

Таким образом, было получено множество регуляторов, реализующих закон управления, а также условия существования множества решений задачи синтеза.

Список литературы

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными системами. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
2. Филимонов А.Б. Спектральная декомпозиция систем с запаздываниями. Компенсация запаздываний. М.: Физматлит. – 2002. – 288 с.
3. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Издательство научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.

05.13.18

А.В. Бабушкина, В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Кафедра «Механика композиционных материалов и конструкций»,
Пермь, annvikoz@mail.ru, modorsky@pstu.ru, ar.shmakov@gmail.com

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МОДЕЛЬНОМ ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОМПРЕССОРЕ

В работе представлены результаты численного моделирования газодинамического процесса в модельном центробежном компрессоре в нестационарной постановке с учетом переноса тепловых нагрузок и нагрузок по давлению на стенд установки для дальнейшей оценки его теплового и напряженно-деформированного состояний. Расчеты проведены для диапазона параметров работы компрессорной установки от 6000 об/мин до 10000 об/мин вращения рабочего колеса. Разработана инженерная методика численного моделирования нестационарных газодинамических процессов в модельном центробежном компрессоре.

Ключевые слова: *центробежный компрессор, газоперекачивающие агрегаты, система инженерного анализа ANSYS, тепловой анализ, оценка напряженно-деформированного состояния, численное моделирование.*

Работа газоперерабатывающих агрегатов (ГПА) может сопровождаться возникновением вибрационных нагрузок в валопроводах. При определенных значениях вибраций в действующем ГПА может происходить его автоматическое выключение. Для отработки непрогнозируемых режимов работы ГПА был разработан модельный стенд газоперекачивающего агрегата – комплекс технических систем, предназначенных для получения газодинамических характеристик центробежной компрессорной ступени. Для проведения численных исследований была разработана физическая модель, описывающая протекание газодинамических, тепловых процессов и процессов деформирования в модельном стенде компрессора газоперекачивающего агрегата с учетом нестационарной постановки. В ходе проведения вычислительных расчетов осуществлялся перенос тепловых нагрузок из газодинамического расчета в нестационарный расчет по оценке параметров нагрева и напряженно-деформированного состояния конструкции элементов аэродинамического модуля стенда модельных испытаний с применением ресурсов высокопроизводительного вычислительного комплекса ПНИПУ. Таким образом, стояла задача получить результаты в связанной постановке между газодинамическим расчетом и прочностным с учетом тепловых и силовых нагрузок на конструкцию.

Для моделирования газодинамических и тепловых процессов, протекающих при работе компрессора ГПА, была создана твердотельная геометрия модельной ступени, которая включала в себя модель проточного тракта компрессора и твердотельную модель корпуса рассматриваемого компрессора (рис. 1).

Разработана математическая модель газодинамических процессов, которая базируется на законах сохранения массы, импульса, энергии и замыкается уравнениями состояния идеального сжимаемого газа и турбулентности, а также начальными и граничными условиями. В наиболее общем случае для задач газовой динамики требуется решить систему из четырех независимых уравнений – систему уравнений Навье-Стокса[1,2]. Математическая модель с учетом малых деформаций конструкции описывается следующей системой уравнений: геометрические соотношения Коши; уравнения равновесия в напряжениях; обобщенный закон Гука; граничные условия в напряжениях полностью соответствуют условиям на поверхности в напряжениях[1,2].

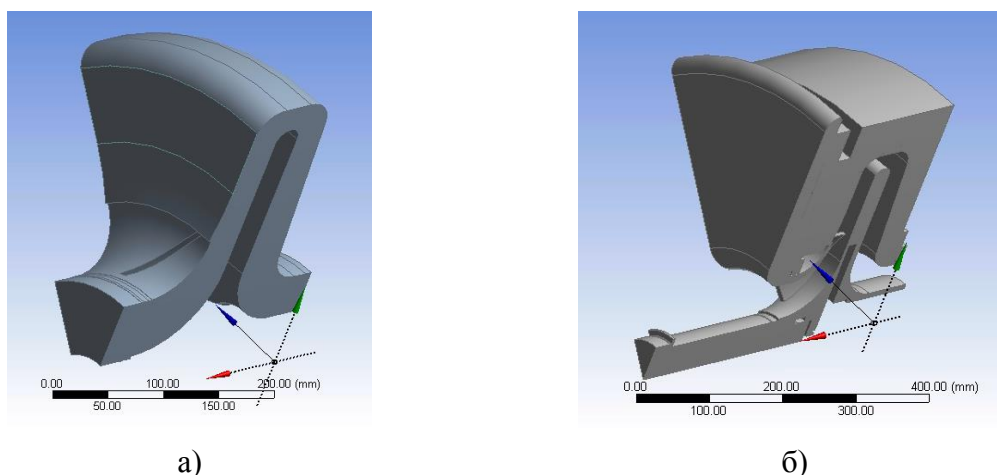


Рисунок 1. Расчетная геометрия: а – проточного тракта модельного компрессора; б – корпуса модельного компрессора

Для решения нестационарной задачи по оценке компонент напряженно-деформированного состояния исходным решением является решение, полученное на этапе нестационарного расчета газодинамической задачи. В частности, при расчете напряженно-деформированного состояния указываются временные периоды газодинамической задачи.

План проведения вычислительных экспериментов по нестационарному исследованию включал описание расчетных вариантов для различных значений скорости вращения рабочего колеса (от 6000об/мин до 10000об/мин). При анализе полученных результатов оценивалось влияние временного фактора протекания газодинамических процессов в тракте установки на ее тепловое и напряженно-деформированное состояние, а также оценивалось влияние частоты вращения рабочего колеса на работу системы «газ-конструкция» и изменение ее параметров.

Получены поля полного давления в проточном тракте компрессорной установки и в пристеночном слое газодинамического тракта. С течением времени зона высоких значений полного давления увеличивается с изменением частоты вращения рабочего колеса. На входе давление соответствует граничным условиям, на периферии лопаток наблюдается область пониженного давления, к выходу давление несколько возрастает. Получены поля температур в проточном тракте компрессорной установки и в пристеночном слое газодинамического тракта. С течением времени значения температуры в продольном сечении возрастают. Максимальные значения в основном расположены на поверхности стенок ступицы колеса и с внешней стороны диафрагмы. С ростом скорости вращения зона повышенных температур на внешней стороне диафрагмы смещается в сторону выходного сечения, а в районе венца рабочего колеса зона повышенных температур расширяется. Температура на входе составляет примерно 30-43°C для разных вариантов скорости вращения рабочего колеса. Далее, наблюдается рост температуры – более интенсивный в рабочем колесе. Далее температура стабилизируется, достигая средних значений около 35-50°C, в зоне после поворота, на перегородке, температура достигает в среднем 55°C, а на выходе температура на выходе составляет 37-53°C (в зависимости от скорости вращения рабочего колеса).

После проведения оценки влияния параметров работы установки на газодинамические характеристики потока (давление и температуру) были проведены численные эксперименты по оценке напряженно-деформированного состояния компрессорной установки.

Получены зависимости суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и деформаций компрессорной установки от действия внутреннего давления. При увеличении времени работы компрессора на частоте вращения 10000об/мин максимальные перемещения в конструкции увеличиваются от 1,56мкм до 1,68мкм. Максимальные перемещения находятся на внешней стенке рабочего колеса в зоне лабиринтного уплотнения и увеличиваются с ростом частоты вращения. Максимальные эквивалентные напряжения

увеличиваются с ростом частоты вращения с 4,77МПа до 5,31МПа. Рост напряжений с ростом частоты вращения составляет около 3%. Максимальные эквивалентные деформации увеличиваются с ростом частоты вращения от 0,0023% до 0,0026%.

Получены зависимости суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и деформаций компрессорной установки от действия температурных нагрузок. Максимальные перемещения в конструкции находятся в области выхода проточного тракта и увеличиваются с ростом частоты вращения с 0,11мм до 0,22мм. Максимальные эквивалентные напряжения расположены на венце рабочего колеса и увеличиваются с ростом частоты вращения с 109МПа до 316МПа. Эквивалентные напряжения находятся ниже предела прочности, и коэффициент запаса прочности имеет значение более 1,4. Максимальные эквивалентные деформации расположены на венце рабочего колеса и имеют значение менее 0,1%. Эквивалентные деформации находятся в пределах допустимых.

Получены зависимости суммарных перемещений, эквивалентных напряжений и деформаций компрессорной установки от совместного действия тепловых нагрузок и внутреннего давления. Максимальные перемещения в конструкции находятся на диафрагме проточного тракта и увеличиваются с ростом частоты вращения с 40,1мкм до 88,1мкм. При проведении анализа нестационарного влияния давления, температуры и совместного действия давления и температуры на НДС конструкции модельного стенда центробежного компрессора было выявлено, что наибольшее влияние на напряжения и перемещения оказывает температурная нагрузка. Увеличение частоты вращения рабочего колеса приводит к повышению температуры примерно на 22°C. Напряжения и перемещения при этом увеличиваются в 2,83-2,78. На лабиринтное уплотнение наибольшее влияние оказывают температурные деформации. При воздействии температурной нагрузки зазор в уплотнении может изменяться до 50-55мкм, что составляет до 10% от общей величины зазора. Изменение величины зазора может привести к изменению течения газа в уплотнении и возникновению колебаний.

На основе разработанной инженерной методике, по результатам серии вычислительных экспериментов, проведен количественный и качественный анализ взаимного влияния протекающих газодинамических процессов в проточном тракте установки и термо- и термо-НДС процессов в конструкции компрессора.

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. 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.

05.13.05

Н.Н. Беспалов к.т.н., Ю.В. Горячкин к.т.н., Д.В. Тундыков

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва, кафедра электроники и нанoeлектроники,
Саранск, ka-mgu@mail.ru

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ НА ПЛИС

Статья посвящена разработке программы для формирования 12-разрядных цифровых кодов в составе 32-разрядного протокола передачи данных, передаваемого по интерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface) от программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) XC3S500E Xilinx Spartan-3E на ИМС цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) LTC2624 в составе отладочной платы NI Digital Electronics FPGA Board. Рассматривается создание программного модуля на языке VHDL при помощи специализированного программного обеспечения WebPACK ISE фирмы Xilinx.

Ключевые слова: *аппаратно-программный комплекс, ПЛИС, ЦАП, интерфейс SPI, отладочная плата, язык VHDL, ВАХ, диод.*

Введение. При эксплуатации силовых полупроводниковых приборов (СПП), в качестве которых широко применяются силовые диоды и тиристоры, их надёжность обуславливается исходным качеством и режимами эксплуатации. Для повышения надёжности СПП и устройств силовой электроники в целом требуется обеспечить близкие к номинальным электрический и тепловой режимы их эксплуатации. Для решения этой задачи нужно иметь информацию о значениях параметров каждого отдельного прибора. Это должно обеспечиваться путём введения сплошного контроля значений параметров и характеристик СПП и отбраковки потенциально ненадёжных приборов на стадиях их производства и эксплуатации. Основными параметрами СПП являются параметры вольт-амперной характеристики (ВАХ) в состоянии высокой проводимости (СВП) и состоянии низкой проводимости (СНП), а также тепловые и электротепловые параметры [1].

Значения параметров серийных СПП имеют существенный разброс, обусловленный естественной нестабильностью технологического процесса их производства. Отсутствие у производителей и потребителей приборов эффективных методик и высокопроизводительных аппаратно-программных технических средств определения их характеристик и значений параметров не позволяет устанавливать значения этих параметров для каждого конкретного прибора [2].

Далее нами рассматривается один из вариантов реализации аппаратно-программного комплекса (АПК), решающего задачу определения ВАХ диодов в СВП, реализованного на основе применения ПЛИС.

Аппаратно-программный комплекс. Структурная схема части АПК для определения ВАХ диодов в СВП представлена на рисунке 1.

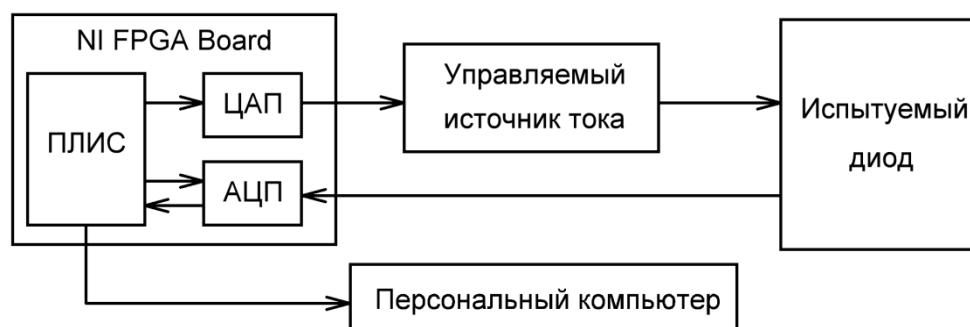


Рисунок 1 – Структурная схема части АПК для определения ВАХ диодов в СВП

Составной частью АПК для измерения параметров СПП является отладочная плата NI Digital Electronics FPGA Board [3, 4].

Работа АПК осуществляется следующим образом. С ПЛИС в ЦАП по интерфейсу SPI передаются 12-разрядные цифровые коды в составе 32-разрядного протокола передачи данных. Управляющая программа на языке VHDL, формирующая данный протокол, была представлена в [5]. ЦАП преобразует цифровые коды в импульсы напряжения, поступающие на управляемый источник тока, который формирует измерительные импульсы тока, поступающие на испытуемый диод. Диапазон выходных напряжений ЦАП составляет от 0 до 3,3 В. Формируемый управляющий сигнал состоит из 15 прямоугольных импульсов с нарастающей амплитудой от 0 до 3,3 В с шагом 0,22 В. Длительность импульса должна быть такой, чтобы не вызывать разогрев полупроводниковой структуры. В соответствии с этим длительность импульсов составляет 200 мкс, период 1 с.

Программное формирование сигнала. Программировать ПЛИС можно двумя способами: либо разработать схемотехнику устройства, как это было сделано, например, в [6], либо разработать программу на языке VHDL, как это было сделано в [5]. Программа, генерирующая 12-разрядные цифровые коды для формирования управляющих импульсов напряжения прямоугольной формы с последовательно возрастающей амплитудой, имеет две входные переменные: `clk` и `reset`, а также две выходные переменные `clk_spi` и `data`. Переменная `clk_spi` представляет собой тактовый сигнал, а `data` – это 12-разрядный цифровой код. Эти переменные являются входными для программы, генерирующей 32-разрядный протокол, о котором говорилось выше. Реализованный в WebPACK ISE [7] программный модуль имеет следующий вид:

```
architecture Behavioral of data_gen is
    signal D_reg : std_logic_vector(11 downto 0);
begin
    process(reset, clk)
        variable count : natural range 0 to 1073741824 := 0;
    begin
        if reset = '1' then
            count := 0;

        elsif clk'event and clk = '1' then
            count := (count + 1) mod 1073741824;
            if count >= 49990000 and count < 50000000 then D_reg <=
                "000100010001";
            elsif count >= 99990000 and count < 100000000 then D_reg <=
                "001000100010";
            elsif count >= 149990000 and count < 150000000 then D_reg <=
                "001100110011";
            elsif count >= 199990000 and count < 200000000 then D_reg <=
                "010001000100";
            elsif count >= 249990000 and count < 250000000 then D_reg <=
                "101010101010";
            elsif count >= 299990000 and count < 300000000 then D_reg <=
                "110011001100";
            elsif count >= 349990000 and count < 350000000 then D_reg <=
                "011101110111";
            elsif count >= 399990000 and count < 400000000 then D_reg <=
                "100010001000";
            elsif count >= 449990000 and count < 450000000 then D_reg <=
                "100110011001";
            elsif count >= 499990000 and count < 500000000 then D_reg <=
                "101010101010";
            elsif count >= 549990000 and count < 550000000 then D_reg <=
                "101110111011";
            elsif count >= 599990000 and count < 600000000 then D_reg <=
```

```
"110011001100";  
    elsif count >= 649990000 and count < 650000000 then D_reg <=  
"110111011101";  
    elsif count >= 699990000 and count < 700000000 then D_reg <=  
"111011101110";  
    elsif count >= 749990000 and count < 750000000 then D_reg <=  
"111111111111";  
    else D_reg <= "000000000000";  
    end if;  
end if;  
end process;  
clk_spi <= clk;  
data <= D_reg;  
end Behavioral;
```

Программный модуль представляет собой конечный автомат на основе переменной count. Формирование данных разрешается, когда переменная reset принимает значение '0'. Каждый раз на фронте тактового сигнала clk частотой 50 МГц переменная count увеличивается на 1 и в зависимости от значения этой переменной выполняется либо одно из 15 последующих условий, задаваемых операторами if и elsif, и при этом формируется импульс напряжения длительностью 200 мкс., либо выполняется условие, задаваемое оператором else, и при этом формируется пауза длительностью 1 с.

Затем было проведено моделирование с помощью ISE Simulator [7], чтобы проверить правильность работы программного модуля. После проверки работоспособности программный модуль был скомпилирован и запрограммирован в ПЛИС.

Осциллограмма сформированных испытательных импульсов напряжения прямоугольной формы представлена на рисунке 2.

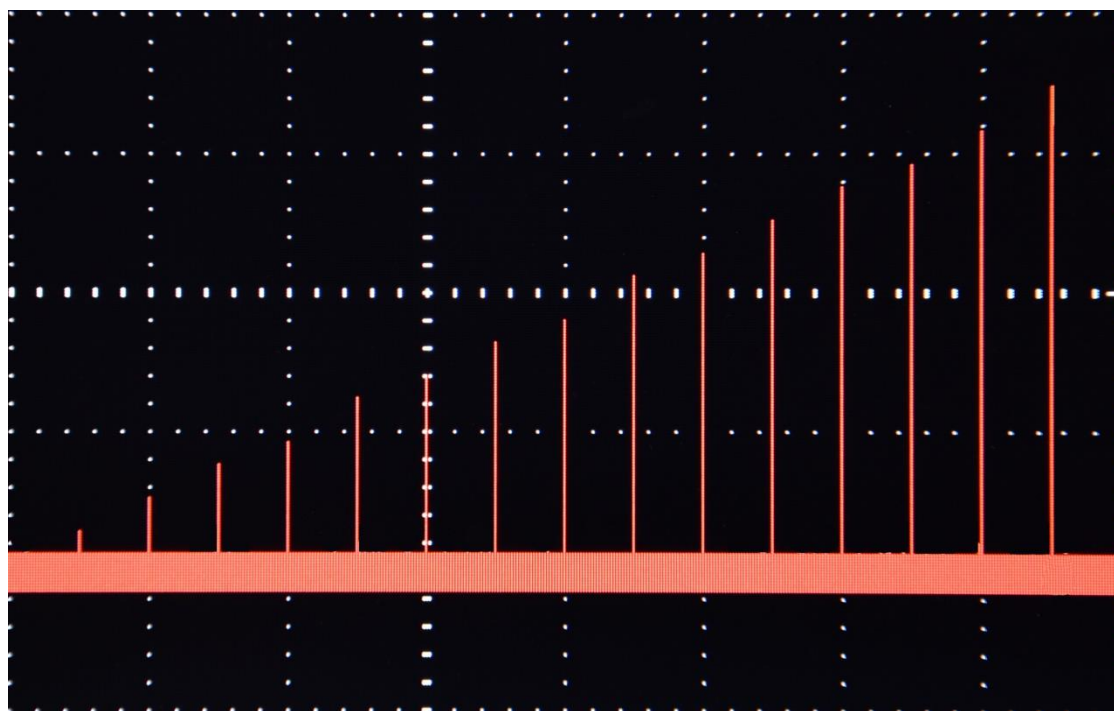


Рисунок 2 – Осциллограмма сформированных испытательных импульсов напряжения прямоугольной формы

Заключение. В процессе работы получены следующие результаты:

- разработан программный модуль на языке VHDL позволяющий сформировать управляющие импульсы напряжения прямоугольной формы с последовательно возрастающей амплитудой для измерения ВАХ диодов в СВП;
- созданный модуль промоделирован в среде ISE Simulator (ISim), где проверена правильность работы данного модуля, скомпилирован и запрограммирован в ПЛИС.

Список литературы

1. *Евсеев Ю.А.* Силовые полупроводниковые приборы / Ю. А. Евсеев, П. Г. Дерменжи. – М. : Энергоиздат, 1981. – 472 с.
2. *Беспалов Н.Н.* Диагностика и контроль параметров силовых полупроводниковых приборов / Н. Н. Беспалов, А. В. Мускатиньев, М. В. Ильин // Методы и средства управления технологическими процессами: МСУПТ – 2007: материалы IV Междунар. конф., Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. – С. 88-91.
3. National Instruments Corporation NI Digital Electronics FPGA Board. User Manual. Circuit Development Platform. – USA. : National Instruments Corporation, 2009. – 52 с.
4. Отладочная плата NI Digital Electronics FPGA Board.– [Электронный ресурс]. –Режим доступа: http://download.ni.com/pub/branches/russia/ni_elvis/prototyping_board_with_fpga_design.pdf.
5. *Беспалов Н.Н.* Программная реализация управляющего устройства на ПЛИС для обмена данными по интерфейсу SPI / Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, Д. В. Тундыков // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – Вып. 3. – С. 75-78.
6. *Беспалов Н.Н.* Разработка таймера на ПЛИС для отсчета ресурса работы бактерицидных ультрафиолетовых ламп. / Н. Н. Беспалов, Ю. В. Горячкин, Д. В. Тундыков // XLIV Огаревские чтения: материалы научной конференции: в 3 ч. Ч. 1: Технические науки. – Саранск: Мордов. гос. ун-т, 2016. – С. 119-123.
7. *Зотов В.Ю.* Проектирование цифровых устройств на основе ПЛИС фирмы Xilinx в САПР WebPACK ISE / В. Ю. Зотов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 624 с.

05.13.15

Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин д.т.н

ФГБОУ ВО «ВятГУ»,
факультет автоматики и вычислительной техники,
кафедра электронных вычислительных машин,
Киров, vodimitriy@rambler.ru

МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕДУКТИВНОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ЗАКЛЮЧЕНИЙ В ИСЧИСЛЕНИИ ПРЕДИКАТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ ФАКТОВ¹

Дается формальная постановка задачи и предлагается метод параллельного дедуктивного вывода заключений в исчислении предикатов с определением фактов. Приводится пример логического вывода, отмечаются достоинства метода.

Ключевые слова: дедуктивный логический вывод, исчисление предикатов, определение фактов, параллельные вычисления.

Исчисление высказываний (ИВ) позволяет моделировать и комбинировать высказывания, используя функционально-истинностные связи. При этом высказывания выступают, как неделимые объекты. В отличие от естественных языков, данные объекты не имеют внутренней структуры. Это значительно сужает класс задач, эффективно решаемых с помощью ИВ. В случаях, когда значение высказывания определяется функцией от его компонент, целесообразно использовать исчисление предикатов (ИП) [1].

В работе предлагается метод, который расширяет класс задач, эффективно решаемых с помощью параллельного дедуктивного вывода с определением фактов [2]. Данный результат достигается за счёт формализации метода в ИП и применения процедуры поиска фактов, использующей операцию частичного деления дизъюнктов [3]. Метод позволяет определить факты, которые привели к успешному логическому выводу (ЛВ), при этом не прерывает процедуру вывода, а также является параллельным и двунаправленным.

Постановка задачи. Имеются исходные непротиворечивые посылки, заданные в виде множества дизъюнктов $M=\{D_1, D_2, \dots, D_l\}$, включающего подмножества правил и фактов: $M=M' \cup M^F$, где M' – дизъюнкты посылок, содержащие два и более литерала, M^F – однолитеральные дизъюнкты (факты). Также имеется заключение d , которое не противоречит M . Задача ЛВ заключения в ИП с определением фактов формулируется следующим образом:

- 1) установить выводимость заключения d из множества M ;
- 2) найти для d множество фактов $E=\{e_1, e_2, \dots, e_L\}$ такое, что выполняются следующие условия:
 - а) каждый литерал факта e из множества E совпадает с одним из фактов f множества M^F , после применения к ним унифицирующей подстановки λ ($\lambda e = \lambda f$, подстановка может быть пустой);
 - б) факты из множества E приводят к успешному дедуктивному ЛВ заключения d .

Процедура частичного деления дизъюнктов. Частичное деление дизъюнктов (ДД) выполняется с помощью специальной процедуры образования остатков. Исходные выражения посылок и заключения в исчислении предикатов приводятся к требуемому виду с помощью специальных алгоритмов [3]. Для удобства описания процедуры образования остатков введем ряд обозначений.

$\omega = \langle b, d, r, q, n \rangle$ – процедура образования остатков, в которой: b – остаток-делимое, используемый для получения остатков; d – остаток-делитель, участвующий в образовании остатков; r – дизъюнкт фактов, использованных при формировании остатка-делимого b (при отсутствии таких фактов $r=0$); q – частный признак решения: «0» – получен хотя бы один

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-01-02818 а)

нулевой остаток, «1» – все полученные остатки равны единице, «g» – получено более одного остатка неравного единице при отсутствии нулевых остатков; $n = \{ \langle b_t, d_t, r_t \rangle, t=1, \dots, T \}$ – множество троек, состоящих из нового остатка-делимого b_t , соответствующего ему остатка-делителя d_t , а также множества фактов r_t , использованных при формировании остатка b_t в результате применения процедуры ω .

В процедуре образования остатков выполняются следующие действия.

1. Вычисляется матрица «производных» $\mu[b, d]$ [3]. Элемент матрицы – «производная» $\frac{\partial b[L]}{\partial L'}$ дизъюнкта $b[L]$, содержащего литерал L , по литералу L' дизъюнкта d определяются следующим образом: $\frac{\partial b[L]}{\partial L'} = 1$, если литералы L и L' не унифицируются, $\frac{\partial b[L]}{\partial L'} = 0$, если литералы L и L' унифицируются и дизъюнкт $b[L]$ содержит только литерал L , $\frac{\partial b[L]}{\partial L'} = b_a$, если

литералы L и L' унифицируются и дизъюнкт $b[L]$ содержит более одного литерала. Здесь $b_a = \lambda b[L] \div \lambda L$, т.е. представляет собой остаток, получающийся из дизъюнкта $b[L]$ после применения к нему унифицирующей подстановки λ и исключения литерала L .

2. Проверяется условие образования остатков. Если все производные в матрице $\mu[b, d]$ равны единице, то принимается $q=1$, $n = \{ \langle 1, 1, 0 \rangle \}$, $n^{\wedge} = \{1\}$ и выполняется пункт 6, иначе следующий пункт.

3. Определяется множество $n^{\wedge}$ новых остатков-делимых. В это множество включаются только различные остатки матрицы $\mu[b, d]$, а также остатки равные нулю, отличающиеся друг от друга множествами использованных фактов: $n^{\wedge} = \{ b_t | t=1, \dots, T \} = \bigcup_{a=1}^A \{ b_a \}$, где A – общее число остатков не равных единице, а T – число различных остатков, включая нулевые, отличающиеся множествами использованных при их формировании фактов.

4. Проверяется частное условие успешного решения. Решение считается успешным, если остатки $b_1, \dots, b_v, \dots, b_V$, $V \geq 1$ множества $n^{\wedge}$, образованные с помощью фактов, представленных соответствующими дизъюнктами $r_1, \dots, r_v, \dots, r_V$, равны нулю. В этом случае принимается $q=0$, $n = \{ \langle 0, 0, r^* \rangle \}$, где $r^* = r \vee r_1 \vee \dots \vee r_v \vee \dots \vee r_V$, $n^{\wedge} = \{0\}$ и выполняется пункт 6, иначе – следующий пункт.

5. Определяется множество $n = \{ \langle b_t, d_t, r_t \rangle, t=1, \dots, T \}$ троек, состоящих из новых остатков-делимых b_t и остатков-делителей d_t , а также дизъюнкта фактов r_t , использованных при формировании остатка b_t . Дизъюнкт вычисляется следующим образом: $r_t = r \vee r_{t1} \vee \dots \vee r_{tW}$, где W – число одинаковых остатков в матрице производных, полученных с помощью использования различных фактов.

Для каждого остатка-делимого b_t с помощью подстановки λ_t , использованной при его формировании, вычисляется соответствующий остаток-делитель: $d_t = \lambda_t(d \div w)$, где w – вспомогательный дизъюнкт, содержащий исключаемые из остатка d литералы. При вычислении остатка d_t из остатка d исключаются литералы L'_h , для которых в матрице $\mu[b, d]$ выполняется одно из следующих двух условий:

$$a) \left| \frac{\partial b[L_j]}{\partial L'_h} \right| = 1 \text{ для всех } j=1, \dots, J;$$

$$б) \left| \frac{\partial b[L_j]}{\partial L'_h} \right| = 1 \text{ для всех } j, \text{ кроме } j=u, \text{ такого, что } \left| \frac{\partial b[L_u]}{\partial L'_h} \right| = b_t, \text{ т.е. в строке матрицы,}$$

соответствующей литералу L'_h все «производные» равны единице, кроме одной, представляющей рассматриваемый остаток b_t .

Принимается $q=g$ и $n = \{ \langle b_t, d_t, r_t \rangle, t=1, \dots, T \}$ и выполняется пункт 6.

6. Фиксируются результаты вычисления процедуры ω .

Процедура полного деления дизъюнктов. Будем говорить, что остаток-делимое b является для остатка-делителя d конечным, если применение к нему процедуры $\omega = \langle b, d, q, n, r \rangle$ не порождает новых, отличных от единицы, остатков. Конечным может быть

исходный остаток b или вновь полученный остаток b_t , если соответствующие им матрицы «производных» состоят только из единиц. При полном ДД в результирующее множество остатков включаются основные остатки, к которым относятся однолитеральные конечные остатки, а также конечные остатки с двумя и более литералами, не содержащими переменных. Полное ДД выполняется с учетом фактов.

Введем следующие условные обозначения:

$\Omega = \langle D, d, R, Q, N \rangle$ – процедура полного ДД посылки D на дизъюнкт d , в которой: R – дизъюнкт фактов, использованных для вывода дизъюнкта d (для дизъюнкта выводимого заключения равен нулю); Q – признак решения, имеющий три значения: «0» – решение найдено, «1» – дизъюнкт D не имеет по дизъюнкту d остатков, отличных от единицы, «G» – получено множество конечных остатков; $N = \{ \langle B_j, R_j \rangle, j=1, \dots, J \}$ – множество пар, состоящих из конечного остатка B_j и дизъюнкта R_j фактов использованных при его формировании. При $Q=0$, $N = \{ \langle 0, R' \rangle \}$, где дизъюнкт R' состоит из литералов фактов, использованных для вывода дизъюнкта d , и литералов фактов, использованных при формировании нулевых остатков. При $Q=1$, $N = \{ \langle 1, 0 \rangle \}$.

Формирование множества остатков производится путем многократного применения ω -процедур и состоит из ряда шагов. На каждом шаге параллельно выполняется определенное число ω -процедур. Для описания параллельного выполнения ω -процедур воспользуемся специальной индексной функцией $i(h)$, обеспечивающей уникальную идентификацию каждой процедуры и ее параметров [3].

Введем индексную функцию $i(h)$ для индекса размером h , которую определим для индексной переменной t индуктивно следующим образом: $i(1)=t$, $t=1, \dots, T$; $i(2)=i(1).t_{i(1)}$, $t_{i(1)}=1, \dots, T_{i(1)}$ ($t.t_1=1, t_1=1, \dots, T_1$, $2.t_2, t_2=1, \dots, T_2$, ..., $T.t_T, t_T=1, \dots, T_T$); $i(3)=t.t_t.t_E$ ($E=t.t_t$), $i(3)=i(2).t_{i(2)}$, $t_{i(2)}=1, \dots, T_{i(2)}$; и т.д. В общем случае: $i(h)=i(h-1).t_{i(h-1)}$, $t_{i(h-1)}=1, \dots, T_{i(h-1)}$. Будем считать, что $i(0)$ означает отсутствие индекса у индексированной переменной, например, $T_{i(0)}=T$, а также, что $i(1)=i(0).t_{i(0)}=t$. Индексная функция $i(h)$ задает индекс, который (при $h>1$) состоит из константы, формируемой на основе значения функции $i(h-1)$, и соответствующей этой константе переменной $t_{i(h-1)}$. Множество индексов, описываемых с помощью функции $i(h)$, формируется на основе значений функции $i(h-1)$ и соответствующих им значений переменных $t_{i(h-1)}=1, \dots, T_{i(h-1)}$. Например, при $T=T_1=3$, $T_2=2$ получим $i(1)=t$, $t=1, 2, 3$; $i(2)=1.t_1$, $t_1=1, 2, 3$, $2.t_2$, $t_2=1, 2$. То есть $i(2)=1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2$. Тогда описание Ω -процедуры может быть представлено в следующем виде.

1. Подготовительный шаг. К дизъюнктам посылки D и заключения d применяется процедура образования остатков $\omega = \langle D, d, r, q, n \rangle$ и анализируется q . Если $q=0$, то в Ω -процедуре принимается $Q=0$, $N = \langle 0, R' \rangle$, где $R' = R \vee r_1$ и r_1 – дизъюнкт литералов фактов, использованных при формировании нулевых остатков. Если $q=1$, то в Ω -процедуре принимается $Q=1$, $N = \langle 1, 0 \rangle$. При $q=0$ или $q=1$ после подготовительного шага сразу выполняется заключительный шаг (пункт 3). Если же $q=g$, то новые тройки дизъюнктов, сформированные во множестве $\hat{n} = \{ \langle b_t, d_t^*, r_t \rangle, t=1, \dots, T \}$ и состоящие из нового остатка-делимого b_t и соответствующего ему остатка-делителя d_t , а также дизъюнкта фактов r_t , использованных при формировании остатка b_t , выступают в качестве исходных данных для ω -процедур на основном шаге. Причем, при первом выполнении основного шага в качестве остатков-делителей вместо дизъюнктов d_t^* используются дизъюнкты d_t . Дизъюнкт d_t образуется путем дополнения дизъюнкта d_t^* инверсиями литералов фактов (исходных однолитеральных дизъюнктов).

Используя индексную функцию, множество n можно представить следующим образом: $n_{i(h)} = \{ \langle b_{i(h+1)}, d_{i(h+1)}, r_{i(h+1)} \rangle, i(h+1)=i(h).t_{i(h)}; t_{i(h)}=1, \dots, T_{i(h)} \}$, где $h=0$.

2. Основной шаг. При k -м выполнении основного шага ($k=1, 2, \dots, K$) для каждой тройки дизъюнктов $\langle b_{i(h+1)}, d_{i(h+1)}, r_{i(h+1)} \rangle$ всех множеств $n_{i(h)}$ таких троек ($h=k-1$), полученных на предыдущем шаге $n_{i(h)} = \{ \langle b_{i(h+1)}, d_{i(h+1)}, r_{i(h+1)} \rangle, i(h+1)=i(h).t_{i(h)}; t_{i(h)}=1, \dots, T_{i(h)} \}$, выполняется ω -процедура $\omega_{i(h+1)} = \langle b_{i(h+1)}, d_{i(h+1)}, q_{i(h+1)}, n_{i(h+1)} \rangle$, $i(h+1)=i(h).t_{i(h)}; t_{i(h)}=1, \dots, T_{i(h)}$, и анализируются частные признаки решения $q_{i(h+1)}$.

А) Если хотя бы один признак $q_{i(h+1)}=0$, то принимается $Q_{h+1}=0$, $N_{h+1}=\{<0, R'\>\}$ и вычисляется дизъюнкт литералов фактов $R'=R \vee r_1 \vee \dots \vee r_u \vee \dots \vee r_U$, получаемый из дизъюнктов литералов фактов r_u ($u=1, \dots, U$), сформированных в ω -процедурах с признаком $q_u=0$, выполняется пункт 3. Если нет признаков $q_{i(h+1)}=0$, то производится пополнение множества остатков $N_{h+1}^{\wedge} = N_h^{\wedge} \vee \bigcup_{l=1}^L n_{i(h),l}^{\wedge}$, где $l=t_{i(h)}$, $L=T_{i(h)}$.

Анализ продолжается.

Б) Если нет ни одного $q_{i(h+1)}=g$, то принимается $Q_{h+1}=G$ и выполняется пункт 3. Иначе для всех $q_{i(h+1)}=g$ выделяются новые множества троек дизъюнктов, полученные при текущем выполнении основного шага: $n_{i(h+1)}=\{<b_{i(h+2)}, d_{i(h+2)}, r_{i(h+1)}>, i(h+2)=i(h+1).t_{i(h+1)}; t_{i(h+1)}=1, \dots, T_{i(h+1)}\}$, и осуществляется переход к выполнению следующему основному шагу $h=k+1$ (пункт 2), для которого эти множества выступают в качестве исходных.

3. Заключительный шаг. Если $Q=G$, то из полученного множества конечных остатков $N^{\wedge}$ исключаются поглощаемые остатки. Дизъюнкт b поглощается дизъюнктом a , тогда и только тогда, когда имеется такая подстановка λ , что $b \subseteq \lambda a$. При этом в качестве поглощающих дизъюнктов используются однолитеральные исходные дизъюнкты и инверсии литералов дизъюнкта-делителя. Если в процессе поглощения остатков из множества $N^{\wedge}$ будут исключены не все остатки, то для оставшихся остатков b_j , $j=1, \dots, J$ образуется множество пар $N=\{<B_j, R_j>, j=1, \dots, J\}$, где $B_j=b_j$, а $R_j=R \vee r_j$ и r_j – дизъюнкт фактов, состоящий из литералов фактов, использованных при формировании остатка B_j . Если в процессе поглощения остатков из множества $N^{\wedge}$ будут исключены все остатки, то принимается $G=1$, $N=\{<1, 0>\}$. Фиксируются результаты выполнения процедуры Ω .

Процедура вывода. Введем следующие условные обозначения.

$w=<M, d, f, o, p, m>$ – базовая процедура вывода, в которой: $M=\{D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_I\}$ – множество исходных дизъюнктов; d – выводимый дизъюнкт; $o=<c, C>$ – пара множеств текущих остатков, образованных до выполнения (c) и после выполнения (C) процедуры; p – признак окончания вывода, имеющий три значения: «0» – вывод завершен успешно, «1» – вывод завершен не удачно, «G» – требуется продолжение вывода для полученных выводимых секвенций; f – дизъюнкт фактов, использованных для вывода дизъюнкта d из дизъюнктов множества M (для дизъюнкта выводимого заключения равен нулю); $m=\{<d_g, R_g>, g=1, \dots, G\}$ – множество пар: новый выводимый дизъюнкт d_g и соответствующий ему дизъюнкт R_g фактов, использованных при его выводе. При $p=0$, $m=\{<1, f'\>\}$, где дизъюнкт f' состоит из литералов фактов, использованных для вывода дизъюнкта d , и литералов фактов, использованных при формировании нулевых остатков. При $p=1$, $m=\{<0, 0>\}$.

Базовая процедура вывода использует в качестве субпроцедуры Ω -процедуру формирования остатков.

Процедура вывода применима, если $M \neq \emptyset$ и $J_i, K \geq 1$ ($i=1, \dots, I$), иначе сразу устанавливается признак $p=1$. При первом применении процедуры $f=0$, и во входное множество текущих остатков с включаются инверсии литералов выводимого дизъюнкта d : $c=\{ \neg L_k, k=1, \dots, K \}$. В базовой процедуре вывода выполняются следующие действия.

1. Формируются остатки дизъюнктов исходных секвенций:

1) исходные дизъюнкты с помощью Ω -процедур делятся на выводимый дизъюнкт: $\Omega_i=<D_i, d, f, Q_i, N_i>$, $i=1, \dots, I$. Причем, если хотя бы в одном множестве остатков $N_i^{\wedge}$ образуется хотя бы один нулевой остаток (признак $Q_i=0$), то вычисляется дизъюнкт литералов фактов $f^*=f \vee R'_1 \vee \dots \vee R'_u \vee \dots \vee R'_U$, получаемый из дизъюнкта f и дизъюнктов литералов фактов R'_u ($u=1, \dots, U$), сформированных в Ω -процедурах с признаком $Q_u=0$, принимается $p=0$, $m=\{<1, f^*>\}$ и производится переход к п.4, иначе выполняется следующее действие.

2) Исключаются остатки, равные единице. Если во всех Ω -процедурах все остатки равны единице (признаки $Q=1$), то вывод не возможен; принимается $p=1$, $m=\{<0, 0>\}$ и производится переход к п.4, иначе выполняется следующее действие.

3) Образуется множество E остатков исходных дизъюнктов: $E = \{b_s, s=1, \dots, S\}$, в которое включаются только отличающиеся друг от друга остатки b_{ir} . Из этого множества исключаются остатки, совпадающие с остатками множества c или поглощаемые ими. В результате формируется множество e остатков исходных секвенций, которое не содержит ранее полученных остатков. Если множество $e = \emptyset$, то вывод не возможен; принимается $p=1$, $m = \{<0, 0>\}$ и производится переход к п.4, иначе выполняется следующий пункт.

2. Проверяется конъюнктивное условие окончания вывода. Формируется выходное множество текущих остатков: $C = c \vee e$, $C = \{b_n, n=1, \dots, N\}$. Составляется выражение $\psi = \bigwedge_{n=1}^N b_n$,

которое упрощается путем перемножения остатков и исключения конъюнкций, содержащих сомножители вида $L \overline{L}$ ($0L$). Если, преобразуемое таким образом выражение, оказывается равным нулю, то вывод успешно завершается ($p=0$). При успешном завершении вывода вычисляется дизъюнкт литералов фактов $f^* = f \vee R'_1 \vee \dots \vee R'_w \vee \dots \vee R'_W$, получаемый из дизъюнкта f и дизъюнктов литералов фактов R'_w ($w=1, \dots, W$), сформированных в Ω -процедурах, содержащих остатки b_n , которым принадлежат литералы контрарных пар $L \overline{L}$ в выражении Ψ , принимается $p=0$, $m = \{<1, f^*>\}$ и осуществляется переход к п.4; в противном случае выполняется следующий пункт.

3. Формируются новые выводимые дизъюнкты. Из остатков множества $e = \{b_v, v=1, \dots, V\}$ оставляется выражение $\bigwedge_{v=1}^V b_v$, которое упрощается путем перемножения остатков и

исключения конъюнкций, содержащих сомножители вида $L \overline{L}$ ($0L$). Полученное после перемножения дизъюнктов и упрощения выражение является дизъюнктивной формой вида: $X_1 \vee \dots \vee X_g \vee \dots \vee X_G$, которая инвертируется и преобразуется в конъюнктивную форму $d_1 \dots d_g \dots d_G$, где $d_g = \overline{X_g}$ – новый дизъюнкт, $g=1, 2, \dots, G$. Для каждого нового выводимого дизъюнкта d_g вычисляется дизъюнкт литералов фактов $f_g = f \vee R_1 \vee \dots \vee R_g \vee \dots \vee R_G$, образуемый из дизъюнкта f и дизъюнктов литералов фактов R_g ($g=1, \dots, G$), сформированных в Ω -процедурах, с помощью которых были получены литералы остатков b_v , вошедшие в дизъюнкт d_g . Полученные таким образом пары: новый выводимый дизъюнкт и соответствующий ему дизъюнкт фактов включаются во множество $m = \{<d_g, f_g>, g=1, \dots, G\}$. Устанавливается значение признака окончания вывода $p=G$.

4. Конец процедуры.

Метод логического вывода. Для описания метода воспользуемся индексной функцией $i(h)$, в которой h будет означать номер шага вывода. Общий признак окончания вывода обозначим через P .

Перед началом логического вывода проверяется: не являются ли выводимые дизъюнкты непосредственными следствиями однолитеральных исходных дизъюнктов. Во множестве исходных дизъюнктов M выделяются однолитеральные дизъюнкты, и для каждого выводимого дизъюнкта d_k ($k=1, \dots, K$) проверяется, не содержит ли он хотя бы один литерал, совпадающий хотя бы с одним однолитеральным исходным дизъюнктом (фактом). Проверка осуществляется с помощью процедур частичного ДД: $\omega_k = \langle D^*, d_k, r_k, q_k, n_k \rangle$, в которых в качестве делимого выступает вспомогательный дизъюнкт D^* , составленный из однолитеральных исходных дизъюнктов. Если при выполнении процедуры частичного ДД для выводимого дизъюнкта d_e ($e=1, \dots, E$) получается остаток равный нулю, то дизъюнкт d_e исключается из множества выводимых дизъюнктов, а использованные при формировании остатка факты r_e включаются в дизъюнкт $F_0 = r_1 \vee \dots \vee r_E$. При исключении всех выводимых дизъюнктов принимается $P=0$, $F=F_0$ и вывод не производится. В противном случае оставшиеся дизъюнкты включаются во множество выводимых дизъюнктов $m = \{d_t, t=1, 2, \dots, T\}$ (при этом, если во множество m будут включены все дизъюнкты, то $F_0=0$), принимается $h=1$ и выполняется первый шаг вывода.

Шаг вывода h . Для каждого дизъюнкта $d_{i(h)}$ множеств $m_{i(h-1)}$ выполняются w -процедуры: $w_{i(h)} = \langle M, d_{i(h)}, f_{i(h)}, o_{i(h)}, p_{i(h)}, m_{i(h)} \rangle$, $i(h) = i(h-1).t_{i(h-1)}$, $t_{i(h-1)} = 1, \dots, T_{i(h-1)}$.

Формируется общий дизъюнкт фактов, использованных в процессе успешного вывода дизъюнктов, и вычисляется общий признак окончания вывода на h -м шаге: $F_h = F_{h-1} \vee (\bigcup_{A=1}^B f_{i(h)})$, $P_h = \bigcup_{A=1}^B p_{i(h)}$, где $A = t_{i(h-1)}$, $B = T_{i(h-1)}$.

Если $P_h = G$, то h увеличивается на единицу, и процесс продолжается (выполняется $h+1$ шаг вывода), иначе вывод завершается. Причем, при $P_h = 1$ вывод завершается неудачно, а при $P_h = 0$ – успешно, и дизъюнкт $F = F_h$ состоит из литералов, образующих множество фактов E , необходимых для успешного вывода заданного заключения.

Рассмотрим пример ЛВ в ИП с определением фактов. В примере использована следующая лексика: O, P – предикатные константы; s, u, x, y, z – переменные; a, b, c, e – индивидуальные константы.

Пример. Исходными данными являются следующие предложения [3]:

- 1) руководит(Сергей,Борис): $P(c,b)$;
- 2) руководит(Борис,Анна): $P(b,a)$;
- 3) руководит(Анна,Евгений): $P(a,e)$;
- 4) руководит(x,y) $\rightarrow$ отчитывается(y,x): $P(x,y) \rightarrow O(y,x)$ или $\neg P(x,y) \vee O(y,x)$;
- 5) руководит(z,u) & отчитывается(s,u) $\rightarrow$ отчитывается(s,z): $P(z,u) \& O(s,u) \rightarrow O(s,z)$ или $\neg P(z,u) \vee \neg O(s,u) \vee O(s,z)$;
- 6) отчитывается(Евгений, Сергей): $O(e,c)$ (выводимое заключение).

Необходимо заметить, что литерал дизъюнкта заключения (6) не унифицируется ни с одним из литералов фактов (1-3), поэтому принимается $F_0 = 0$, $h = 1$ и выполняется первый шаг вывода.

Шаг 1. Выполнение w-процедуры $w_1 = \langle M, d_1, f_1, o_1, p_1, m_1 \rangle$, $f_1 = 0$. Формируются остатки исходных дизъюнктов (4,5). Дизъюнкты D_4, D_5 с помощью Ω -процедур делятся на выводимый дизъюнкт d^1 (6): $\Omega_{1.1} = \langle D_4, d_1, f_1, Q_{1.1}, N_{1.1} \rangle$, $\Omega_{1.2} = \langle D_5, d_1, f_1, Q_{1.2}, N_{1.2} \rangle$, где $D_4 = \neg P(x,y) \vee O(y,x)$, $D_5 = \neg P(z,u) \vee \neg O(s,u) \vee O(s,z)$, $d_1 = O(e,c)$, $f_1 = 0$, $Q_{1.1} = G$, $N_{1.1} = \{ \langle b_{1.1.1}, R_{1.1.1} \rangle \}$, $b_{1.1.1} = \neg P(c,e)$, $R_{1.1.1} = 0$, $Q_{1.2} = G$, $N_{1.2} = \{ \langle b_{1.2.1}, R_{1.2.1} \rangle \}$, $b_{1.2.1} = \neg O(e,b)$, $R_{1.2.1} = P(c,b)$.

При первом применении процедуры во входное множество текущих остатков включаются инверсии литералов выводимого дизъюнкта: $c_1 = \{ \neg O(e,c) \}$. Образуется множество E_1 остатков исходных дизъюнктов: $e_1 = E_1 = \{ \neg P(c,e), \neg O(e,b) \}$. Составляется выражение, представляющее собой конъюнкцию остатков множества $C_1 = c_1 \cup e_1$: $\neg O(e,c) \neg P(c,e) \neg O(e,b)$. Поскольку это выражение не равно ни единице, ни нулю, составляется выражение, представляющее собой конъюнкцию остатков множества e_1 : $\neg P(c,e) \neg O(e,b)$, которое путем инвертирования преобразуется в новый выводимый дизъюнкт: $d_{1.1} = P(c,e) \vee O(e,b)$. Для выводимого дизъюнкта $d_{1.1}$ вычисляется дизъюнкт литералов фактов $f_{1.1} = f_1 \vee R_{1.1.1} \vee R_{1.2.1} = P(c,b)$, где $R_{1.1.1} = 0$ и $R_{1.2.1} = P(c,b)$ – дизъюнкты литералов фактов, полученные в Ω -процедурах при формировании остатков $b_{1.1.1}$ и $b_{1.2.1}$. Полученная таким образом пара: новый выводимый дизъюнкт и соответствующий ему дизъюнкт фактов включаются во множество $m_1 = \{ \langle d_{1.1}, f_{1.1} \rangle \}$. Устанавливается значение признака окончания вывода $p_1 = G$.

Формируется общий дизъюнкт фактов, использованных в процессе успешного вывода дизъюнктов, и вычисляется общий признак окончания вывода на 1-м шаге: $F_1 = 0$, $P_1 = p_1 = G$. Поскольку $P_1 = G$, то h увеличивается на единицу, и выполняется второй шаг вывода.

Шаг 2. Выполнение w-процедуры $w_{1.1} = \langle M, d_{1.1}, f_{1.1}, o_{1.1}, p_{1.1}, m_{1.1} \rangle$. Дизъюнкты D_4, D_5 с помощью Ω -процедур делятся на дизъюнкт $d_{1.1} = P(c,e) \vee O(e,b)$: $\Omega_{2.1} = \langle D_4, d_{1.1}, f_{1.1}, Q_{2.1}, N_{2.1} \rangle$, $\Omega_{2.2} = \langle D_5, d_{1.1}, f_{1.1}, Q_{2.2}, N_{2.2} \rangle$, где $D_4 = \neg P(x,y) \vee O(y,x)$, $D_5 = \neg P(z,u) \vee \neg O(s,u) \vee O(s,z)$, $f_{1.1} = P(c,b)$, $Q_{2.1} = G$, $N_{2.1} = \{ \langle b_{2.1.1}, R_{2.1.1} \rangle \}$, $b_{2.1.1} = \neg P(b,e)$, $R_{2.1.1} = 0$, $Q_{2.2} = G$, $N_{2.2} = \{ \langle b_{2.2.1}, R_{2.2.1} \rangle \}$, $b_{2.2.1} = \neg O(e,a)$, $R_{2.2.1} = P(b,a)$. Входное множество текущих остатков принимается равным выходному множеству предыдущего шага: $c_2 = C_1$. Образуется множество E_2 остатков исходных секвенций: $e_2 = E_2 = \{ \neg P(b,e), \neg O(e,a) \}$. Составляется выражение, представляющее собой

конъюнкцию остатков множества $C_2 = c_2 \cup e_2$: $\neg O(e, c) \neg P(c, e) \neg O(e, b) \neg P(b, e) \neg O(e, a)$.

Поскольку это выражение не равно ни единице, ни нулю, составляется выражение, представляющее собой конъюнкцию остатков множества e_2 : $\neg P(b, e) \neg O(e, a)$, которое путем инвертирования преобразуется в новый выводимый дизъюнкт: $d_{1.1.1} = P(b, e) \vee O(e, a)$. Для выводимого дизъюнкта вычисляется дизъюнкт литералов фактов $f_{1.1.1} = f_{1.1} \vee R_{2.1.1} \vee R_{2.2.1} = P(c, b) \vee P(b, a)$, где $R_{2.1.1} = 0$ и $R_{2.2.1} = P(b, a)$ дизъюнкты литералов фактов, полученные в Ω -процедурах при формировании остатков $b_{2.1.1}$ и $b_{2.2.1}$. Полученная таким образом пара: новый выводимый дизъюнкт и соответствующий ему дизъюнкт фактов включаются во множество $m_{1.1} = \{<d_{1.1.1}, f_{1.1.1}>\}$. Устанавливается $p_{1.1} = G$. Формируется общий дизъюнкт фактов, общий признак окончания вывода на 2-м шаге: $F_2 = 0$, $P_2 = p_{1.1} = G$. Поскольку $P_2 = G$, то h увеличивается на единицу, и выполняется третий шаг вывода.

Шаг 3. Выполнение w -процедуры $w_{1.1.1} = \langle M, d_{1.1.1}, f_{1.1.1}, o_{1.1.1}, p_{1.1.1}, m_{1.1.1} \rangle$. Дизъюнкты D_4, D_5 с помощью Ω -процедур делятся на дизъюнкт $d_{1.1.1} = P(b, e) \vee O(e, a)$: $\Omega_{3.1} = \langle D_4, d_{1.1.1}, f_{1.1.1}, Q_{3.1}, N_{3.1} \rangle$, $\Omega_{3.2} = \langle D_5, d_{1.1.1}, f_{1.1.1}, Q_{3.2}, N_{3.2} \rangle$, где $D_4 = \neg P(x, y) \vee O(y, x)$, $D_5 = \neg P(z, u) \vee \neg O(s, u) \vee O(s, z)$, $f_{1.1.1} = P(c, b) \vee P(b, a)$, $Q_{3.1} = 0$, $N_{3.1} = \{<0, f'_{1.1.1}>\}$, $f'_{1.1.1} = f_{1.1.1} \vee R'_{3.1.1} = P(c, b) \vee P(b, a) \vee P(a, e)$, где $R'_{3.1.1} = P(a, e)$, $Q_{3.2} = 1$, $N_{3.2} = \{<1, 0>\}$. Таким образом, в процессе деления получается $Q_{3.1} = 0$, поэтому устанавливается значение признака окончания вывода $p_{1.1.1} = 0$.

Формируется общий дизъюнкт фактов, использованных в процессе успешного вывода дизъюнктов, и вычисляется общий признак окончания вывода на 3-м шаге: $F = F_3 = f'_{1.1.1} = P(c, b) \vee P(b, a) \vee P(a, e)$, $P_3 = p_{1.1.1} = 0$. Поскольку $P_3 = 0$, то вывод успешно завершается. Факты, использованные при успешном выводе из множества исходных посылок заключения $d_1 = O(e, c)$, содержатся в общем дизъюнкте литералов фактов $F = P(c, b) \vee P(b, a) \vee P(a, e)$.

Схема логического вывода для рассмотренного примера приведена на рисунке 1, где $\lambda_1 = \{c/z^1, b/u^1, e/s^1\}$, $\lambda_2 = \{b/z^2, a/u^2, e/s^2\}$, $\lambda_3 = \{e/x^3, a/y^3\}$.

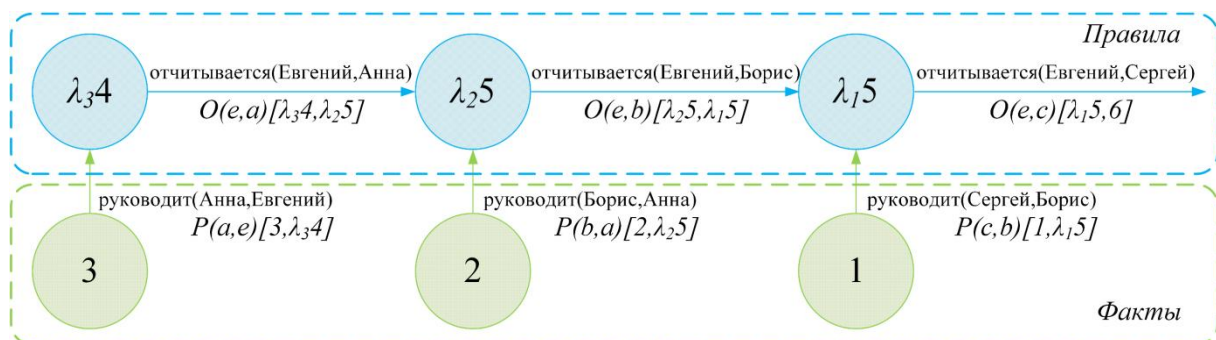


Рис. 1 – Схема логического вывода заключения «отчитывается(Евгений, Сергей)»

Вывод. Разработанный метод дедуктивного ЛВ имеет следующие достоинства:

- 1) расширение дедуктивного метода ЛВ с определением фактов в исчислении высказываний [2] до синтаксиса исчисления предикатов значительно расширяет класс задач, решаемых с его помощью;
- 2) определение фактов, обеспечивающих успешный ЛВ, не требует дополнительного времени, так как осуществляется в процессе с ЛВ;
- 3) структура метода позволяет выделить параллелизм на уровне задач (выполнение процедур, вычисление матриц «производных») и параллелизм по выходным данным (выполнение подстановок, унификация литералов), что делает возможным его эффективную (с точки зрения аппаратных и энергетических затрат) реализацию на современных гетерогенных вычислительных системах.

Одной из перспективных областей применения разработанного метода ЛВ является логическое прогнозирование [4]. В этом случае выводимое заключение описывает анализируемую ситуацию (состояние), а факты, определяемые при успешном выводе, соответствуют прогнозируемым событиям, необходимым для перехода в данную ситуацию.

Список литературы

1. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию / А. Тейз [и др.]; пер. с франц. П. П. Пермякова. – Москва : Мир, 1990. – 432 с.
2. Вожегов, Д. В. Метод параллельного дедуктивного логического вывода с определением фактов [Текст] / Д. В. Вожегов, Д. А. Страбыкин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 97–99.
3. Страбыкин Д.А. Логический вывод в системах обработки знаний / СПбГЭТУ; [под ред. Д. В. Пузанкова]. Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ, 1998. – 164 с.
4. Страбыкин, Д.А. Логическое прогнозирование развития ситуаций на основе дедуктивного вывода [Текст] / Д. А. Страбыкин, М. Н. Томчук // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 2. – С. 276–282.

05.13.06

Л.В. Галина, Д. А. Проскурин, А.С. Русяев

Оренбургский государственный университет,
аэрокосмический институт, кафедра систем автоматизации производства,
Оренбург, lubov51@yandex.ru, dimitrpro@mail.ru, nermal@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Настоящая статья посвящена исследованию вопроса оценки эффективности производственных систем. Рассмотрены два метода – аналитический расчет и компьютерное моделирование. Приведены результаты имитационного моделирования, позволившие получить математические модели применимые для оперативной оценки эффективности работы производственной системы при проектировании нового изделия на этапе подготовки производства.

Ключевые слова: эффективность производства, имитационное моделирование, производственная система.

Оценка эффективности в условиях современного производства на различных этапах обработки деталей является актуальной задачей для многих предприятий, использующих высокоавтоматизированное оборудование. Наибольшим спросом пользуются методики оценки эффективности на этапе принятия решения о производстве и на этапе подготовки производства.

Для оценки эффективности по основным показателям возможно применение двух методов: аналитический расчет и компьютерное моделирование. Все рассмотренные методики расчета показателей эффективности основаны на ранее полученных экспериментальных данных. Проведенный анализ возможных математических зависимостей такого показателя, как срок окупаемости, выявил его зависимость от параметров, характеризующих функционирование производственной системы, среди них, такие как коэффициент загрузки оборудования производственной системы, продолжительность одного цикла работы производственной системы, время выполнения сменного задания и плановый срок окупаемости производственной системы. В связи с этим возникает потребность рассматривать набор показателей, характеризующих эффективность работы производственной системы: срок окупаемости производственной системы принять в виде основного показателя, а также коэффициент загрузки оборудования и себестоимость производства изделия на данном оборудовании.

Анализ большинства рассмотренных аналитических формул расчета выявил, что имеются показатели, которые можно выделить лишь после реальной работы производственной системы, либо при моделировании её работы. Из этого следует, что провести анализ эффективности работы вновь создаваемой производственной системы, либо внедрения в производство новой, не производимой ранее детали, аналитическим способом не представляется возможным.

Единственным выходом в данной ситуации является компьютерное моделирование процесса функционирования производственной системы, при котором исходными данными являются характеристики существующего оборудования и деталей, внедряемых в производство, а выходными данными станут результаты функционирования системы [1].

Применение компьютерного моделирования предполагает выбор вида математических моделей. Использование аналитических моделей затруднено из-за сложности описания процесса функционирования производственной системы с помощью точного языка математики. Второй вариант – имитационное моделирование – позволяет составить такой моделирующий алгоритм, который воспроизводит процесс функционирования существующей производственной системы. Основным достоинством имитационного моделирования является то, что моделируются простейшие явления – составные элементы

процесса, без изменения их логической структуры и последовательности поведения во времени, это дает возможность по реальным данным о производственной системе и детали выявить сведения о характеристиках процесса в строго идентифицированные моменты времени, дающие возможность анализировать характеристики самой системы.

Специализированные программные продукты имитационного моделирования, разработанные для решения определенной области задач, наиболее удобны для проведения моделирования процесса функционирования существующей производственной системы. Примерами таких специализированных средств моделирования, могут служить система «Каскад» [2] и программное средство «Stok» [3], разработанные для моделирования процесса функционирования производственных систем. При этом следует уточнить, что результаты проведенных вычислительных экспериментов возможно применять лишь для определения показателей эффективности рассматриваемой производственной системы при строго определенных значениях параметров технологического процесса изготовления детали и параметрах производственной среды [4]. Однако для оперативной оценки эффективности внедрения в производство новых деталей необходима разработка специальных автоматизированных средств.

На основании изучения чертежа и технологической карты обработки усредненной детали, технических характеристик оборудования, алгоритмов организации работы оборудования и уровня автоматизации вспомогательных процессов составлен необходимый и достаточный набор исходных параметров, дающих возможность с помощью программных средств рассчитать показатели производственной системы.

Множество исходных параметров включает:

$$X = \{X_T, X_{OP}, X_{OB}, A\},$$

где $X_T = \{t_{маш}, t_{всп}, m\}$ – множество параметров, характеризующий технологию изготовления изделия; $t_{маш}$ – машинное время перехода; $t_{всп}$ – вспомогательное время перехода; m – количество переходов в операции; $X_{OP} = \{N, R\}$ – множество параметров, характеризующих организацию функционирования оборудования; N – количество рассматриваемых деталей в партии запуска; R – количество станков в производственной системе; $X_{OB} = \{t_{смин}, t_{замин}, t_{сдву}\}$ – множество параметров, характеризующих технические характеристики оборудования; $t_{см}$ – время смены инструмента в шпинделе станка, $t_{зам}$ – время замены инструмента в инструментальном магазине; $T_{зар}$ – время смены изделия в рабочей зоне; A – уровень автоматизации вспомогательных функций. [5]

Для проведения вычислительных экспериментов были составлены все возможные варианты сочетания параметров. На основании полученных результатов моделирования были сделаны выводы, позволившие обобщить полученные данные и составить математические зависимости, облегчающие процесс принятия решения.

Полученные экспериментальные данные были обработаны с помощью средства MS Excel, что позволило получить их выявленные закономерности в виде точечных диаграмм (рис.1).

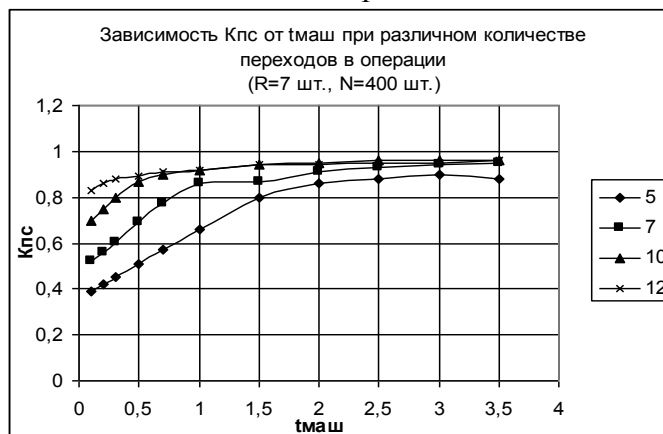


Рис. 1 – Графическая интерпретация результатов вычислительных экспериментов

Дальнейшим этапом проведенной работы являлась аппроксимация полученных графических закономерностей. Были проанализированы несколько вариантов линий тренда, с использованием стандартных возможностей программного средства MS Excel, полученные значения критерия минимального отклонения математической зависимости от экспериментальных значений показателей эффективности позволили сделать вывод, что оптимальной является аппроксимация с использованием полинома четвертой степени.

Для всех вариантов полученных графических зависимостей были рассчитаны математические модели, в виде полинома второй степени, описывающие зависимость коэффициента загрузки системы - Кпс и срока окупаемости системы - Lo от изменяемого параметра.

По полученным моделям производится оценка влияния одного изменяемого параметра при прочих неизменных. Такие математические модели были названы локальными. Не во всех случаях оценки эффективности есть возможность воспользоваться локальными моделями. В результате возникла необходимость комплексной оценки влияния рассматриваемых параметров. Для этого применен метод полного факторного эксперимента, давший возможность получить математические модели оценки эффективности системы от всех параметров. Математические модели представлены в виде полинома второй степени и названы укрупненными.

Так, например, для системы со вторым уровнем автоматизации при кодированных значениях рассматриваемых параметров, изменяемых на двух уровнях, укрупнённая математическая модель имеет следующий вид:

$$K_{\text{пс}} = 0,8175 + 0,118516 \cdot x_1 + 0,125547 \cdot x_2 - 0,03852 \cdot x_3 + 0,012813 \cdot x_4 + 0,007891 \cdot x_5 - 0,02328 \cdot x_6 - 0,09437 \cdot x_7 - 0,00375 \cdot x_8 - 0,10406 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,005156 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,004453 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,00313 \cdot x_1 \cdot x_5 + 0,007578 \cdot x_1 \cdot x_6 + 0,067578 \cdot x_1 \cdot x_7 - 0,00023 \cdot x_1 \cdot x_8 + 0,012188 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,011484 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,003906 \cdot x_2 \cdot x_5 + 0,015391 \cdot x_2 \cdot x_6 + 0,060547 \cdot x_2 \cdot x_7 - 0,00727 \cdot x_2 \cdot x_8 + 0,014297 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,000781 \cdot x_3 \cdot x_5 + 0,009297 \cdot x_3 \cdot x_6 - 0,02758 \cdot x_3 \cdot x_7 - 0,00461 \cdot x_3 \cdot x_8 + 0,001641 \cdot x_4 \cdot x_5 - 0,00828 \cdot x_4 \cdot x_6 + 0,004687 \cdot x_4 \cdot x_7 - 0,00125 \cdot x_4 \cdot x_8 + 0,004766 \cdot x_5 \cdot x_6 + 0,012891 \cdot x_5 \cdot x_7 + 0,002578 \cdot x_5 \cdot x_8 + 0,009687 \cdot x_6 \cdot x_7 - 0,00578 \cdot x_6 \cdot x_8 - 0,00844 \cdot x_7 \cdot x_8$$

где x_i - кодированное значение i - го входного параметра.

Полученные локальные и укрупненные математические модели позволили разработать подсистему АСТПП [6], реализованную в виде комплекса программных средств, дающую возможность руководителю предприятия по заданным показателям эффективности функционирования высокоавтоматизированных производственных систем оперативно оценить возможность производства нового вида изделий.

Список литературы

1. Сердюк, А.И. Разработка технического предложения по созданию гибкой производственной системы механической обработки / А.И. Сердюк, А.И. Сергеев, М.А. Корнипаев, Д.А. Проскурин // Современные наукоемкие технологии. – 2016. - №3-2. – С.272– 279.
2. Сердюк, А.И. Компьютерная система «Каскад» как инструмент проектировщика, технолога и диспетчера ГПС: сб. трудов XXV Российской школы по проблемам науки и технологий / А.И. Сердюк, А.И. Сергеев. – М. : РАН, 2005. – С. 383 – 390.
3. Сердюк, А.И. Моделирование производственного процесса ГПС / А.И. Сердюк // СТИН. – 1994. – №11. – С. 11 – 13.
4. Русяев, А.С. Количественная оценка эффективности правил обслуживания в АСУ гибких производственных ячеек / А. С. Русяев, Р. Р. Рахматуллин, А. И. Сердюк // Автоматизация. Современные технологии. – 2011. – № 1. – С.41 – 46.
5. Галина, Л.В. Программный комплекс для оценки эффективности изготовления изделия / Л. В. Галина, А. И. Сердюк, А. М. Черноусова // Программные продукты и системы. – 2010. – №4. – С.128 – 131.
6. Галина Л.В. Экспресс-оценка номенклатуры изделий по критериям эффективности использования производственного оборудования. / Л.В. Галина, А.М. Черноусова. - Вестник ОГУ. – 2011. - №5. – С. 151 – 157.

05.13.18

¹В.Г. Дегтярь д.т.н., проф., член-корр. РАН; ²В.И. Пегов, д.т.н., проф.; ¹А.Д. Чешко¹Акционерное общество «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева», г. Миасс, src@makeyev.ru²Южно-Уральский научный центр УрО РАН, отдел фундаментальных проблем аэрокосмических технологий, г. Миасс, finigz@mineralogy.ru**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ВОДЕ**

Разработаны методы расчёта и экспериментальных исследований на моделях избыточного давления при запуске реактивного двигателя ракеты в воде и в затопленной водой шахте подводной лодки. Вызванное нестационарное течение жидкости предполагается потенциальным, а газ - совершенным. Решение задачи сводится при этом к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих истечение идеальной жидкости из отверстий различных конфигураций в безграничную жидкость, методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. Достоверность разработанных методов расчёта подтверждается полученными результатами экспериментов.

Ключевые слова: ракета, подводная лодка, реактивный двигатель, моделирование, эксперимент.

При подводном старте ракет с подводных лодок запуск маршевого двигателя может производиться в воде в непосредственной близости от лодки после выхода ракеты из пусковой шахты, например, при старте её с помощью порохового аккумулятора давления (рис. 1 а), или в случае старта на маршевом двигателе в затопленной водой пусковой шахте подводной лодки (рис. 1 б).

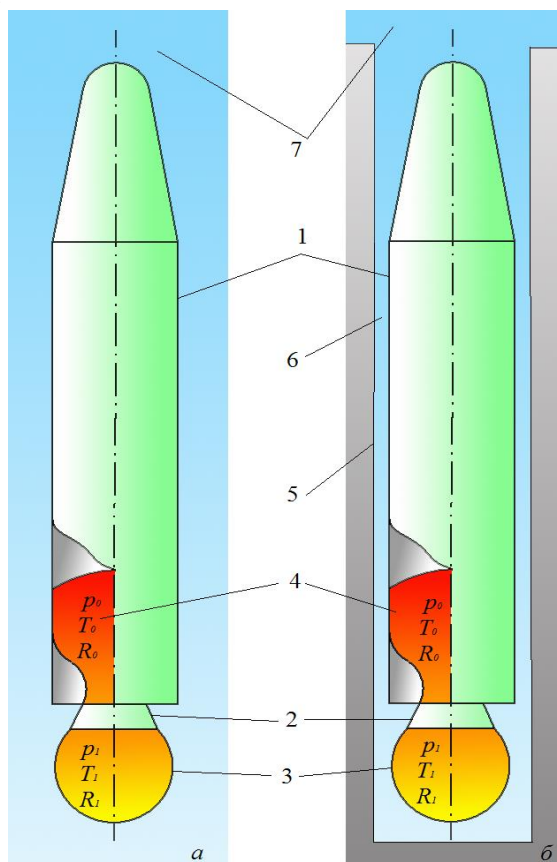


Рис. 1 - Схема запуска двигателя в воде после выхода ракеты из шахты (а) и внутри затопленной водой шахты (б): 1 – ракета; 2 – сопло двигателя; 3 – образующийся при запуске двигателя газовый пузырь; 4 – камера сгорания двигателя; 5 – шахта; 6 – кольцевой канал; 7 – окружающая лодку вода

Исследования запуска маршевого двигателя жидкостных ракет в затопленной водой шахте подводной лодки и запуска маршевого двигателя твердотопливных ракет в воде, после выхода ракеты из шахты подводной лодки, проводятся, начиная с 50-х годов, в ГРЦ Макеева [1]. Исследования запуска реактивного двигателя в воде проводились также в других организациях Якимовым Ю.Л., Носовым М.М., Чалых Ю.А. и другими.

Более сложные физические процессы возникают при запуске двигателя в затопленной водой шахте, так как запуск двигателя происходит в ограниченный стенками шахты и днищем ракеты объём, который сообщается с окружающей подводную лодку водой только через кольцевой канал между корпусом ракеты и стенкой шахты (рис. 1 б).

Однако результаты исследований при запуске двигателя в воде позволяют более полно представить начальную фазу развития физических процессов и возможные методические подходы к разработке математической модели в более сложном процессе – при запуске двигателя в затопленной водой шахте. Поэтому остановимся вначале на исследовании процессов, возникающих при запуске двигателя в безграничной жидкости.

Подводный запуск двигателя отличается от запуска двигателя в воздухе. Пик повышенного давления возникает при разрушении сопловой мембраны. Это связано с началом истечения из сопла в воду выхлопных газов, находящихся под давлением в несколько мегапаскалей. Вследствие инерционности воды и необходимости некоторого времени для приведения её в движение для освобождения объёма под выхлопные газы, в прилегающем водном пространстве создаётся зона повышенных давлений и одновременно возрастает скорость подъёма давления в камере сгорания. Таким образом, подводный запуск двигателя приводит к всплеску давления у среза сопла, повышению давления в камере сгорания, что приводит к дополнительным нагрузкам на ракету и изменению выхода двигателя на расчётный режим.

Гидродинамическая задача может сводиться к определению движения жидкости из состояния покоя, которая имеет в момент прорыва мембраны некоторое избыточное давление на границе раздела сред (газ – жидкость), зависящее только от времени.

Задачу о нахождении течения жидкости из сопла будем сводить к известной задаче об истечении несжимаемой жидкости через круглое отверстие в тонкой стенке. Тогда потенциал скорости φ будет выражаться через объёмный расход $\frac{dV}{dt}$, текущий радиус r и радиус выходного сечения сопла r_a в следующем виде [2]:

$$\varphi(r, t) = -\frac{1}{2\pi r_a} \frac{dV}{dt} \int_0^\infty e^{-kx} J_0(kr) \sin(kr_a) \frac{dk}{k}, \quad (1)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Связь потенциала φ с давлением p находится из интеграла Коши-Лагранжа [2]

$$-\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \frac{p}{\rho_{жс}} = \frac{p_\infty}{\rho_{жс}}, \quad (2)$$

где p_∞ , $\rho_{жс}$ – гидростатическое давление и плотность жидкости.

Если давление в газовой полости p_1 определяется уравнением состояния $p_1 V = m_1 R_1 T_1$, то при подстановке (1) в (2) получим дифференциальное уравнение второго порядка относительно объёма

$$-\frac{1}{\pi r_a} \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{1}{2\pi^2 r_a^4} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 + \frac{m_1 R_1 T_1}{\rho_{жс} V} = \frac{p_\infty}{\rho_{жс}}, \quad (3)$$

где m_1, R_1, T_1 – масса, газовая постоянная и температура газа в образующейся газовой полости. В процессе истечения газа из сопла у его среза образуется газовый пузырь с радиусом r_n , близкий по форме к сферическому. Динамика сферического пузыря в безграничной жидкости описывается уравнением Релея [2]:

$$r_n \frac{d^2 r_n}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dr_n}{dt} \right)^2 = \frac{p_1 - p_\infty}{\rho_{жс}}.$$

Если последнее уравнение записать через объём сферического пузыря $V = \frac{4}{3} \pi r_n^3$, то получим выражение

$$-\frac{1}{12 (\pi/6)^{2/3} V^{1/3}} \frac{d^2 V}{dt^2} - \frac{1}{72 (\pi/6)^{2/3} V^{4/3}} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 + \frac{m_1 R_1 T_1}{\rho_{жс} V} = \frac{p_\infty}{\rho_{жс}}. \quad (4)$$

Таким образом, одни и те же величины, а именно p , V и T и, оказались связанными двумя различными соотношениями (3) и (4). На эти выражения можно смотреть как на асимптотические, причём для малых значений V следует принимать соотношение (3), а для больших значений V – соотношение (4). Для удобства обозначим в уравнениях (3) и (4) коэффициенты при $\frac{d^2 V}{dt^2}$ и $\frac{dV}{dt}$ как $\frac{1}{c_1}$ и $\frac{1}{c_2}$, и эти уравнения можно объединить:

$$-\frac{1}{c_1} \frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{1}{c_2} \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 + \frac{m_1 R_1 T_1}{\rho_{жс} V} = \frac{p_\infty}{\rho_{жс}}. \quad (5)$$

В уравнении (3) $c_1 = \pi r_a$, $c_2 = 2\pi^2 r_a^4$, в уравнении (4) $c_1 = 12(\pi/6)^{2/3} V^{1/3}$, $c_2 = -72(\pi/6)^{2/3} V^{4/3}$.

Для определения массы газа в пузыре необходимо в каждый момент времени определить расход из камеры сгорания двигателя. При высоких давлениях в пузыре расход газа из камеры будет зависеть от этого противодействия. Изменение расхода, в свою очередь, оказывает влияние на скорость горения топлива. Таким образом, гидродинамическая задача должна решаться в тесной взаимосвязи с газодинамической задачей в камере сгорания двигателя. Будем определять расход через критическое сечение сопла m_1 по формуле Сен-Венана, предполагая квазистационарность течения газа

$$\dot{m}_1 = a(k) \frac{p_o S_{кр}}{\sqrt{R_o T_o}} \text{ при } \frac{p_1}{p_o} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (6)$$

или

$$\dot{m}_1 = p_o S_{кр} \sqrt{\frac{2k}{k-1}} \sqrt{\frac{1}{R_o T_o} \left[\left(\frac{p_1}{p_o} \right)^{2/k} - \left(\frac{p_1}{p_o} \right)^{(k+1)/k} \right]} \text{ при } \frac{p_1}{p_o} \geq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (7)$$

В формуле (6) принято сокращение

$$a(k) = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}.$$

В уравнениях (6), (7) индексом “о” обозначены параметры в камере сгорания, k – показатель адиабаты продуктов сгорания. Выражение (6) соответствует сверхзвуковому истечению пороховых газов из сопла, а выражение (7) соответствует дозвуковому режиму истечения. Найдём массу выхлопных газов в пузыре

$$m_1 = m_{1нач} + \int_0^t \dot{m}_1 dt.$$

Поступление газа в камеру сгорания при горении заряда твёрдого топлива можно аппроксимировать формулой [3]:

$$\dot{m}_o = u_1 \left(\frac{p_o}{p_{1o}} \right)^v S_{соп} \rho_T, \quad (8)$$

где u_1 – скорость горения, p_{1o} – атмосферное давление, $S_{гор}$ – площадь горения, ρ_T – плотность топлива, V – эмпирическая константа.

Давление в камере сгорания после прорыва мембраны связано с процессом горения топлива (8) и расходом из сопла как

$$p_o = \frac{R_o T_o}{V_o} \int_0^t (\dot{m}_o - \dot{m}_1) dt + p_M,$$

где p_M – давление разрыва мембраны.

Для давления газа в пузыре можно использовать уравнение состояния:

$$p_1 = \frac{m_1 R_1 T_1}{V}. \quad (9)$$

Здесь пренебрегли начальным количеством воздуха в сопле, а также теплообменом между окружающей жидкостью и газом и процессами парообразования. Тогда, считая процесс адиабатическим, для определения температуры газа можно использовать уравнение сохранения энергии:

$$c_v m_1 \frac{dT_1}{dt} = \dot{m}_1 (i_o - c_v T_1) - p_1 \dot{V}, \quad (10)$$

где c_v – удельная теплоёмкость смеси газов, i_o – полная теплоёмкость выхлопных газов. Если учитывать процесс парообразования и считать, что пары испарившейся воды равномерно распределены по объёму пузыря, получим для данного случая следующее выражение

$$\frac{dm_n}{dt} = \frac{\dot{m}_1 (i_o - c_v T_o) - p_1 \dot{V}}{q + c_{vж} (T_o - T_{жс})}, \quad (11)$$

где m_n – масса пара, q – теплота парообразования, $c_{vжс}$ – теплоёмкость жидкости, $T_{жс}$ – температура жидкости. Однако расчёты, выполненные по уравнениям (10) и (11), отличаются между собой незначительно и мало отличаются при предположении, что температура смеси газов в пузыре T_1 равна температуре в камере сгорания T_o ($T_1 = T_o$). Это можно объяснить тем, что в процессе парообразования падение давления выхлопного газа вследствие его охлаждения компенсируется парциальным давлением образующегося пара, а в случае $T_1 = T_o$ происходит незначительное остывание газа в течение нескольких миллисекунд.

Соотношения (5) – (9) приведём к безразмерному виду, выполнив замены

$$V = \omega r_a^3, \quad p_1 = \bar{p} p_M, \quad t = \tau r_a \sqrt{\rho_{жс} / p_M},$$

где ω , $\bar{p}$, τ – безразмерные функции.

Тогда получим

$$\frac{1}{\bar{c}_1} \frac{d^2 \omega}{d\tau^2} - \frac{1}{\bar{c}_2} \left(\frac{d\omega}{d\tau} \right)^2 = \bar{p} - \frac{p_\infty}{p_M}, \quad \bar{p} = \frac{m_1 R_1 T_1}{r_a^3 p_M} \frac{1}{\omega}. \quad (12)$$

Здесь $\bar{c}_1 = c_1 / r_a$, $\bar{c}_2 = c_2 r_a^4$.

В связи с тем, что в момент прорыва мембраны давление в камере сгорания возрастает, примем линейный закон изменения по времени давления в камере сгорания

$$p_o(t) = p_M + \dot{p}_o t.$$

В момент прорыва мембраны при $t = 0$ давление в камере сгорания равно давлению прорыва мембраны $p_o = p_M$ и $\frac{dp_o}{dt} = \dot{p}_o$.

Примем сверхзвуковой характер истечения газа из сопла, так как дозвуковое происходит вначале в течение очень короткого промежутка времени. На основании последнего уравнения и уравнения (6) найдём выражение для расхода газа из камеры сгорания в пузырь

$$\dot{m}_1 = a(k) \frac{S_{кр}}{\sqrt{R_o T_o}} (p_M + \dot{p}_o t).$$

При интегрировании по времени последнего выражения получим равенство

$$m_1 = a(k) \frac{S_{кр}}{\sqrt{R_o T_o}} \left(p_M t + \dot{p}_o \frac{t^2}{2} \right). \quad (13)$$

Выражение (12) для $\bar{p}$ при замене t на τ и учёте выражения (13) примет вид

$$\bar{p} = \frac{a(k) S_{кр} R_1 T_1}{\sqrt{R_o T_o} r_a^3 p_M} \left(\frac{p_M r_a \sqrt{\rho_{жс}}}{\sqrt{p_M}} \tau + \frac{1}{2} \frac{\dot{p}_o r_a^2 \rho_{жс}}{p_M} \tau^2 \right) \frac{1}{\omega}.$$

Тогда безразмерные комплексы примут вид

$$\frac{p_\infty}{p_M}, \omega, \frac{p_o}{p_M}, \frac{p_M \sqrt{R_o T_o} a(k) \rho_o^{1/2} S_{кр}}{p_M^{3/2} S_a}, \frac{\dot{p}_o \rho_o \sqrt{R_o T_o} a(k) r_a S_{кр}}{p_M^2 S_a},$$

где S_a – площадь выходного сечения сопла ($S_a = \pi r_a^2$). Из проведённого анализа следует, что существенным параметром является лишь один из них:

$$\xi_1 = \frac{\dot{p}_o \rho_o \sqrt{R_o T_o} a(k) r_a S_{кр}}{p_M^2 S_a}. \quad (14)$$

Для определения максимального давления в точке, расположенной на расстоянии r ($r > r_a$) от центра сопла, можно пользоваться формулой

$$p(r)_{\max} = p_M \frac{r_a}{r} \eta,$$

которая была проверена и подтверждена результатами испытаний.

Для проведения экспериментальных исследований была разработана методика моделирования явлений, возникающих при запуске двигателя в воде. Физические свойства газа и воды будут полностью заданы, если известны выражения для их внутренней энергии:

$$\varepsilon_\varepsilon = \varepsilon_o \bar{\varepsilon}_\varepsilon \left(\frac{p}{p_M}, \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right), \quad \varepsilon_\varepsilon = \varepsilon_o \bar{\varepsilon}_\varepsilon \left(\frac{p}{p_M}, \frac{\rho}{\rho_{жс}} \right)$$

и выражение для теплоты испарения воды:

$$q = q_o \bar{q} \left(\frac{p}{p_M} \right),$$

где p_M , $p_{жс}$, ε_o и q_o – постоянные с размерностями давления, плотности и энергии на единицу массы. Таким образом, явление определяется следующими размерными постоянными p_M , $p_{жс}$, ε_o , q_o , r_a , t_o , из которых можно образовать три критерия подобия

$$\frac{\varepsilon_o \rho_{жс}}{p_M}, \frac{\varepsilon_o}{q_o}, \frac{t_o}{r_a} \sqrt{\frac{p_M}{\rho_{жс}}}.$$

Отсюда следует, что для моделирования рассматриваемого явления достаточно обеспечить на модели (М) и натуре (Н) одинаковые давления разрыва мембраны ($p_{ММ} = p_{МН}$), давления и температуры воды ($p_{\infty М} = p_{\infty Н}$, $T_{жсМ} = T_{жсН}$) использовать то же топливо ($T_{oМ} = T_{oН}$, $R_{oМ} = R_{oН}$, $k_M = k_H$) и обеспечить более быстрый выход двигателя на режим так, чтобы характерное время $t_{oМ}$ на модели было бы меньше натурального $t_{oН}$ в M раз,

$t_{oМ} = t_{oН} / M$ где M – геометрический масштаб моделирования. Расход модельного двигателя $m_{oМ}(t)$ должен отвечать при этом требованию [5]:

$$m_{oМ}(t) = m_{oН}(t) / M^2,$$

где m_{oH} – массовый расход натурального двигателя. Приведённые здесь требования на моделирование были выполнены при постановке экспериментальных исследований запуска двигателя в воде. Эксперименты были поставлены следующим образом: в воде запускался пороховой двигатель и делались замеры давления в камере сгорания, внутри сопла двигателя вблизи мембраны и давления в воде на разных расстояниях от сопла. Расчёты при запуске двигателя в воде были выполнены в предположении, что температура газа в образующейся при запуске двигателя газовой полости равна температуре газов в камере сгорания двигателя ($T_1 = T_o$). Интегрирование дифференциального уравнения (5) проводилось численным методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. Сравнение расчётной зависимости $\eta(\xi_1)$ с результатами экспериментов приведено на рис. 3, где $\eta = \frac{r_a}{r} \frac{p(r)_{\max}}{p_M}$, а ξ_1 рассчитывается по

формуле (14). Видно, что расчётные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

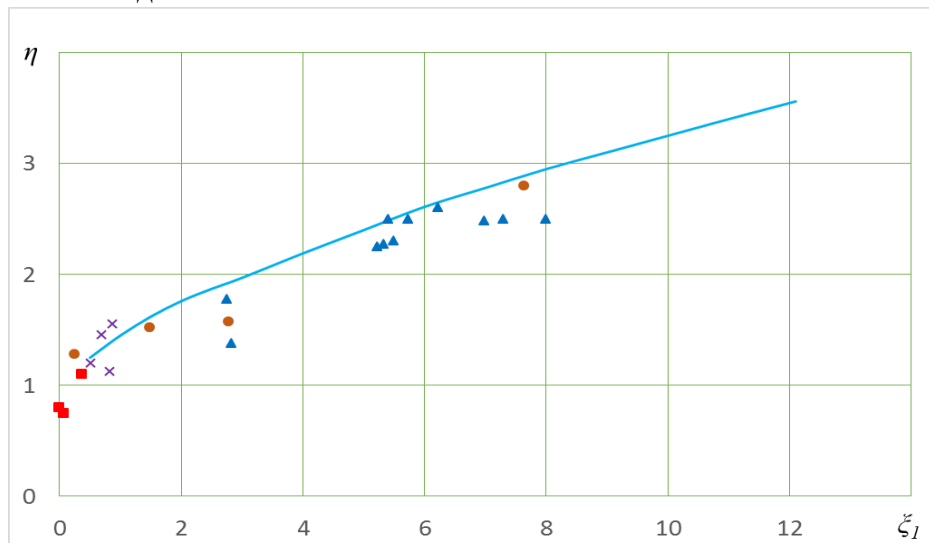


Рис. 3. Результаты расчётов и экспериментов для поля давления при запуске двигателя в воде: — расчёт; значки – экспериментальные данные

Как отмечалось, баллистические ракеты с жидкостными ракетными двигателями могут запускаться на маршевом двигателе из затопленных водой шахт подводных лодок. Стартовая шахта подводной лодки представляет собой пусковой стакан, диаметр которого D больше диаметра ракеты. Запуск двигателя производится в затопленный водой объём, ограниченный стенками шахты и днищем ракеты и сообщаемый с окружающей лодку водой через кольцевой канал (рис. 1 б). По сравнению с запуском двигателя в воде здесь, кроме описанных выше явлений – истечения жидкости и формирования у среза сопла газового пузыря, появляются дополнительно течение жидкости через кольцевой канал и истечение жидкости из цилиндрического канала (из шахты) в окружающую жидкость. Тогда для линии тока, которая начинается на межфазовой границе «газ-жидкость», проходит через кольцевой канал и срез цилиндра и заканчивается в окружающей лодку жидкости, потенциал скорости запишется в виде суммы

$$\varphi(x, t) = \varphi_{\text{блх}} + xu(t), \quad (15)$$

где $\varphi_{\text{блх}}$ – потенциал скорости при истечении жидкости из цилиндрического стакана, $u(t)$ – скорость жидкости в кольцевом канале ($u(t) = \frac{dx}{dt}$), x – Лагранжева координата, направленная вдоль канала.

Потенциал скорости при истечении воды из шахты $\varphi_{\text{блх}}$ вычислим из решения модельной задачи истечения идеальной жидкости из цилиндра в безграничную жидкость с постоянным по сечению отверстия значением нормальной компоненте скорости $U(t)$ [2]

$$\varphi_{\text{вых}}(r, t) = U(t) \frac{D}{2} \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{\xi} J_1\left(\xi \frac{D}{2}\right) J_0(\xi r).$$

Здесь J_1 , J_0 – функции Бесселя первого и нулевого порядка.

Определим среднее по сечению значение $\varphi_{\text{вых}}(t)$

$$\varphi_{\text{вых}}(t) = \frac{4}{\pi D^2} \int_0^{D/2} \pi D U(t) r dr \int_0^{\infty} \frac{d\xi}{\xi} J_1\left(\xi \frac{D}{2}\right) J_0(\xi r). \quad (16)$$

Воспользовавшись при вычислении интеграла (16) таблицами [4], найдём, что

$$\varphi_{\text{вых}}(t) = \frac{4D}{3\pi} U(t). \quad (17)$$

При движении жидкости в кольцевом канале и истечении из отверстия цилиндрического стакана в окружающую жидкость на основании формул (15)...(17) получим следующие соотношения с использованием объёмного расхода и его производных

$$u(t) = \frac{\dot{V}}{S_{\kappa}}, \quad U(t) = \frac{\dot{V}}{S_{\text{отв}}}, \quad \varphi = \dot{V} \left(\frac{x}{S_{\kappa}} + \frac{16}{3\pi^2 D} \right), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \ddot{V} \left(\frac{x}{S_{\kappa}} + \frac{16}{3\pi^2 D} \right).$$

Здесь S_{κ} , $S_{\text{отв}}$ – площади сечения канала и шахты ($S_{\text{отв}} = \pi D^2/4$). При учёте всей длины канала ($x = L$), которая практически не изменяется в течение всего процесса запуска, используя интеграл Коши-Лагранжа (2), получим дифференциальное уравнение для объёмного расхода при запуске двигателя в затопленной водой шахте

$$-\left(\frac{1}{c_1} + \frac{L}{S_{\kappa}} + \frac{16}{3\pi^2} \frac{1}{D} \right) \frac{d^2 V}{dt^2} + \left(\frac{1}{c_2} + \frac{1}{2S_{\kappa}^2} + \frac{1}{2S_{\text{отв}}^2} \right) \left(\frac{dV}{dt} \right)^2 + \frac{m_1 R_1 T_1}{\rho_{\text{ж}} V} = \frac{p_{\infty}}{\rho_{\text{ж}}}. \quad (18)$$

Выражение в круглых скобках при $\frac{d^2 V}{dt^2}$ определяет меру для инерционности жидкости,

которую единица массы жидкости должна преодолеть против внешнего давления, когда она переходит от рассматриваемого объёма к последующему. Слагаемое $1/c_1$ ($c_1 = \pi r_a$), связано с началом запуска реактивного двигателя, как и в безграничной жидкости, второе и третье слагаемые дополняют его при запуске в шахте: второе слагаемое L/S_{κ} связано с инерционностью протяжённого кольцевого канала, а третье – с инерционностью при истечении жидкости из шахты в окружающую лодку жидкость. Однако вклад каждого из них в общую сумму значительно различается. Так, если, например, для одного из ракетных комплексов разработки ГРЦ Макеева принять $1/c_1$ за единицу, то слагаемое L/S_{κ} составит 12,5 единиц, а слагаемое $16/(3\pi^2 D)$ составит 0,3 единицы, так что инерционность жидкости при запуске в шахте возрастает более чем на порядок. Это может значительно затруднить запуск двигателя в шахте и привести к явлению гидроудара: к скачкам давления в шахте и в камере сгорания двигателя и нарушению расчётного выхода двигателя на режим.

Для реализации запуска двигателя в затопленной водой шахте в разработанных ГРЦ Макеева морских ракетных комплексах нашли применение достаточно эффективные конструктивные решения:

- запуск рулевого блока с четырьмя соплами вместо основного блока с одним соплом;
- снижение давления прорыва мембраны до значений менее 1 МПа;
- снижение начального массового расхода до 10 % от расхода маршевого двигателя и затягивание времени выхода двигателя на режим;
- формирование перед запуском двигательной установки у её среза сопла газовой полости, например с помощью сжигания пороховой шашки. Реализация этих конструктивных решений позволяет снизить избыточное давление за днищем ракеты при запуске двигательной установки в затопленной водой шахте до допустимых величин и обеспечить расчётный выход на режим двигательной установки.

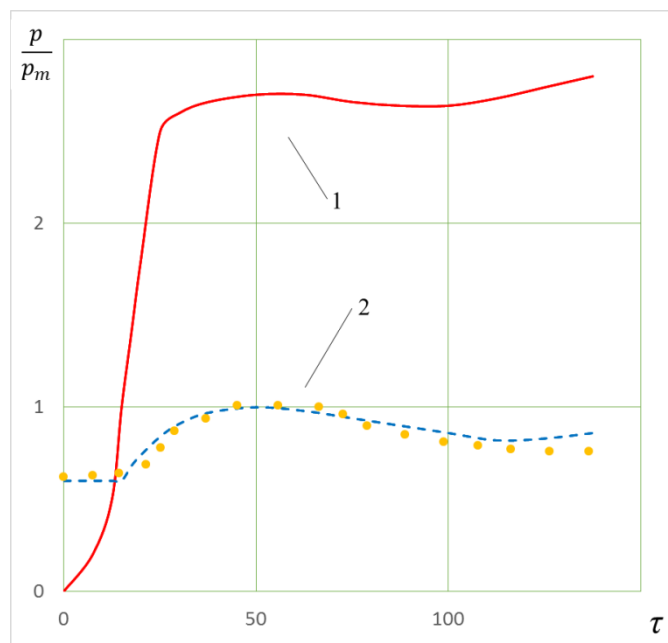


Рис. 4. Экспериментальные (—, - - -) и расчётные (•••) зависимости давления при запуске двигателя в затопленной водой шахте: 1 – в камере сгорания, 2 – в шахте

В качестве примера на рис. 4 приведены данные натурных испытаний и расчётные результаты при запуске рулевого блока двигателя с четырьмя соплами в затопленной водой шахте при начальном массовом расходе около 10 % от общего расхода маршевого двигателя и времени выхода рулевого блока на режим $\sim 0,4$ с, при давлении разрыва мембраны менее 1 МПа и при формировании перед запуском рулевого блока у среза его сопел с помощью сжигания пороховой шашки газовой полости, безразмерный объём которой достигает 50 ($\bar{V}_0 = V_0 / r_\Sigma^3 \approx 50$). Здесь $r_\Sigma = \sqrt{m} r_a$, где m – число сопел, при $m = 4$ $r_\Sigma = 2r_a$.

Из графика рис. 3 при запуске двигателя в безграничной жидкости и графиков рис. 4 при запуске двигателя в затопленной водой шахте подводной лодки и их сравнения с экспериментальными данными следует, что в целом получено удовлетворительное соответствие расчётных и экспериментальных данных, что может служить подтверждением надёжности и достоверности разработанной расчётной методики запуска двигателя в затопленной водой шахте подводной лодки.

Работа поддержана РФФИ. Грант 14-08-00128

Список литературы

1. Дегтярь В.Г., Пегов В.И. Гидродинамика подводного старта ракет. – М.: Машиностроение, 2009. – 448 с.
2. Ламб Г. Гидродинамика. – М.: Гостехиздат, 1947. – с.
3. Шишков А.А. Газодинамика пороховых ракетных двигателей. – М.: Машиностроение, 1974. – 156 с.
4. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: ГИЗ ФМЛ, 1962. – 1100 с.
5. Дегтярь В.Г. Физическое и математическое моделирование гидродинамики подводного старта ракет / Дегтярь В.Г., Пегов В.И. // Вестник концерна ПВО “Алмаз-Антей”. – 2015. – № 1 (13). – С. 65–70.

05.13.06

А.А. Денисевич, Е.В. Ефремов, М.И. Грачев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Физико-технический институт, кафедра Электроника и автоматика физических установок,
Томск, denisevichaa@tpu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ТАБЛЕТОК ПРИ ФАБРИКАЦИИ СНУП-ТОПЛИВА

Работа посвящена математическому описанию процесса прессования топливных таблеток для изготовления ТВЭЛов при фабрикации СНУП-топлива в рамках проекта «Прорыв». Рассмотрен дискретно-контактный подход при построении модели.

Ключевые слова: математическая модель, карботермический синтез, СНУП-топливо.

В перспективных реакторах, разрабатываемых в рамках проекта «Прорыв», предполагается использовать смешанное нитридное уран-плутониевое (СНУП) топливо. В настоящее время предлагается использовать метод карботермического синтеза для фабрикации СНУП-топлива. В целом данную технологию можно разделить на следующие процессы: приготовление рабочей смеси; брикетирование полученной смеси; карботермическое восстановление оксидов; измельчение шашек; прессование таблеток; спекание [1]. В данной работе представлен этап разработки математической модели процесса прессования таблеток перед их непосредственным спеканием. Существует дискретно-контактный подход к моделированию процесса прессования порошков [2].

Комплексный сравнительный анализ показал, что наиболее приемлемым для практического применения и для сравнения поведения различных порошковых материалов и схем их уплотнения является логарифмическое уравнение вида:

$$\rho = b \cdot \ln \left(\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{кр}}} \right) + 1 \quad (1)$$

где ρ – текущее значение относительной (безразмерной) плотности порошкового тела; $P_{\text{пр}}$ – абсолютное (размерное) значение давления прессования; $P_{\text{кр}}$ – критическое давление (абсолютное значение давления прессования, при котором достигается теоретическая плотность прессуемого порошкового материала); b – интенсивность уплотнения порошкового тела под воздействием давления прессования.

На начальном этапе прессования при $0 < P < b$ величина перепада относительной плотности $\Delta\rho$ численно превышает значение перепада относительного давления ΔP . В момент, когда величина относительного давления прессования P численно становится равной коэффициенту b , становятся равны величины перепадов относительной плотности $\Delta\rho$ и относительного давления ΔP . При дальнейшем повышении давления, когда $b < P < 1$, величина потерь относительного давления прессования P превышает перепад относительной плотности $\Delta\rho$. Таким образом, в процессе уплотнения порошкового тела в закрытой пресс-форме последовательно выполняются следующие условия:

$$\begin{cases} \text{если } 0 < P < b, \text{ то } \Delta P < \Delta\rho \\ \text{если } P = b, \text{ то } \Delta P = \Delta\rho \\ \text{если } b < P < 1, \text{ то } \Delta P > \Delta\rho \end{cases}, \quad (2)$$

В рамках механистической модели уплотнения порошкового тела, первое условие соответствует начальному этапу компактирования, в ходе которого уплотнение определяется в основном процессами взаимной укладки и перераспределения его структурных элементов (частиц, агломератов). Второе из представленных условий соответствует состоянию порошкового тела, при котором процессы взаимной укладки и перераспределения его структурных элементов достигают своего максимума. Указанное условие может быть

использовано для определения характерной точки на кривой уплотнения любого порошкового материала, компактируемого любым способом в закрытом объёме. Эта точка соответствует относительной плотности прессовки:

$$\rho_b = b \cdot \ln b + 1, \quad (3)$$

полученной при относительном давлении прессования $P=b$.

Для любого порошкового материала указанная характерная точка определяется, как точка пересечения его кривой уплотнения с зависимостью:

$$\rho_b(P) = b \cdot \ln b + 1, \quad (4)$$

Выработанный подход позволяет использовать характерные значения давления прессования и относительной плотности для оценки эффективности процесса уплотнения. Сравнивая соответствующие значения P_b и ρ_b для однотипных порошков, отпрессованных в различных технологических условиях, можно оценивать эффективность внешнего воздействия или влияния различных технологических факторов на процесс компактирования. Приравняв нулю первую производную по b , выражения (3) можно найти минимальное значение ρ_b . Для любого порошкового материала в диапазоне изменения коэффициента $b = [0 \div 1]$ значение ρ_b лежит в диапазоне изменения от $(1-1/e \approx 0,632)$ до 1. Для любых порошковых материалов значение плотности ρ_b , при котором процессы взаимного перераспределения и укладки их структурных элементов достигают своего предельного значения, лежит в диапазонах эквивалентной плотности упаковки частиц сферической формы с одинаковым размером, соответствующих величине среднего координационного числа N_c (число точек соприкосновения шара с соседними) от значения $N_c \approx 9$ и выше. При дальнейшем повышении плотности прессовки, объём незанятого структурными элементами порошкового тела пространства и свобода их взаимного перераспределения уменьшаются настолько, что дальнейшее уплотнение невозможно без их подавляющего разрушения. Последнее из условий системы (2), отражает состояние порошкового тела, в котором уплотнение за счёт процесса хрупкой или пластической деформации его структурных элементов сравнивается и начинает преобладать над уплотнением за счёт их взаимного перераспределения и укладки. Коэффициент b можно сопоставить величине относительного давления прессования P , при котором наступает смена преобладания механизмов уплотнения порошкового тела, а процесс взаимного перераспределения и укладки его структурных элементов достигает своего максимума. В соответствии с основным положением модели, уплотнение порошкового тела можно выразить через сумму уплотнений за счёт двух основных процессов:

$$\rho = \rho_{pack} + \rho_{def}, \quad (5)$$

где ρ_{pack} – уплотнение за счет процесса взаимного перераспределения и укладки структурных элементов порошкового тела; ρ_{def} – уплотнение за счет процесса их необратимой деформации.

Зависимость уплотнения за счёт необратимой деформации структурных элементов порошкового тела от давления прессования является линейной и прямо пропорциональной. В соответствии с выработанным ранее подходом, который предусматривает, в частности, использование в математической интерпретации, разработанной модели выражений в безразмерной форме, прямая пропорциональность между относительной плотностью и относительным давлением прессования подразумевает численное равенство их относительных величин на всём протяжении уплотнения порошкового тела:

$$\rho_{def} = P, \quad (6)$$

Отсюда можно выразить уплотнение за счёт взаимного перераспределения и укладки структурных элементов и найти давление прессования, при котором оно достигает своего максимального значения:

$$\rho_{pack} = b \cdot \ln P + 1 - P, \quad (7)$$

$$\frac{dp_{pack}}{dP} = \frac{b}{P} - 1, \quad (8)$$

Из (8) следует, что первая производная уплотнения за счёт взаимного перераспределения и укладки структурных элементов равна нулю при относительном давлении прессования $P = b$. Таким образом, величина уплотнения за счёт процессов перераспределения и укладки достигает своего максимума при давлении прессования P_b , что подтверждает не только физическую интерпретацию коэффициента b , но и правомерность постановки условий (2) и правильности выбора логарифмической формы безразмерного логарифмического уравнения прессования (1) в качестве основного соотношения для математического описания сформулированной физической модели уплотнения.

Произведение коэффициента b предложенного уравнения прессования на коэффициенты бокового давления и пристенного трения является константой для данного порошкового материала в данных условиях прессования на всём его протяжении и равно отношению перепада относительной плотности к величине приведённой высоты прессовки:

$$\frac{\Delta\rho}{L} = b \cdot \xi \cdot f = const, \quad (9)$$

Следовательно, для любого порошкового материала в данных условиях прессования существует предельное (максимальное) значение относительного перепада плотности вдоль оси прессования, превышение которого невозможно. Максимальное значение перепада относительной плотности в актуальном диапазоне действующих значений давления определяется максимальным значением приведённой высоты порошкового тела L_0 в момент начала прессования и может быть найдено по соотношению:

$$\Delta\rho_{max} = L_0 \cdot b \cdot \xi \cdot f \quad (10)$$

Соответственно, минимальное значение перепада относительной плотности в актуальном диапазоне давлений при достижении теоретической плотности порошкового тела определяется минимальным значением его приведённой высоты L_1 :

$$\Delta\rho_{min} = L_1 \cdot b \cdot \xi \cdot f \quad (11)$$

Можно получить аналогичные выражения для перепада относительного давления прессования на приведённом расстоянии:

$$\Delta P = L \cdot P \cdot \xi \cdot f \quad (12)$$

На основании полученного математического описания процесса прессования топливных таблеток будет разработана компьютерная модель процесса прессования и проверена её адекватность реальному процессу, путём сопоставления результатов модели с экспериментальными данными реального процесса, проводимого на Химико-металлургическом заводе Сибирского химического комбината.

Список литературы

1. Y. Arai, Y. Suzuki, T. Sasayama, T. Ohmichi. Fabrication of uranium-plutonium mixed nitride fuel pins for irradiation tests in JMTR // Journal of nuclear science and Technology. Volume 30, Issue 8, 1993. P. 824-830.
2. Leunberger H. The compressibility and compactibility of powder systems. Int. J. Pharm., 12, 1982. P. 41-55.

05.13.18

С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, Р.В. Бульбович

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, kslperm91@gmail.com, modorsky@pstu.ru, dekan_akf@pstu.ru

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА В ЗАМКНУТОЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Для экспериментального изучения аэродинамических процессов, протекающих при обтекании тел потоком газа, поиска оптимальных конструкций летательных аппаратов и верификации расчетных моделей, широко используются испытания в аэродинамических трубах. Климатических аэродинамических труб (КАДТ) в нашей стране недостаточно, при этом можно отметить большой объем зарубежных исследований с использованием КАДТ. В данной работе предпринята попытка разработки методики проектирования малогабаритной КАДТ замкнутого цикла, не требующей больших финансовых затрат при эксплуатации. При этом предполагается использование высокопроизводительного вычислительного комплекса Пермского национального исследовательского политехнического университета (ВВК ПНИПУ) для верификации численных моделей процессов КАДТ и масштабирования их для реальных конструкций. В данной статье рассмотрен первый этап работы – моделирование газодинамического потока в замкнутой КАДТ переменного сечения с учетом влияния спрямляющих решеток на газодинамические характеристики потока.

Ключевые слова: малогабаритная аэродинамическая труба, численное моделирование, газодинамический поток, спрямляющие решетки, ANSYS CFX.

Для обеспечения проведения научных исследований в Пермском национальном исследовательском политехническом университете предполагается разработка и создание энергоэффективной малогабаритной климатической аэродинамической трубы (ЭМКАДТ) замкнутого цикла, которая обеспечит возможность проведения аэродинамического эксперимента с имитацией полетных условий обледенения при числах Маха набегающего потока до $M=0,8$ и температурах торможения до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отличительной особенностью данной установки будет высокая экономическая эффективность, что обеспечит возможность проведения испытаний в условиях обледенения с меньшими затратами, чем на существующих крупногабаритных установках. Экономия достигается за счет того, что на рабочем режиме энергия в замкнутой трубе расходуется только на поддержание заданного уровня параметров воздушного потока, а так же за счет уменьшения характерных размеров ЭМКАДТ.

При создании аэродинамической трубы замкнутого цикла необходимо выдержать целый комплекс требований: минимизацию завихрений потока в трубе, толщины пограничного слоя в рабочей зоне, шума, энергоемкости испытаний, габаритов конструкции, влияния датчиков на структуру потока, взаимовлияния элементов аэродинамической трубы и модели. При этом необходимо обеспечить требуемые значения скорости и давления потока в некотором диапазоне температур, влажности; достаточные габариты рабочей зоны, равномерность потока в поперечных сечениях рабочей зоны, синхронизацию и быстроедействие системы измерения и регистрации характеристик потока в трубе, визуализацию процессов в режиме реального времени. Причем, наборы этих факторов могут быть различны и зависеть от режимов работы, а также целей моделирования различных аэродинамических процессов в трубе.

Важную роль в обеспечении равномерности потока в трубе, что, в конечном счете, влияет на возможность реализации и воспроизводимости эксперимента, играют спрямляющие решетки.

В данной статье сделана попытка, в ходе вычислительного эксперимента, численно обосновать выбор конструктивной реализации этого узла.

Сформулирована следующая физическая модель: поперечное сечение аэродинамической трубы цилиндрическое, рассматривается течение идеального газа, стенки адиабатические. Расчет ведется в трехмерной постановке[1]. Для минимизации завихрений используются спрямляющие решетки. Количество решеток варьируется. Ниже представлена общая эскизная схема ЭМКАДТ замкнутого цикла (рис. 1):



Рис. 1. Эскизная схема ЭМКАДТ замкнутого цикла

Для численного проектирования конструкции спрямляющих решеток ЭМКАДТ замкнутого цикла использовался метод конечных объемов, при котором поле течения газодинамического потока аппроксимируется конечным числом расчетных точек. Математическая модель базируется на использовании системы уравнений Навье-Стокса. Применяется $k - \varepsilon$ модель турбулентности.

Расчеты производились в системе инженерного анализа ANSYS CFX. Расчетная модель представляет собой внутренний объем ЭМКАДТ замкнутого цикла. Для моделирования спрямляющих решеток используется разделение набегающего потока поверхностями нулевой толщины, совпадающими с профилем решеток. Работа компрессора моделируется массовым расходом. Граничные условия задаются температурой на выходе компрессора и условием свободного течения потока «Opening» на его входе.

Для оценки сходимости были реализованы несколько вариантов сеточных моделей с тетраэдрическими и гексаэдральными конечными элементами[2]. Максимальное количество конечных элементов составило более 7 млн. Сеточная модель, выполненная протяжкой из кубических конечных элементов (рис. 2) показала лучшую сходимость.

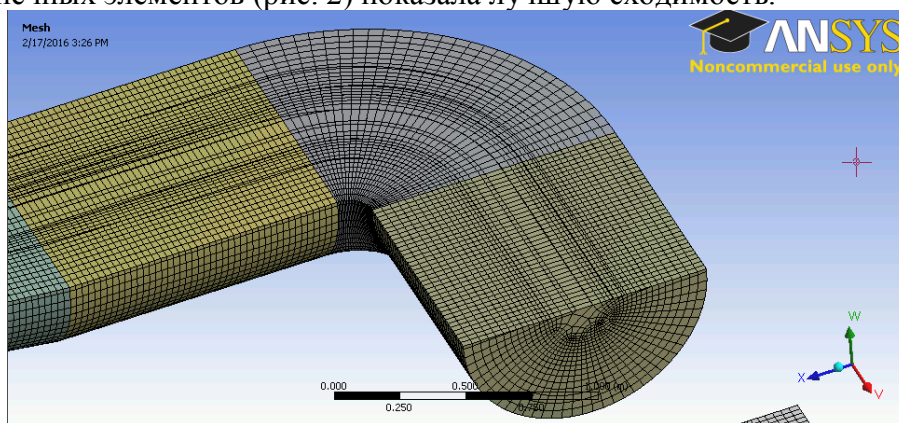


Рис. 2. Сеточная модель участка на выходе с компрессора ЭМКАДТ замкнутого цикла (продольное сечение)

При расчетах критерии невязки опускаются ниже $1,0 \times 10^{-5}$ уже на 300-й итерации. Показатели качества сетки в ANSYS CFX: orthogonality angle, aspect ratio, expansion factor — также более оптимальны на кубических элементах.

Все расчеты проводились на ВБК ПНИПУ (пиковая производительность 24 TFlops)[3]. Для выполнения одного расчета в среднем потребовалось 8 часов машинного времени. Было проведено 32 расчета, не считая отладочных.

Проведен анализ влияния количества спрямляющих решеток на структуру потока в ЭМКАДТ замкнутого цикла. На рис. 3 изображены линии тока в продольном сечении аэродинамической трубы без установки спрямляющих решеток. Отчетливо видно обратное движение газодинамического потока на участке после выхода из рабочей зоны, что приводит к неравномерности потока на входе в компрессор.

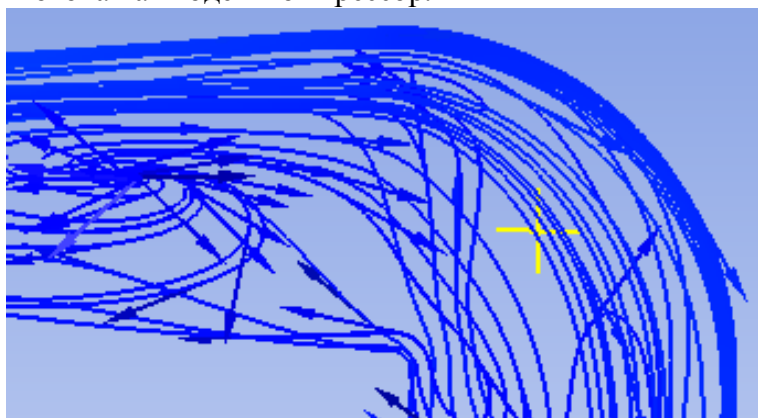


Рис. 3. Линии тока в продольном сечении ЭМКАДТ замкнутого цикла без установки спрямляющих решеток

Проведена серия расчетов с различным количеством спрямляющих решеток (от 1 до 10), эквидистантно расположенных в зонах поворота потока. При изменении их количества от 1 до 4 качественного изменения потока не наблюдается. В случае моделирования ЭМКАДТ замкнутого цикла с большим количеством решеток происходит существенное выравнивание газодинамического потока.

На рис. 4 изображены линии тока в продольном сечении аэродинамической трубы с установленными 8 спрямляющими решетками. При таком количестве спрямляющих решеток после рабочей зоны практически отсутствуют зоны турбулентности, что позволяет получить более равномерный поток на вход компрессора.

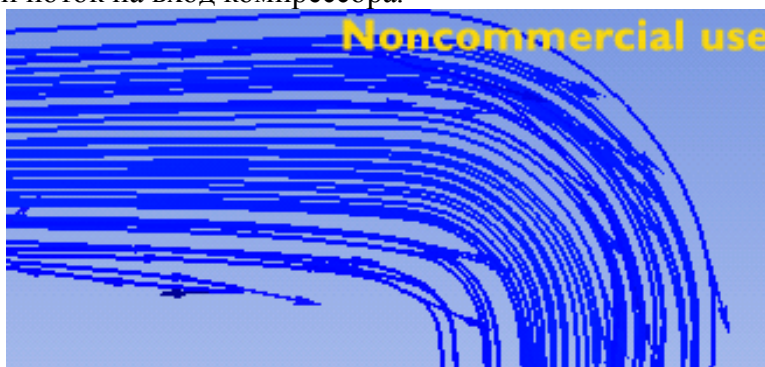


Рис. 4. Линии тока в продольном сечении ЭМКАДТ замкнутого цикла с установленными 8 спрямляющими решетками

Обнаружено, что при установке спрямляющих решеток в поворотных зонах на некоторых прямых участках ЭМКАДТ сохраняется неравномерность потока. Для обеспечения равномерности могут быть использованы специальные спрямляющие сетки на прямых участках ЭМКАДТ.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны физическая, математическая, твердотельная расчетная и сеточная модели ЭМКАДТ.

3. Выявлено, что установка 8-10 спрямляющих решеток на поворотных участках ЭМКАДТ позволяет получить более равномерный газодинамический поток, чем установка 4-8 решеток. Если их количество составляет от 1 до 4, то существенного влияния на поток установка спрямляющих решеток не оказывает.

4. Выявлено снижение полного давления на 0,03 МПа после прохождения газодинамическим потоком рабочей части.

5. Необходимо провести дополнительные расчеты по исследованию влияния специальных спрямляющих сеток на структуру потока на прямых участках ЭМКАДТ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект №14-19-00877)

Список литературы

1. Петров В.Ю., Модорский В.Я., Поник А.Н., Козлова А.В. Инженерная методика определения настроек газохода переменного сечения для отвода и охлаждения горячих газов энергетических установок. Журнал Научно-технический вестник Поволжья. №2 2012г. – Казань.: Журнал Научно-технический вестник Поволжья, 2012. – С. 216-219.
2. Gaynutdinova D.F., Modorsky V.Ya., Masich G.F. Infrastructure of data distributed processing in high-speed process research based on hydroelasticity tasks. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 57, No. 2, pp. 556-563.
3. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya., Petrov V.Yu. Numeric simulation of the interaction between subsonic. *CEUR Workshop Proceedings*, 2015, Vol. 1490, pp. 211-218.

05.13.01

В.С. Каримов, В.Б. Рождественская

Казанский (приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт (филиал), кафедра системного анализа и информатики,
Набережные Челны, kvs-chelny@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА И АНАЛИЗА ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

Был разработан интеллектуальный алгоритм поиска и анализа тестовой информации в сети интернет. Алгоритм был реализован в виде программного комплекса на языках программирования C++, C# и php на основе анализа текстовой информации с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. Ранжирование тестовой информации для выдачи её пользователю проводилось с помощью методов VSM и BM25F.

Ключевые слова: *интеллектуальный алгоритм, поиск и анализ информации, карты Кохонена, методы ранжирования VSM и BM25F.*

Количество данных в сети Интернет с каждым годом увеличивается на сотни терабайт. В результате количество полезной для пользователя информации растёт, но вероятность её нахождения уменьшается, таким образом, делая информационные ресурсы (ИР) менее доступными.

Из-за возрастания количества ИР ужесточаются критерии поиска, так что поисковые системы индексируют далеко не все страницы сайтов, а в результатах поисковой выдачи показывают не все имеющиеся ресурсы.

Пользователь сети Интернет хочет найти нужную ему информацию как можно скорее, не просматривая десятки ссылок и не натываясь на всякого рода рекламу. Поэтому необходимо, чтобы подходящие ресурсы можно было найти уже в первых строках поисковой выдачи.

Практически все алгоритмы работы поисковых систем являются коммерческой тайной компаний, и нет возможности каким-либо образом улучшить эти алгоритмы со стороны, в то время как в начале выдачи на поисковый запрос появляются ссылки на совершенно бесполезные с точки зрения пользователя ИР.

В данной работе представлен результат разработки интеллектуального алгоритма поиска и анализа текстовой информации в сети интернет в виде программного комплекса. Реализованный алгоритм поиска состоит из следующих этапов:

1) Заполнение базы данных текстовыми документами за счёт сбора информации реализованным в программном комплексе поисковым роботом (специализированной подпрограммой для сбора информации). Сбор информации происходит двумя способами:

- Предполагается наличие всего одной или пары веб-страниц, с которых начинается поиск всех имеющихся на них ссылок. Просмотрев первоначальные веб-страницы и собрав с них все ссылки, в том числе и на другие сайты, осуществляется переход по ним, и далее процесс повторяется с новыми сайтами.

- Поиск и переход осуществляется только по тем ссылкам, что принадлежат этому сайту, то есть с тем же доменным именем, таким образом, не выходя за рамки определённого набора веб-сайтов.

2) Представление собранных данных в структурированном виде и сохранение их в базе данных (БД).

3) Передача данных из базы модулю кластеризации для определения текстов близких тематик.

4) Возврат документов в ответ на запрос, введённый через интерфейс, в определённом порядке, на основе алгоритмов ранжирования.

Структура программного комплекса представлена на рис. 1.

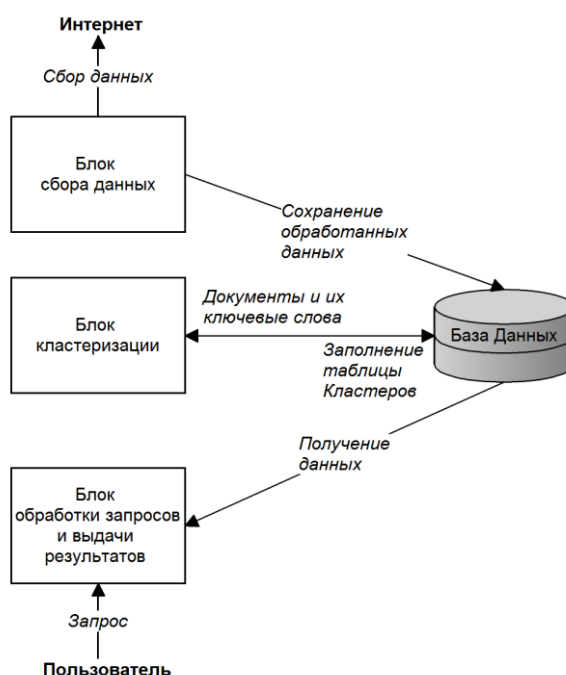


Рис. 1 — Общая схема программного комплекса

Предназначением блока сбора данных (рис. 1) является поиск текстовых документов в сети Интернет, их обработка и сохранение в локальной БД. Поиск текста осуществляется модулем текстового анализатора, который реализует следующие функции:

- Анализ распределения частоты вхождения слов.
- Анализ распределения вероятности появления слов.
- Поиск ключевых слов страницы: поиск осуществляется в некоторых тегах и в самом тексте веб-страницы.

Блок кластеризации реализует процесс разбиения текстового множества, содержащегося в базе данных, на систему схожих подмножеств. В качестве метода кластеризации был использован метод SOM (метод самоорганизующихся карт Кохонена для анализа текстовой информации), который заключается в визуализации данных путём проецирования многомерного пространства данных в двумерное пространство — карту Кохонена. Алгоритм метода в общем виде представлен в [1]. Для повышения точности метода количество получаемых кластеров приравняется количеству отличных друг от друга документов (то есть не содержащих одинаковые или почти одинаковые тексты) из всей коллекции. Разбиение на кластеры уточняется за счет увеличения размерности сетки и увеличения радиуса соседства нейронов.

Блок обработки запросов и выдачи результатов включает в себя реализацию интерфейса пользователя и обработку введенных через интерфейс запросов. Предназначением данного блока является вывод на экран документов, соответствующих запросу, в ранжированном порядке согласно методам VSM или BM25F [2]. Поиск документов, релевантных запросу, осуществляется по ключевым словам документов. Алгоритм работы блока:

- 1) Пользователь пишет запрос в окне интерфейса программного комплекса и нажимает кнопку «Поиск».
- 2) Запрос разбивается на входящие в него слова, и производится их обработка.
- 3) Создается запрос к таблице кластеров из БД, где происходит сравнение отдельных слов из запроса пользователя с ключевыми словами кластеров, и выдаются номера подходящих кластеров.
- 4) По полученным номерам запрашиваются все входящие в эти кластеры элементы из таблицы документов и их ключевые слова.
- 7) В цикле для каждого выведенного документа вычисляется значение функции ранжирования (ранга).

8) При наличии слов запроса в полях заголовка или описания документа производится увеличение его ранга.

9) Массив результирующих документов сортируется в порядке убывания вычисленных рангов и в этом порядке выводится на экран в браузер в виде ссылок.

Тестирование работы программного комплекса проводилось на портативном компьютере с четырёхъядерным процессором Intel Core i5-2410M 2,3 ГГц, оперативной памятью 4 Гб. Были выявлены следующие особенности работы алгоритма:

1) Время работы блока включает в себя время построения образов документов, построение карты в виде матрицы расстояний, построение графического отображения карты и сохранения результатов кластеризации в базе данных.

2) Время работы значительно зависит от параметров алгоритма. В частности, большую часть времени занимает обучение нейронной сети, работа которой сильно зависит от параметра точности обучения.

3) Процесс кластеризации сам по себе достаточно трудоёмкий — производится обработка матриц достаточно больших размерностей, по этой причине время работы сильно зависит от ресурсов компьютера.

Оценка эффективности реализованного алгоритма поиска и анализа информации производилась путём экспертной оценки релевантности вершины выдачи по запросам и сопоставления результатов выдачи разработанной системы и глобальных поисковых систем «Google» и «Yandex» для проиндексированного сайта «systemsauto.ru» (рис. 2).

В качестве тестовых запросов были даны следующие:

1. Система управления. 2. Двигатель внутреннего сгорания. 3. Дизельный двигатель. 4. Неисправности систем. 5. Система курсовой устойчивости.

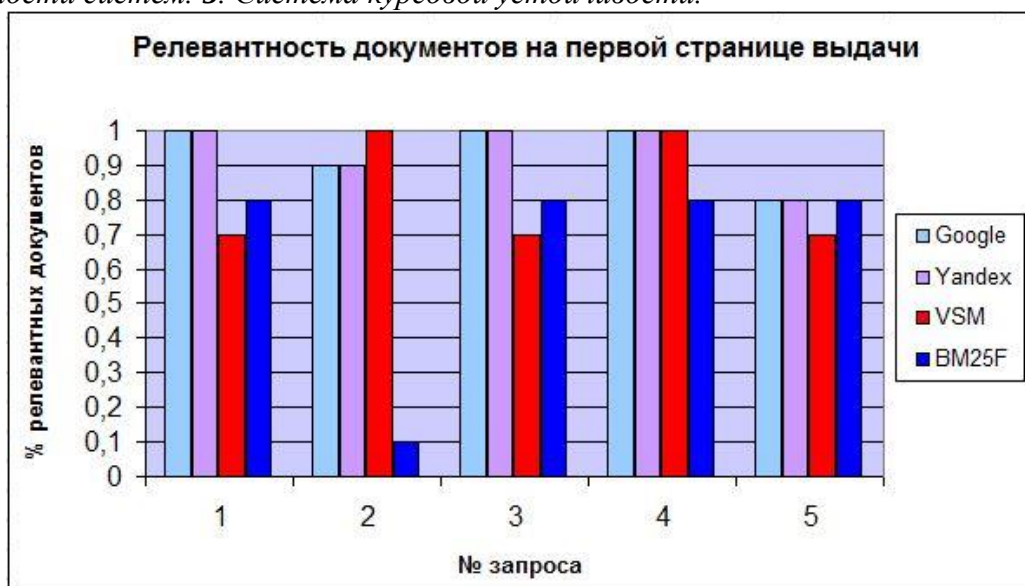


Рис. 2 — Количество релевантных документов на первой странице выдачи

Сравнение показало (рис. 2), что разработанный алгоритм с модулем ранжирования на основе метода VSM в общем случае выдаёт практически такие же релевантные результаты по сравнению с результатами выдачи «Google» и «Yandex».

Необходимо отметить, что общая эффективность работы алгоритма в виде программного комплекса зависит от эффективности работы всех блоков.

Список литературы

1. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика: учеб. пособие / Е. И. Большакова, Э. С. Клышинский, Д. В. Ландэ, А. А. Носков, О. В. Пескова, Е. В. Ягунова. — М.: МИЭМ, 2011. — 272 с.
2. Zhai, C., Laerty, J. A study of smoothing methods for language models applied to information retrieval. ACM Trans. Inf. Syst. . —22(2). —2004. —Pp.179–214.

05.13.06

В.В. Киселев к.т.н., Л.Г. Бабушкина, В.Д. Володин, А.А. Шаронов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, Пермь, ktei@psgu.ru

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННОГО БЛОКА КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ

В статье приводятся результаты разработки программного обеспечения для микропроцессорной системы управления крано-манипуляторной установкой. Рассмотрены подробно два главных участка программы: считывание и усреднение показаний датчиков положения рукояток и формирование управляющих сигналов для гидрораспределителей. Представлены схемы блока сопряжения с датчиком положения управляющей рукоятки, формирователя управляющего напряжения и методика расчета управляющего напряжения.

Ключевые слова: крано-манипуляторная установка, микропроцессорное управление, программное обеспечение, формирование управляющих сигналов.

Применение в коммутационном блоке крано-манипуляторной установки микропроцессорного управления позволяет резко повысить потребительские качества устройства и уровень сервиса. Но, в таком случае, возникает проблема разработки программного обеспечения.

Особенностям построения программного обеспечения коммутационного блока посвящена настоящая статья.

Функции коммутационного блока

Коммутационный блок крано-манипуляторной установки выполняет следующие функции:

- прием информации с рукояток аналогового управления, с пульта, а также тумблеров
- формирование управляющих напряжений для гидрораспределителей стрелы и опор
- отслеживание концевого датчика лебедки и прекращение подъема крюка в случае его срабатывания
- отслеживание дискретного датчика перегрева рабочей жидкости и остановку работы гидрораспределителей в случае его срабатывания
- масштабирование скорости перемещения по команде с пульта дистанционного управления путем уменьшения напряжений, соответствующих крайним положениям лебедки

Программное обеспечение реализует алгоритм управления соответствующий выполняемым функциям и можно выделить два главных участка программы: считывание и усреднение показаний датчиков положения аналоговых рукояток и формирование управляющих сигналов для гидрораспределителей. Данные участки будут рассмотрены далее более подробно.

Считывание показаний датчиков положения рукояток

Пульт дистанционного управления содержит аналоговые органы управления – рукоятки. Это достаточно сложные устройства, содержащие кроме механической составляющей электронные преобразователи с интерфейсом 4..20mA [1]. Аналоговый сигнал с преобразователей поступает на схему приемника, показанную на рис. 1, которая формирует напряжение, подаваемое на вход АЦП управляющего микроконтроллера.

Измерение показаний производится периодически по прерыванию от таймера-счетчика с частотой 8000Гц. По окончании измерения обработчик прерывания АЦП записывает результаты измерения в кольцевой буфер.

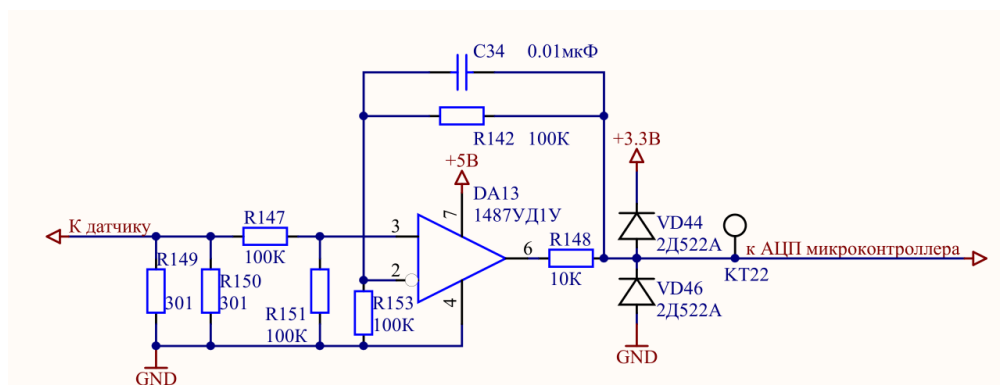


Рис. 1 - Схема сопряжения интерфейса 4..20mA с АЦП управляющего микроконтроллера

Среднее значение показаний АЦП вычисляется по формуле (1)

$$ADC_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=0}^N ADC_i}{N}, \quad (1)$$

где ADC_i - результаты измерения, полученные от АЦП, $ADC_{\text{ср}}$ - усредненное значение, N - количество элементов массива (ширина окна усреднения). В случае соблюдения условия (2), где n - целые положительные числа.

$$N = 2^n, \quad (2)$$

обработчик прерывания реализует только функцию вычисления суммы элементов массива. Нахождение среднего значения осуществляется функцией, вызываемой из главного цикла программы. Усредненные значения передаются функции, формирующей управляющие напряжения для гидрораспределителей.

Формирование управляющих напряжений для гидрораспределителей

Для управления гидрораспределителем используются напряжения в диапазоне 1,5..8,5В [2, 3]. Преобразование производится согласно выражению (3) для функций управления опорами, поворотом и лебедкой и согласно выражению (4) - для остальных функций.

$$U_{\text{out}} = \frac{(U_{\text{out max}} - U_{\text{out min}}) * (ADC - ADC_{\text{min}})}{ADC_{\text{max}} - ADC_{\text{min}}} + U_{\text{out min}}, \quad (3)$$

$$U_{\text{out}} = \frac{(U_{\text{out max}} - U_{\text{out min}}) * (ADC_{\text{max}} - ADC)}{ADC_{\text{max}} - ADC_{\text{min}}} + U_{\text{out min}}, \quad (4)$$

где U_{out} - текущее выходное напряжение, подаваемое на управляющий вход гидрораспределителя, $U_{\text{out min}}$ - выходное напряжение, соответствующее крайнему нижнему положению рукоятки, $U_{\text{out max}}$ - выходное напряжение, соответствующее крайнему верхнему положению рукоятки, ADC - результат, полученный от АЦП после обработки методом скользящего или медианного усреднения, ADC_{min} - результат АЦП, соответствующий крайнему нижнему положению рукоятки, ADC_{max} - результат АЦП, соответствующий крайнему верхнему положению рукоятки.

Определенные погрешности в механической части рукояток предполагают, что датчик при среднем положении рукоятки будет формировать сигнал не точно соответствующий нейтральному положению. Поэтому были заданы «ворота» нейтральных значений (5).

$$\begin{cases} U_{\text{out}} = U_{\text{out ср}}; \\ U_{\text{out}} = \frac{(U_{\text{out max}} - U_{\text{out min}}) * (ADC - ADC_{\text{min}})}{ADC_{\text{max}} - ADC_{\text{min}}} + U_{\text{out min}}, \end{cases} \quad \begin{cases} ADC_{\text{ср min}} < ADC < ADC_{\text{ср max}} \\ \left[\begin{array}{l} ADC < ADC_{\text{ср min}} \\ ADC > ADC_{\text{ср max}} \end{array} \right. \end{cases}, \quad (5)$$

Обозначения большинства переменных аналогичны (3). $ADC_{\text{ср min}}$ - нижняя граница «ворот средней точки», $ADC_{\text{ср max}}$ - верхняя граница «ворот средней точки».

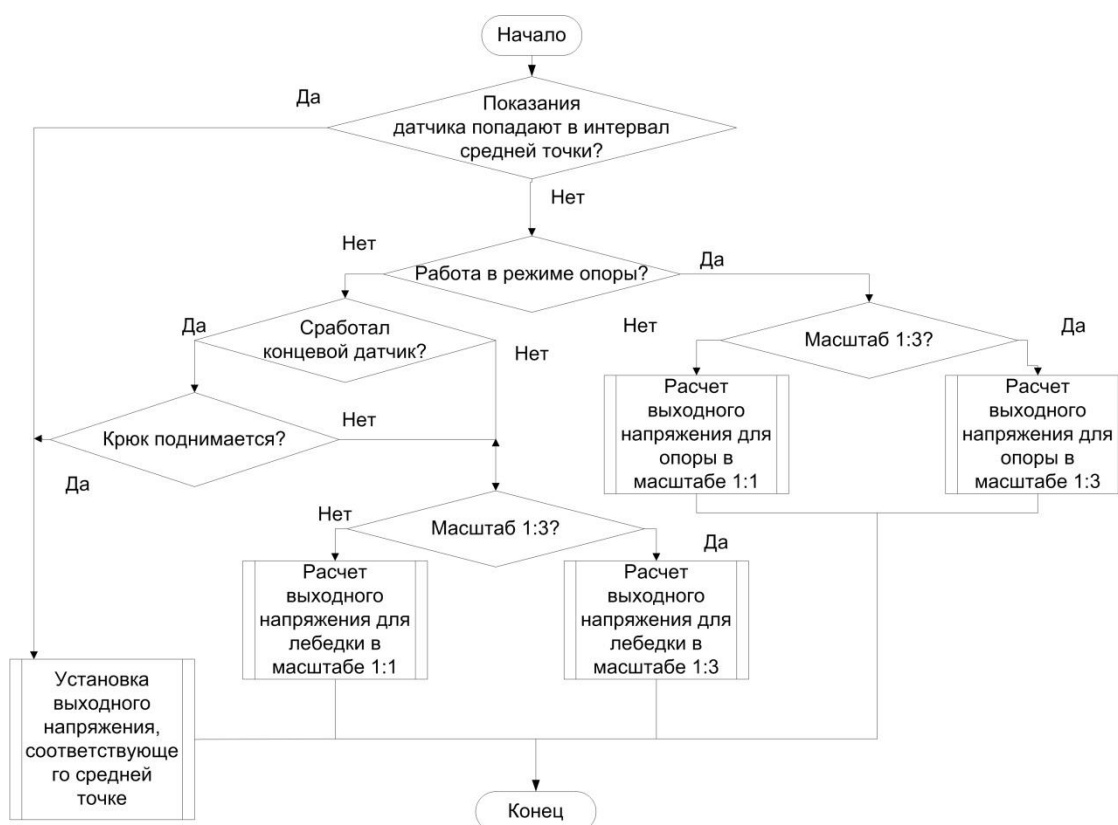


Рис. 2 - Расчет управляющего напряжения для лебедки и правой опоры

Кроме того, обрабатывая команды управления лебедкой, программа должна учитывать срабатывания концевого датчика. В случае срабатывания датчика подъем крюка лебедкой должен блокироваться, например, установкой управляющего напряжения, соответствующего нейтральному положению. При этом ограничения, связанные со срабатыванием концевого датчика не должны оказывать никакого влияния при работе с правой опорой (для управления лебедкой и правой опорой используется одна и та же рукоятка, режим работы которой задается отдельным тумблером на пульте). Работу программы с лебедкой в таком режиме демонстрирует блок-схема алгоритма на рис. 2.

Результат расчета подается на формирователь управляющего напряжения для гидрораспределителя, роль которого играет узел на основе цифрового потенциометра и выходного усилителя, описанный в [4].

Реализующая представленный выше математический аппарат программа была испытана на реальном блоке управления крано-манипуляторной установкой и показала хорошие результаты. Удалось избежать подергивания рычагов, добиться соответствия требуемым показателям скорости, а также увеличить уровень сервиса по сравнению с прототипом, выполненным на дискретных элементах.

Список литературы

1. Индуктивный преобразователь перемещения ISAN E8A-32P-15-P. <http://teko-com.ru/teko/device/10166> (электронный документ, дата обращения 16.03.2016)
2. Load sensing control block in mono block / sandwich plate design M4-12. http://dc-america.resource.bosch.com/media/us/products_13/product_groups_1/mobile_hydraulics_4/pdfs_6/re64276.pdf (Электронный ресурс. Дата обращения 25.01.2016)
3. Electronic Pilot Module EPM2. https://md.boschrexroth.com/modules/BRMV2PDFDownload-internet.dll/re64815_2007-09.pdf?db=brmv2&lvid=118002&mvid=12049&clid=20&sid=79F63B845001164B4769787BD0C62BF1.borex-tc2&sch=M&id=12049,20,118002 (Электронный ресурс. Дата обращения 14.04.2016)
4. Шаронов А.А., Володин В.Д. Сопряжение микроконтроллера 1986BE91Т с цифровыми потенциометрами серии 1315ПТ / Современная электроника №5 2016 С. 46-49.

05.13.01

Э.Ю. Курчатов¹, Д.Е. Чикрин² к.т.н., П.А. Кокунин³ к.т.н., Д.В. Бережной⁴ к.ф.-м.н.,
И.Г. Галиуллин⁵, А.Н. Степанов⁶, Н.В. Харченко⁷

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Казань, ¹kurchatove@mail.ru, ²dmitry.kfu@gmail.com, ³pkokunin@mail.com,
⁴berezhnoi.dmitri@mail.ru, ⁵isgaliullin@gmail.com, ⁶pk-kzsol@gmail.com, ⁷nitsov@yandex.ru

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В СУПЕРМАХОВИКАХ

В работе получено точное решение задачи вращения супермаховика, изготовленного путем насадки семейства концентрических цилиндров друг на друга с постоянным натягом. Отмечено увеличение удельной энергоемкости супермаховика при уменьшении относительного радиуса внутреннего отверстия в маховике и при увеличении коэффициента Пуассона материала супермаховика.

Ключевые слова: маховик, удельная энергоемкость, кинетическая энергия.

Введение

Разработка и создание новых видов материалов позволяет проектировать накопители энергии, работающие на совершенно новых принципах. К ним можно отнести и, так называемые, кинетические накопители энергии, в которых энергия сохраняется в виде кинетической энергии вращения [1, 2]. Характерной особенностью таких накопителей энергии является очень высокая скорость вращения роторной части накопителя (маховика), которая ограничивается в большей степени его прочностными качествами. В связи с этим при проектировании динамических накопителей энергии предпочтение отдается маховикам, выполненным путем намотки лент или слоев (так называемым супермаховикам). Одним из вариантов изготовления супермаховика является насадка системы концентрических маховиков друг на друга с натягом с последующим их склеиванием или свариванием. Расчет на прочность подобных конструкций чаще всего производится численно и сопряжен с некоторыми трудностями, но иногда при введении ряда упрощений удается получить точные решения [3-5]. В работе приводится расчет напряжений в супермаховике, изготовленного путем насадки семейства концентрических тонкостенных цилиндров друг на друга с постоянным натягом. Исследовано влияние относительного радиуса внутреннего отверстия в маховике и коэффициента Пуассона материала на удельную энергоемкость супермаховика.

Постановка задачи и решение

Рассмотрим задачу об определении напряжений во вращающемся с постоянной угловой скоростью ω однородном диске плотностью ρ , модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ [6]. Для диска с внешним радиусом r_1 и центральным отверстием радиуса r_0 выражения для напряжений примут вид

$$\sigma_{rr}(r) = \frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 r_1^2 \left(1 + k^2 (1 - r_1^2 r^{-2}) - r^2 r_1^{-2} \right),$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}(r) = \frac{3+\mu}{8} \rho \omega^2 r_1^2 \left(1 + k^2 (1 + r_1^2 r^{-2}) - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2 r_1^{-2} \right),$$

где $k = r_0/r_1$.

Ленточный супермаховик с допустимой степенью точности можно представить в виде системы n концентрических цилиндров, одетых друг на друга с некоторым натягом. В этом случае еще до начала нагружения в супермаховике возникнет некоторое напряженно-деформированное состояние, которое можно определить путем расчета так называемых составных цилиндров [7]. При расчете составного цилиндра (для определенности состоящего из двух цилиндров) основным является установление величины давления p_c на поверхности

их контакта при заданном натяге δ , представляющем собой разность между наружным диаметром внутреннего цилиндра и внутренним диаметром наружного цилиндра (рис.1).

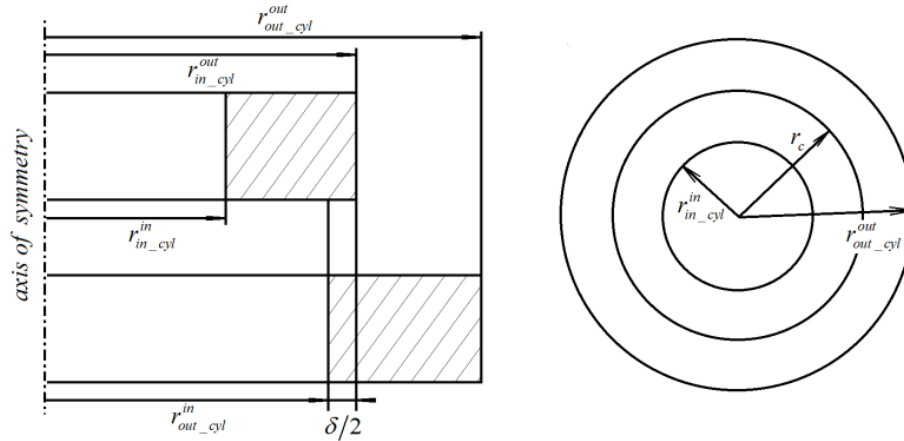


Рис. 1 - Схема концентрической насадки двух цилиндров

Формулы для определения радиальных перемещений и окружных и радиальных напряжений в цилиндре с внутренним r_1 и внешним r_2 радиусом, находящегося под внутренним p_1 и внешним p_2 давлением, в случае плоского напряженного состояния имеют вид

$$u_r = \frac{p_1 r_1^2 \left[(1-\mu)r + (1+\mu)r_2^2 r^{-1} \right]}{E(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{p_2 r_2^2 \left[(1-\mu)r + (1+\mu)r_1^2 r^{-1} \right]}{E(r_2^2 - r_1^2)},$$

$$\sigma_{rr} = \frac{p_1 r_1^2 (1 - r_2^2 r^{-2})}{(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{p_2 r_2^2 (1 - r_1^2 r^{-2})}{(r_2^2 - r_1^2)}, \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \frac{p_1 r_1^2 (1 + r_2^2 r^{-2})}{(r_2^2 - r_1^2)} - \frac{p_2 r_2^2 (1 + r_1^2 r^{-2})}{(r_2^2 - r_1^2)},$$

где E и μ - модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала.

Тогда радиальное перемещение контактной поверхности внутреннего цилиндра определяется по формуле

$$u_r^{in}(r_c) = - \frac{p_c r_c^2 \left[(1-\mu)r_c + (1+\mu)(r_{n_cyl}^{in})^2 r_c^{-1} \right]}{E(r_c^2 - (r_{n_cyl}^{in})^2)},$$

а радиальное перемещение контактной поверхности внутреннего цилиндра определяется по формуле

$$u_r^{out}(r_c) = \frac{p_c r_c^2 \left[(1-\mu)r_c + (1+\mu)(r_{n_cyl}^{out})^2 r_c^{-1} \right]}{E((r_{n_cyl}^{out})^2 - r_c^2)}.$$

Если внутренний и внешний цилиндры выполнены из одного материала, то связь между контактным давлением и натягом получается в виде

$$p_c = \frac{\delta E}{2r_c} \frac{\left(1 - (r_{in_cyl}^{in}/r_c)^2 \right) \left(1 - (r_c/r_{out_cyl}^{out})^2 \right)}{\left(1 + (r_{in_cyl}^{in}/r_c)^2 \right) \left(1 - (r_c/r_{out_cyl}^{out})^2 \right) + \left(1 - (r_{in_cyl}^{in}/r_c)^2 \right) \left(1 + (r_c/r_{out_cyl}^{out})^2 \right)}.$$

Тогда для n -го цилиндра в случае постоянного натяга δ окружные напряжения будут определяться по формулам

$$\sigma_{\varphi\varphi}^n = \frac{\delta E}{2} \frac{(r_{n-1}^2 - r_0^2) r_{n-1}}{(r_{n-1}^2 + r_0^2)(r_n^2 - r_{n-1}^2) + (r_{n-1}^2 - r_0^2)(r_n^2 + r_{n-1}^2)} \frac{r^2 + r_n^2}{r^2} -$$

$$-\frac{\delta E}{2} \sum_{i=n}^{N-1} \frac{(r_{i+1}^2 - r_i^2) r_i}{(r_i^2 + r_0^2)(r_{i+1}^2 - r_i^2) + (r_i^2 - r_0^2)(r_{i+1}^2 + r_i^2)} \frac{r^2 + r_0^2}{r^2}.$$

Результаты решения

Была проведена серия расчетов для супермаховика со следующими геометрическими и механическими характеристиками: модуль Юнга $E = 200000 \text{ МПа}$, наружный радиус $r_1 = 2 \text{ м}$, временное сопротивление $\sigma_{\text{вр}} = 1100 \text{ МПа}$, плотность материала $\rho = 7860 \text{ кг/м}^3$. Коэффициент Пуассона μ , внутренний радиус r_0 и число слоев N варьировалось.

На рисунках 2 и 3 приведены эпюры окружных напряжений в сплошном маховике ($N = 1$) и супермаховике (до и после его раскрутки) для $r_0 = 1 \text{ м}$ и $\mu = 0.3$ для соответствующей каждому варианту угловой скорости вращения для $N = 10$ и $N = 100$ соответственно для случая одинакового натяга (натяг подбирался в каждом случае отдельно).

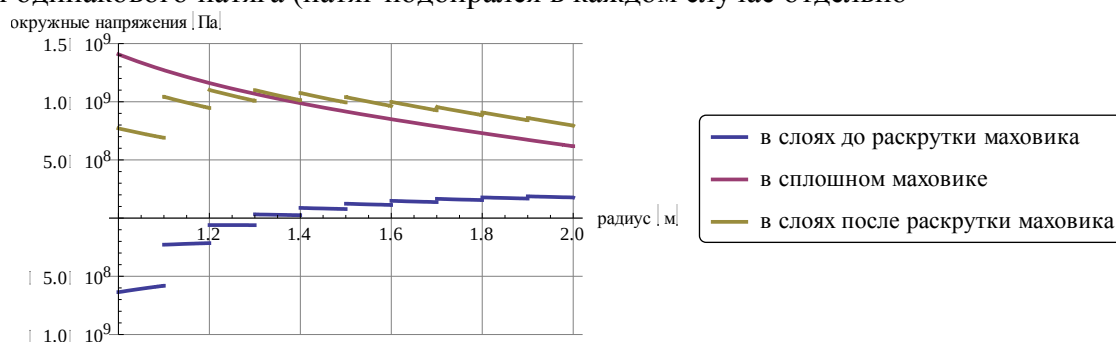


Рис. 2 - Окружные напряжения в цилиндрах супермаховика до и после его раскрутки для $N = 10$

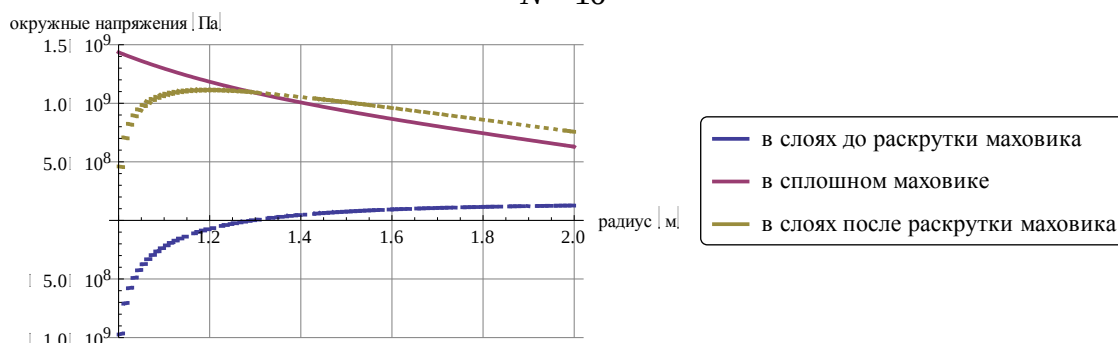


Рис. 3 - Окружные напряжения в цилиндрах супермаховика до и после его раскрутки для $N = 100$

Анализ результатов и выводы

Анализ результатов показывает, что изготовление супермаховиков с помощью концентрической насадки друг на друга с натягом тонкостенных цилиндров (при их дальнейшей склейке или сваривании) при соответствующем выборе натяга может приводить к увеличению удельной энергоемкости конструкции супермаховика. Относительное уменьшение радиуса внутреннего отверстия супермаховика, увеличение числа слоев (насаженных друг на друга тонкостенных цилиндров) и увеличение коэффициента Пуассона материала, из которого изготовлен супермаховик, также приводит к увеличению удельной энергоемкости. Получены точные решения распределения напряжений в слоях супермаховика.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научных проектов № 16-38-00690, № 15-41-02555 и № 15-01-05686.

Список литературы

1. Гулиа Н.В. Маховичные двигатели. М.: Машиностроение, 1976. 163с.
2. Гулиа Н.В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152с.
3. Bereznoi D.V., Chickrin D.E., Galimov A.F. On specific energy capacity of flywheel energy storage // Applied Mathematical Sciences, 8 (2014), № 124, P.6181-6190.
4. Bereznoi D.V., Chickrin D.E., Kurchatov E.Yu., Galimov A.F. Estimation of specific energy capacity of flywheel-housing system in potential field // Applied Mathematical Sciences, 8 (2014), № 163, P.8125-8135.
5. Bereznoi D.V., Chickrin D.E., Gajnulina L.R., Kurchatov E.Yu., Kokunin P.A., Sozutov I.G., Shigapov M.I. Calculation of strain-stress state of flywheel in potential field // Contemporary Engineering Sciences, 8 (2015), № 36, P.1703-1712.
6. Писаренко Г.В., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. Киев: Наукова думка, 1988. 736с.
7. Работнов Ю.Н. Сопротивление материалов. М.:Физматгиз, 1962. 456с.

05.13.01

Э.Ю. Курчатов¹, Д.Е. Чикрин² к.т.н., П.А. Кокунин³ к.т.н., Д.В. Бережной⁴ к.ф.-м.н.,
И.Г. Галиуллин⁵, А.Н. Степанов⁶, Н.В. Харченко⁷

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Казань, ¹kurchatove@mail.ru, ²dmitry.kfu@gmail.com, ³pkokunin@mail.com,
⁴berezhnoi.dmitri@mail.ru, ⁵isgaliullin@gmail.com, ⁶pk-kzsol@gmail.com, ⁷nitasov@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК ДЛЯ СИСТЕМ С ВЫСОКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К КАЧЕСТВУ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

В работе рассматривается способ повышения эффективности энергоустановок для систем с высокими требованиями к качеству энергоснабжения, таких как телекоммуникационные сети, узлы связи и центры обработки данных. Увеличение эффективности энергоустановок обеспечивается за счет использования взаимодействия в системе маховик-кожух посредством потенциального поля постоянных магнитов. Приведены схемы конструкции, математическая модель и результаты математического моделирования.

Ключевые слова: *моделирование, эффективное функционирование, эксплуатация сетей, сложные системы, система маховик-кожух, удельная энергоемкость, кинетическая энергия, повышение эффективности технических систем, оценка эффективности сложных систем.*

Введение

При создании систем бесперебойного или гарантированного электроснабжения, требуется учитывать множество факторов определяемых спецификой нагрузки. Одним из наиболее важных компонентов системы бесперебойного электроснабжения центров обработки данных и телекоммуникационных сетей является источник бесперебойного питания (ИБП). К ИБП предъявляются особые требования. Зачастую ИБП является средством, обеспечивающим требуемое качество электроэнергии, работая в режиме двойного преобразования, в таком режиме при пропадании сети или недопустимых параметрах электросети ИБП должен мгновенно перейти в режим автономного питания нагрузки.

В настоящее время, в связи с созданием новых высокопрочных материалов, растет интерес к Механическим Накопителям Энергии (МНЭ) [1-2].

2. Разработка магнитного ротора и магнитного корпуса с взаимным отталкиванием

Для создания магнитной разгрузки внешних слоев ротора маховика необходимо применять магнитный материал, позволяющий создавать силы отталкивания между ротором маховика и прочным корпусом. На рисунке 1 изображен МНЭ в разрезе. МНЭ состоит из вакуумированного корпуса 1, в котором в виде цилиндра, с намоткой из лент магнитопласта, располагается магнит корпуса 2. В центре корпуса 1 расположены упорные осевые подшипники 3. Корпус 1 вакуумируют для уменьшения аэродинамических потерь при вращении маховика. Внутри корпуса 1 установлен маховик, состоящий из обечайки 4, выполненной из стального цилиндра, поверх которого лентой из магнитопласта намотан обод маховика 5. Ленту магнитопласта наматывают с намагниченностью, противоположной намагниченности магнита корпуса. Витки ленты обода маховика 5 склеивают между собой. Обечайка 4 может быть монолитной, выполненной из стали или другого ферромагнитного материала. На валу 7, который опирается на осевые упорные подшипники 3, располагают устройство ввода-вывода энергии 6, например мотор-генератор.

Рассматриваемая в работе система является достаточно сложной в связи с чем требуется оценка эффективности данной системы. Для этого был определен метод расчета напряженно-деформированного состояния маховика, в соответствии с которым была проведена оценка эффективности.

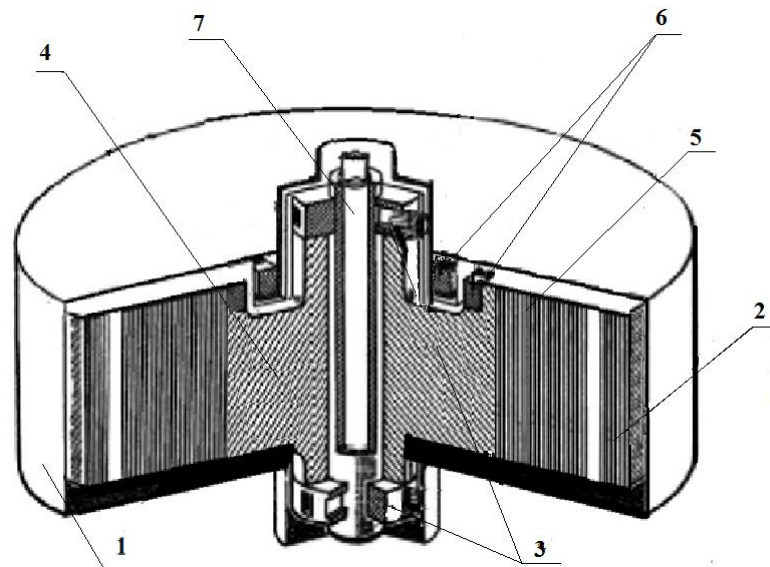


Рис. 1 – Механический накопитель энергии

Постановка и решение задачи

Расчет напряженно-деформированного состояния маховика, приведенного на рисунке 3, будем проводить по следующей схеме [2-4]. Маховик вращается с угловой скоростью ω внутри кожуха, кожух будем считать недеформируемым. Внешний радиус маховика – r_1 , начальная величина зазора между маховиком и кожухом – t_0 , внутренний радиус кожуха r_2 , внешний – r_3 , толщина кожуха b . В силу симметрии напряжения, возникающие в маховике и кожухе, не зависят от угла вращения φ , а зависят только от текущего радиуса r .

На произвольную точку маховика с текущим радиусом r со стороны кожуха действует объемная сила, пропорциональная четвертой степени расстояния от точки кожуха до точки маховика. С некоторой долей допущения эту объемную силу можно определить как

$$\rho_m f = \rho_m \int_{r_2}^{r_3} \frac{3\gamma dy}{(r_2 + y - r)^4} = \rho_m \gamma \left(\frac{1}{(r - r_1 - t_0)^3} - \frac{1}{(b - r - r_1 - t_0)^3} \right).$$

Тогда уравнения равновесия в перемещениях примут вид

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} = -\frac{1 - \mu^2}{E} \rho \omega^2 r - \rho_m \gamma \left(\frac{1}{(r - r_1 - t_0)^3} - \frac{1}{(b - r - r_1 - t_0)^3} \right).$$

Если маховик представлялся в виде сплошного диска, то этом случае статические граничные условия для маховика имеют вид

$$\sigma_{rr}(r_1) = -q.$$

Тогда соотношения для напряжений примут вид

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = & \frac{1}{8}(3 + \mu_m)(r^2 - r_1^2)\rho_m\omega^2 + \frac{\gamma\rho_m b}{2} \left(-\frac{b(\mu_m - 2) + t_0(\mu_m - 3)}{t_0^2(b + t_0)^2} + \frac{b(\mu_m - 2) - t_0(1 - 3\mu_m)}{(r - r_2)^2(b - r + r_2)^2} \right), \\ \sigma_{\varphi\varphi} = & \frac{1}{8}(-(1 + 3\mu_m)r^2 + (3 + \mu_m)r_1^2)\rho_m\omega^2 + \\ & + \frac{\gamma\rho_m b}{2} \left(\frac{b(\mu_m - 2) + t_0(\mu_m - 3)}{t_0^2(b + t_0)^2} + \frac{b(2\mu_m - 1) + (r - r_2)(1 - 3\mu_m)}{(r - r_2)^2(b - r + r_2)^2} \right). \end{aligned}$$

Были проведены расчеты для маховика со следующими геометрическими и механическими характеристиками: $r_1 = 0.1$ м, $E = 2.1 \cdot 10^{11}$ МПа, $\sigma_y = 1.155 \cdot 10^9$ МПа, $\mu = 0.3$, $\rho = 7860$ кг/м³, $\gamma = 1$. В случае отсутствия магнитного поля максимальная угловая скорость вращения маховика определяется из условия $\sigma_{\varphi\varphi}(r_0) = \sigma_y$ и равна в этом случае

$\omega_{\max} = 5968.53$ рад/с. Наличие кожуха позволяет подобрать значение угловой скорости $\omega_{\max}^k$, при котором максимальные по модулю значения окружных и радиальных напряжений достигнут предельного значения σ_y . Величина предельной угловой скорости в этом случае будет равна $\omega_{\max}^k = 8040.58$ рад/с, а размер начального зазора между кожухом и маховиком равен $t_0 = 0.0026497$ м. На рисунках 2 и 3 приведены значения окружных и радиальных и окружных напряжений в маховике без кожуха и с кожухом соответственно.

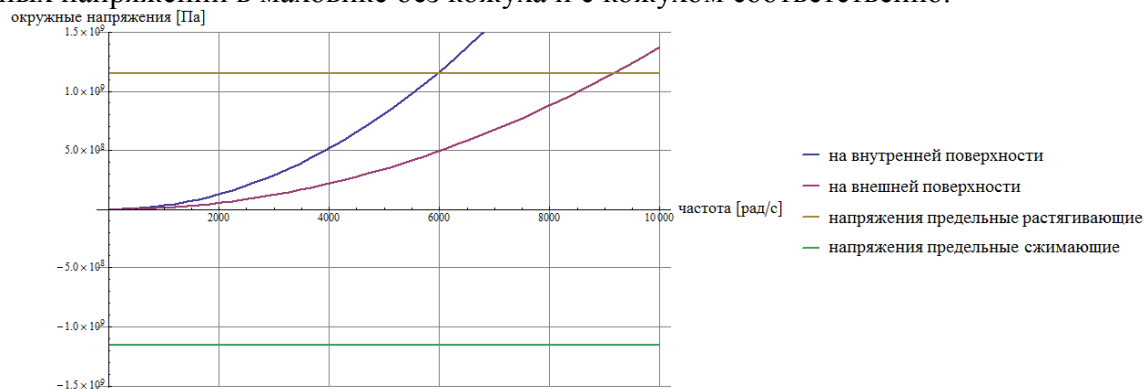


Рис.2 – Напряжения в маховике без кожуха

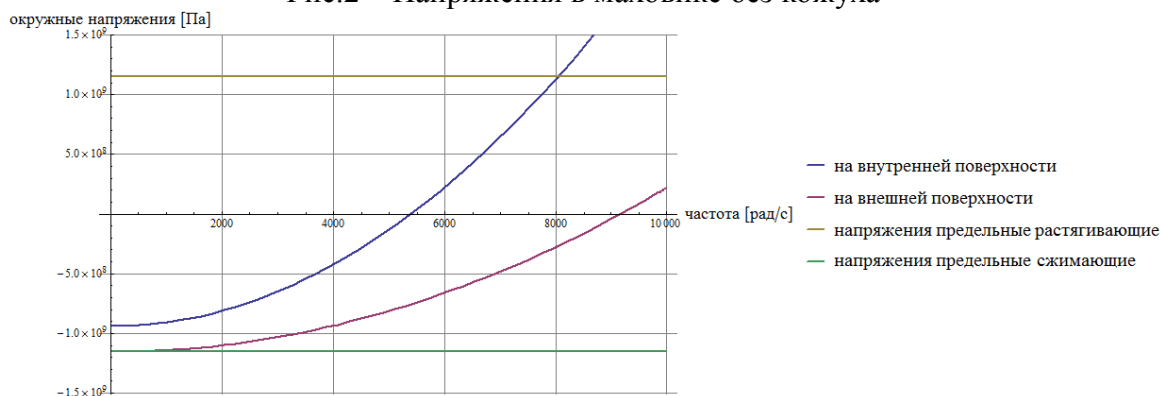


Рис.3 – Напряжения в маховике с кожухом

Анализ результатов и выводы

Проведенные расчеты показывают, что вовлечение в процесс накопления энергии не только маховика, но и корпуса МНЭ, позволяет повысить скорость вращения маховика в 1,4 раза. Таким образом, удельная энергоемкость МНЭ может быть повышена более чем в 2 раза. Полученные результаты показывают, что в дополнение к ранее указанным преимуществам МНЭ по отношению к химическим накопителям энергии существуют дополнительные возможности повышения эффективности МНЭ, что дополнительно подтверждает перспективность создания энергоустановок с применением МНЭ для систем разной сложности и разными требованиями к качеству электроснабжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-38-00690 «Исследование вопросов оптимального построения кинетических накопителей энергии супермаховичного типа с использованием потенциального поля»).

Список литературы

1. Гулия Н.В. Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152с.
2. Berezhnoi D.V., Chickrin D.E., Galimov A.F. On specific energy capacity of flywheel energy storage // Applied Mathematical Sciences, 8 (2014), № 124, P.6181-6190.
3. Berezhnoi D.V., Chickrin D.E., Kurchatov E.Yu., Galimov A.F. Estimation of specific energy capacity of flywheel-housing system in potential field // Applied Mathematical Sciences, 8 (2014), № 163, P.8125-8135.
4. Berezhnoi D.V., Chickrin D.E., Gajnulina L.R., Kurchatov E.Yu., Kokunin P.A., Sozutov I.G., Shigapov M.I. Calculation of strain-stress state of flywheel in potential field // Contemporary Engineering Sciences, 8 (2015), № 36, P.1703-1712.

05.13.18

Т.И. Синельникова, Н.А. Швецова, к.ф.-м.н.

Кубанский государственный университет,
физико-технический факультет, кафедра теоретической физики и компьютерных технологий,
Краснодар, fbogin@mail.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СИСТЕМОЛОГИИ ЭПИСТЕМОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПОРОЖДАЮЩИХ СИСТЕМ

Дан краткий обзор метода поиска оптимальной системы эпистемологического уровня порождающих систем, предназначенного для автоматизации решения системных задач. В статье представлена программная реализация метода, разработанная на основе авторского алгоритма.

Ключевые слова: *системология, автоматизация решения задач, эпистемологический уровень порождающих систем.*

Эмпирическое исследование начинается с определения исходной системы, которое, как правило, сводится к выбору из множества вариантов системы, наилучшим образом соответствующей цели исследования и имеющимся ограничениям. Такой выбор требует осуществления специального исследования, подразумевающего определения наиболее существенных свойств и параметров системы. После выбора исходной системы становится возможным сбор данных – наблюдение, измерение и фиксации свойств при определенных значениях баз. Далее приступают к обработке полученных данных, целью которой является определение параметрически инвариантных свойств переменных, позволяющих экономно представлять данные и при необходимости осуществлять их порождение. Методы системологии предоставляют исследователю междисциплинарные методы, позволяющие выполнить данный этап эмпирического исследования. Они достаточно востребованы [1-4], однако четких алгоритмов Дж. Клир для некоторых методов не предоставляет, к таким методам относятся методы порождающих систем. Таким образом, целью исследования стало изучение методов порождающих систем и разработка вычислительного алгоритма их реализации.

В системологии системы и методы их исследования организованы в иерархию эпистемологических уровней. На каждом из них обработка данных осуществляется соответствующими методами. В данной работе будет рассмотрена реализация методов обработки данных на эпистемологическом уровне порождающих систем.

Для выполнения обработки данных и поиска параметрически инвариантных свойств необходимо разработать соответствующий программный модуль, который будет реализовывать методы системологии и иметь возможность:

- вывода из заданной матрицы данных параметрически инвариантных свойств;
- сравнение выделенных свойств и исключение свойств, не удовлетворяющих критериям пользователя;
- упрощение систем различных типов в соответствии с определенными пользователем критериями.

Порождающие системы (как и системы более высоких эпистемологических уровней) определяются и рассматриваются на языке обобщенных представляющих систем (абстрактных переменных и параметров). В основе порождающих систем лежат системы с поведением. Поведение системы характеризует общие параметрически инвариантные ограничения на переменные обобщенной представляющей системы. Такие ограничения могут быть использованы для порождения состояний переменных при заданном параметрическом множестве. По этой причине, системы, их содержащие называются порождающими системами.

Для обобщенной представляющей системы типы параметрически инвариантных ограничений зависят от свойств заданного параметрического множества. Если свойства для параметрического множества не определены, то состояния переменных могут ограничивать только друг друга. Однако если параметрическое множество упорядочено, то состояния переменных ограничиваются не только другими состояниями, но состояниями выбранного соседства для каждого конкретного значения параметра. В системологии Дж. Клира такое соседство называется *маской*. Определяется маска через переменные, параметрическое множество и набор правил сдвига на параметрическом множестве.

Пусть задана обобщенная представляющая система I . Обозначим через V множество переменных из I , через R – набор правил сдвига для этих переменных. Результатом применения правил сдвига является множество *выборочных переменных*. Тогда множество выборочных переменных $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ может быть введено с помощью уравнений для некоторых переменных $v_i \in V$ и правил сдвига $r_j \in R$:

$$s_{k,w} = v_{i,r_j(w)}, \quad (1)$$

где $s_{k,w}$ – состояние выборочной переменной s_k при значении параметра w ,

$v_{i,r_j(w)}$ – состояние переменной v_i при значении $r_j(w)$, полученном от применения правила сдвига r_j для заданного w .

Так как любое правило сдвига из набора R может быть применено к любой переменной из множества V , то множество всех возможных выборочных переменных представляется декартовым произведением $V \times R$. В действительности выборочные переменные характеризуются отношением (маской):

$$M \subseteq V \times R, \quad (2)$$

так, что всякой паре $(v_i, r_j) \in M$ соответствует одно уравнение (1).

В общем виде *система с поведением* представляет собой тройку элементов:

$$F_B = (I, M, f_B), \quad (3)$$

где I – обобщенная представляющая система;

f_B – функция поведения – совокупность вероятности для каждого состояния системы.

Состояния системы с поведением определяется выборочными переменными, связанными с маской M . Маска имеет смысл, если она удовлетворяет 2-м обязательным условиям:

- маска должна включать хотя бы один элемент из каждой строки;
- если маску перемещают по массиву данных в направлении возрастания/убывания параметра, то в нее должен быть включен хотя бы один элемент из крайнего правого/левого столбца.

Для случая нейтральных систем маска делится на две подмаски: порождающую и порождаемую. Если система направленная, на три подмаски: входная; выходная порождаемая; выходная порождающая.

Далее для перехода от систем данных к системам с поведением вычисляются значения вероятностной функции поведения. Так как *маска должна наилучшим образом представлять набор эмпирических данных*, то выбор производится в пользу масок, которые имеют минимальное значение порождающей нечеткости.

Шенноновская энтропия исходной системы:

$$H(C) = - \sum_{c \in C} f(c) \cdot \log_2 f(c). \quad (4)$$

Для вычисления порождающей нечеткости для нейтральных систем применяется формула:

$$H(G | \bar{G}) = H(C) - H(\bar{G}), \quad (5)$$

где $\bar{G}$ – подсистема, полученная от порождающей подмаски.

Порождающая нечеткость для направленных систем:

$$H(G | E \times \bar{G}) = H(C) - H(E \times \bar{G}), \quad (6)$$

где E – подсистема, полученная от входной подмаски;

$\times$ – декартово произведение.

В случае отсутствия информации о входных переменных, вычисление порождающей нечеткости для направленных систем осуществляется по формуле:

$$H(G | E \times \bar{G}) = \frac{1}{|E|} \left[\sum_{e \in E} H(\bar{E} | e) - \sum_{e \in E} H(\bar{G} | e) \right]. \quad (7)$$

В своей работе [5] Дж. Клир не дает четкого математического алгоритма для генерации и нахождения оптимальных масок, тем самым возможность его реализовать предоставляется самим исследователям и специалистам в области системологии. Для реализации методов порождающих систем авторами в рамках исследований, проводимых в КубГУ, был разработан алгоритм генерации и поиска оптимальных порождающих систем, а так же программный модуль поиска оптимальной порождающей системы.

Программный модуль работает под управлением операционных систем Windows XP/Vista/7/8/8.1/10. На данную разработку получено свидетельство о государственной регистрации №2016660456. С программным модулем можно ознакомиться в Отделе интеллектуальной собственности КубГУ. Поиск оптимальных масок (представителей оптимальных порождающих систем) осуществляется в семи режимах:

- 1) Для нейтральных систем.
- 2) Для направленных систем с информацией о входных переменных.
- 3) Для направленных систем при отсутствии информации о входных переменных.
- 4) Для указанных систем с определенным пользователем уровнем сложности.
- 5) Для указанных систем на всех уровнях сложности.
- 6) Для указанных систем, осуществляя проход маски вниз по матрице данных.
- 7) Для указанных систем, осуществляя проход маски вверх по матрице данных.

Отчет формируется либо по всем сгенерированным программой маскам, либо только по оптимальным маскам с минимальной порождающей нечеткостью.

Обработка данных и поиск оптимальных масок подразумевает выполнение в автоматическом режиме по указанным параметрам генерации масок, отбраковку несодержательных масок, нахождение порождающих и порождаемых подмасок, вычисления порождающих нечеткостей и т.д.

Полученный алгоритм и программа поиска апробированы на данных исследований, проводимых в работе [5] и полностью с ними согласуются.

В настоящее время дополнительно реализована опция порождения данных исходных систем, ведутся исследования возможности ее использования при исследовании и проектировании систем. Так же осуществлена реализация программного модуля поиска оптимальной порождающей системы для функционирования в операционной системе Linux.

Список литературы

1. Семенов Н.А., Дорохов И.Н., Бутенко Л.Н., Цыканова М.А. К построению изобретающей системы на основе системологии // Программные продукты и системы. – 2013. – №3 – С.231-234.
2. Дорохов И.Н., Лебедев А.Г., Калуцков С.А. Компьютерные методы поискового конструирования // Успехи в химии и химической технологии. – 2013. – №1 (141) – С.62-67.
3. Бутенко Л.Н., Шамина Е.Н., Бутенко М.В. Концепция автоматизированной поддержки экспертизы технических решений // Известия ВолгГТУ. – 2008. – №5 – С.64-66.
4. Жарикова И.В., Невлюдова В.В. Системологический подход при исследовании параметров РЭС // Технология приборостроения. – 2014. – №. 2. – С.40-43.
5. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач. – М.: Радио и связь, 1990. – 535с.

05.13.18

Е.В. Спиридонова

Оренбургский государственный университет,
факультет математики и информационных технологий, кафедра прикладной математики,
Оренбург, ekvls@mail.ru

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

В работе проведен качественный анализ численных решений краевых задач теории трещин со смешанными краевыми условиями. Решение задач осуществлялось методом разрывных смещений. Установлены закономерности смещений берегов трещины в продольном и поперечном направлениях, при варьировании значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона в широком диапазоне допустимых значений.

Ключевые слова: *теория трещин, метод разрывных смещений, смешанные краевые условия.*

Введение

В настоящее время известно, что

- любой скальный массив имеет блочно-слоистое строение с пустыми или заполненными грунтом трещинами;

- многие металлы содержат такие дефекты как трещины, полости, поры, различные виды твердых включений.

Все эти ослабления способствуют разрушению материалов и могут привести к необратимым последствиям.

При разрушении горных пород и металлов в основном возникают задачи со смешанными краевыми условиями (СКУ) [1], которые невозможно решить аналитическими методами. Поэтому численное моделирование подобных вопросов, несомненно, является актуальной задачей механики разрушения.

В работе [2] приведены численно-аналитические решения плоских задач теории трещин со смешанными краевыми условиями только для геоматериалов.

Поэтому, **целью** настоящего исследования является проведение качественного анализа численных решений краевых задач теории трещин со смешанными краевыми условиями для широкого диапазона значений модуля Юнга ($10^6 \div 10^{13}$ Па) и коэффициента Пуассона ($0.1 \div 0.49$), с учетом и без учета действия массовых сил.

Постановка задач и метод решения

В работе решение задач осуществляется в условиях, когда трещина представляет из себя математический разрез конечной длины, т.е. полость нулевого объема, ограниченную двумя геометрически совпадающими поверхностями – берегами разреза. Часть берегов трещины находится под действием смещений, а часть под действием напряжений. Поэтому для i -го граничного элемента ($i = \overline{1, J}$)

$$u_s^i = \sum_j B_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_j B_{sn}^{ij} D_n^j, \quad \sigma_s^i = \sum_j A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_j A_{sn}^{ij} D_n^j + \sigma_s^{gi},$$

$$u_n^i = \sum_j B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_j B_{nn}^{ij} D_n^j, \quad \sigma_n^i = \sum_j A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_j A_{nn}^{ij} D_n^j + \sigma_n^{gi}.$$

где $\mathbf{u}_0 = (u_n^0 \quad u_s^0)^T$ - вектор смещений, $\boldsymbol{\sigma}_0 = (\sigma_n^0 \quad \sigma_s^0)^T$ - вектор напряжений, а неизвестные в правых частях имеют смысл граничных коэффициентов влияния. Решение системы позволяет определить раскрытия для каждого граничного элемента.

В качестве метода численного решения задач был выбран метод разрывных смещений [3]. Решение задач проводилось с помощью разработанного автором программного комплекса [4].

Общее представление геометрической модели трещины и постановки граничных условий задает Рис.1.

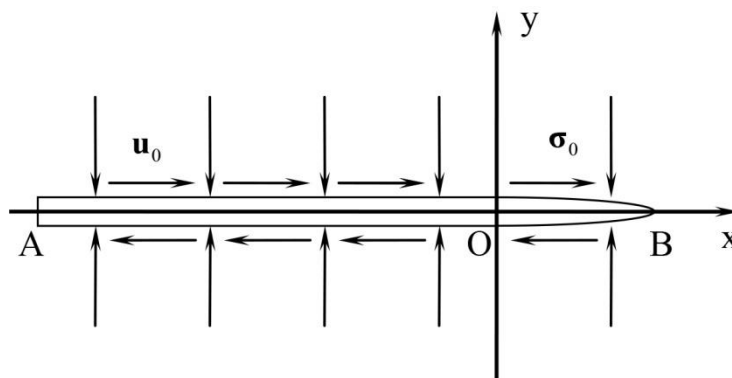


Рис.1 Геометрическая модель трещины смешанного типа

Качественный анализ решений краевых задач теории трещин со смешанными краевыми условиями

Разрывы смещений на берегах трещины

$$D_n(x) = u_n(x, 0_-) - u_n(x, 0_+), \quad D_s(x) = u_s(x, 0_-) - u_s(x, 0_+),$$

- представляют собой непрерывные функции по всей длине трещины. Их аппроксимация является необходимой процедурой верификации решения и в дальнейшем используются для вычисления коэффициентов интенсивности напряжений.

В рамках качественного анализа решений можно выделить ряд параметров, варьирование которых определяет область решений. К ним относятся механические свойства (модуль Юнга, коэффициент Пуассона), длина трещины (общая АВ или ее участков), а также распределение граничных условий на участках АО и ОВ ("смещения-напряжения").

Диапазон изменений модуля Юнга E варьировался от 10^6 до 10^{13} Па, а коэффициента Пуассона ν - от 0.1 до 0.49. Приведенные диапазоны перекрывают подавляющее большинство механических свойств твердых тел, известных в настоящее время.

Следует отметить, что длина участка АО - основной части трещины, - была постоянной и составляла 100 мм при соотношении для зияющей части трещины $ОВ=1/10$ АО.

Ниже представлены таблицы с результатами расчетов значений смещений в срединных точках участков АО и ОВ. В паре значений верхнее относится к участку АО, нижнее к участку ОВ, а также выводы, касающиеся поведения берегов трещины в зависимости от механических свойств и приложенных граничных условий.

Распределение граничных условий - "смещения - напряжения"

(на АО заданы смещения $u_n, u_s = 1$ мкм, на ОВ заданы напряжения $\sigma_n, \sigma_s = 1$ МПа)

Таблица 1 – Нормальные смещения [мкм]

		Модуль Юнга, Па							
Коэффициент Пуассона		10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}
	0.1	-703 19140	-68 1915	-4.84 192	1.50 20.37	2.14 3.15	2.2 1.43	2.21 1.26	2.21 1.24
	0.2	-52 1883	-52 1883	-3.28 189	1.6 20.00	2.087 3.06	2.13 1.37	2.14 1.199	2.14 1.82
	0.3	-34 1815	-34 1815	-1.53 182	1.71 19.25	2.04 2.92	2.07 1.29	2.077 1.127	2.077 1.111
	0.4	-15 1711	-15 1711	0.28 172	1.85 18.12	2.01 2.73	2.02 1.19	2.024 1.039	2.024 1.024
	0.49	0.423 1586	0.423 1586	1.84 159	1.98 16.77	1.99 2.51	2.00 1.079	2.00 0.937	2.00 0.923

Анализ результатов, приведенный в табл. 1 показал, что без учета массовых сил зависимость $D_n = D_n(v)$ является линейной, монотонно возрастает с ростом v в основной части трещины. В зияющей части является нелинейной, близкой к параболе, и монотонно убывает с ростом v .

Таблица 2 – Касательные смещения [мкм]

		Модуль Юнга, Па							
		10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}
Коэффициент Пуассона	0.1	17 2228	17 2228	3.73 223	2.38 22.85	2.24 2.8	2.23 0.798	2.21 1.25	2.23 0.578
	0.2	19 2135	19 2135	3.88 214	2.33 21.98	2.17 2.77	2.15 0.85	2.15 0.66	2.156 0.639
	0.3	18 1994	18 1994	3.73 200	2.25 20.64	2.10 2.7	2.08 0.907	2.088 0.728	2.087 0.71
	0.4	13 1806	13 1806	3.17 181	2.14 18.85	2.04 2.6	2.03 0.975	2.03 0.812	2.023 0.796
	0.49	3.5 1596	3.5 1596	2.15 160	2.01 16.85	2.00 2.49	2.00 1.054	2.00 0.91	2.00 0.896

Из табл.2 следует, что с учетом массовых сил зависимость $D_n = D_n(v)$ является нелинейной, с одним локальным минимумом. Значения смещений убывают на участке до $v=0.3$, а затем возрастают с ростом v как в основной, так в зияющей частях трещины.

Таблица 3 – Нормальные смещения с учетом массовых сил [мкм]

		Модуль Юнга, Па							
		10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}
Коэффициент Пуассона	0.1	-3150 10217	-313 1022	-29.3 103	-0.94 11.45	1.895 2.26	2.795 1.34	2.208 1.25	2.211 1.241
	0.2	-5142 2664	-512 267	-49 27.8	3.00 3.84	1.628 1.44	2.09 1.207	2.14 1.18	2.141 1.18
	0.3	-6162 -1532	-614 -152	-59 -14.25	-4.087 -0.427	1.46 0.955	2.016 1.094	2.071 1.107	2.077 1.109
	0.4	-5100 852	-508 86	-49 9.54	-3.079 1.87	1.514 1.107	1.973 1.03	2.019 1.023	2.024 1.022
	0.49	-774 13379	-75 1338	-5.76 134	1.22 14.3	1.922 2.259	1.99 1.055	1.999 0.934	1.999 0.922

Анализ результатов, приведенный в табл. 3 показал, что зависимость $D_s = D_s(v)$ является нелинейной, с одним локальным максимумом на участке АО при $v=0.2$. Для зияющей части трещины зависимость является квазилинейной: значения касательных смещений уменьшаются с ростом v .

Таблица 4 – Касательные смещения с учетом массовых сил [мкм]

		Модуль Юнга, Па							
		10^6	10^7	10^8	10^9	10^{10}	10^{11}	10^{12}	10^{13}
Коэффициент Пуассона	0.1	-1428 140927	-140 14095	-12 1410	-0.797 141	2.085 14.67	2.214 1.985	2.227 0.717	2.228 0.59
	0.2	-2194 280300	-217 28030	-19 2803	-0.041 281	1.936 28.66	2.134 3.44	2.154 0.917	2.156 0.665
	0.3	-1991 440799	-197 44080	-17.8 4408	0.095 441	1.889 44.79	2.068 5.116	2.086 1.149	2.088 0.752
	0.4	-906 622449	-88 62245	-7.06 6225	1.12 623	1.94 63	2.021 7.019	2.029 1.417	2.03 0.857
	0.49	-1.14 803986	1.67 80399	1.97 8040	1.997 805	2.00 81.3	2.00 8.934	2.00 1.699	2.00 0.975

Из табл.4 следует, что зависимость $D_s = D_s(v)$ является нелинейной, с одним локальным минимумом на участке АО. График функции монотонно убывает до $v=0.2$ и затем увеличивается с ростом v . Для зияющей части трещины зависимость является квазилинейной и возрастает с ростом v .

Таким образом, проведенные исследования установили, что для нормальных и для касательных смещений согласно таблицам 1-4 с увеличением значений модуля Юнга кривые $D_n = D_n(v)$ и $D_s = D_s(v)$ сближаются и при максимальном взятом в расчетах значении $E=10^{13}$ Па совпадают. На участке основной части трещины графики стремятся пересечься при $v=0.5$.

Список литературы

1. Александров В.М., Коваленко Е.В. Задачи механики сплошных сред со смешанными граничными условиями. – М.: Наука, 1986. – 336с.
2. Спиридонова, Е.В. Численно-аналитическое решение плоских задач теории трещин в смешанной постановке // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2015. – №1(23). – С. 39–49.
3. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
4. Спиридонова Е.В., Белобородова С.В. Программный комплекс для численного решения плоских задач теории трещин со смешанными краевыми условиями // Свидетельство о регистрации программного средства № 2015616382 от 09.06.2015.

05.13.00

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Центр высокопроизводительных вычислительных систем,
Пермь, ar.shmakov@pstu.ru, modorsky@pstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЗОРОВ В ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЯХ ПРИ ДЕЙСТВИИ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В FSI ПОСТАНОВКЕ

В данной работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции лабиринтных уплотнений в зоне лабиринтных уплотнений рабочих колес модельного трехступенчатого компрессора газоперекачивающего агрегата. Разработана методика анализа влияния потока перекачиваемого газа на деформации конструкции. Получены результаты оценки напряженно-деформированного состояния конструкций лабиринтных уплотнений в зоне рабочих колес от действия давления, температуры.

Ключевые слова: *напряженно-деформированного состояние, численное моделирование, лабиринтное уплотнение, FSI, газоперекачивающий агрегат.*

Использование лабиринтных уплотнений (ЛУ) ограничивается условиями эксплуатации, например, числом оборотов, величиной действующего давления и температурой. Лабиринтные уплотнения с технической точки зрения очень сложны в изготовлении и монтаже, и поэтому дороги. В качестве уплотнения вала они нашли своё применение в газовых турбинах, например, в реактивных двигателях, газоперекачивающих агрегатах. Для повышения коэффициента полезного действия паровых турбин на электростанциях ЛУ имеют зачастую довольно сложную форму.

Несмотря на широкое применение лабиринтных уплотнений в турбомашинах недостаточно проработаны вопросы их проектирования с учетом быстропротекающих процессов. Данные процессы могут влиять на вибрации в компрессорах ГПА. Для учета нестационарных явлений необходимо использовать fluid structure interaction (FSI) подход [1]. В данной работе используется односторонний FSI расчет, при котором параметры газодинамического потока в проточном тракте компрессора передаются в расчет напряженно-деформированного состояния конструкции ЛУ.

Для проведения исследований была разработана физическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние конструкции лабиринтного уплотнения от действия температуры и давления [2]:

- конструкция полагается трехмерной (x, y, z) в стационарной постановке;
- материал конструкции ротора деформируется упруго;
- учитывается влияние газодинамических на конструкцию ЛУ;
- стенки конструкции поглощают и выделяют тепло.

Для проведения расчета напряженно-деформированного состояния конструкции использовалась система уравнений [3], включающих в себя обобщенный закон Гука, уравнения Коши, уравнения равновесия.

Данную систему уравнений можно записать в следующем виде [3]:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\}$$

где $\{\sigma\}$ – вектор компонент напряжений; $[D]$ – матрица жесткости; $\{\varepsilon^{el}\}$ – вектор деформаций с учетом температуры.

Вектор деформаций включает в себя компоненты деформаций от действия давления и температуры. С учетом этого можно записать в следующем виде:

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon\}^t$$

где $\{\varepsilon\}$ – вектор деформаций; $\{\varepsilon\}^t$ – вектор температурных деформаций.

Была разработана твердотельная модель, воспроизводящая конструкцию лабиринтного уплотнения ГПА. Твердотельная модель для данной задачи была построена в инженерном комплексе ANSYS, в модуле DesignModeler. В силу осесимметричности конструкции достаточно рассматривать сектор (1/36) часть ЛУ. На основе полученной расчетной модели была построена конечно-элементная модель (рис. 1). Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов необходимо применить сетку, ячейки которой имеют форму, близкую к форме гексаэдра. Помимо прочего, при измельчении сетки желательно избегать резких отличий геометрических размеров соседних ячеек их линейные размеры не должны отличаться более, чем в 2 раза.

В качестве аппаратного обеспечения для вычислительных экспериментов использовались ресурсы высокопроизводительного вычислительного комплекса Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ, пиковая производительность которого 24 Тфлопс и объем оперативной памяти 6784 Гбайт.

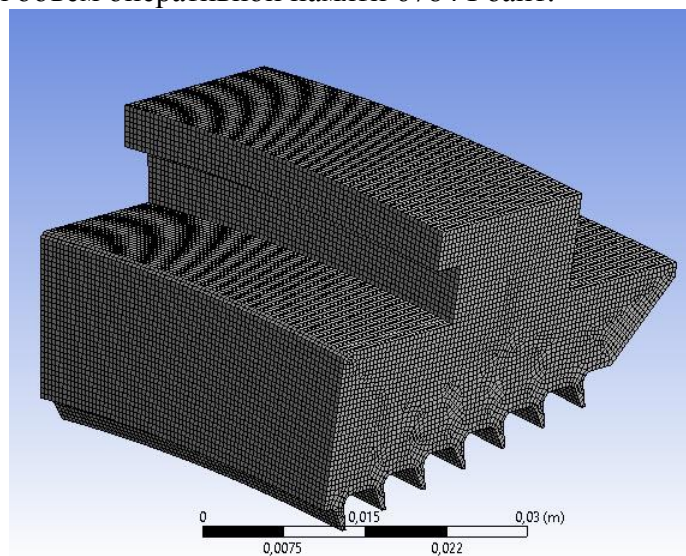


Рисунок 1. Конечно-элементная модель лабиринтного уплотнения (сектор 1/36 часть ЛУ)

В результате численного расчета напряженно-деформированного состояния конструкции лабиринтных уплотнений рабочих модельного трехступенчатого компрессора ГПА были получены поля распределения перемещений, напряжений и деформаций. Во всех случаях зона максимальных перемещений располагается в области выходной кромки ЛУ (рис. 2). Зона минимальных перемещений располагается в зоне, наиболее удаленной от проточной части ЛУ. Отметим, что лабиринтное уплотнение в зоне рабочего колеса первой ступени сжимается, а лабиринтные уплотнения в зоне рабочих колес второй и третьей ступени работают на растяжение.

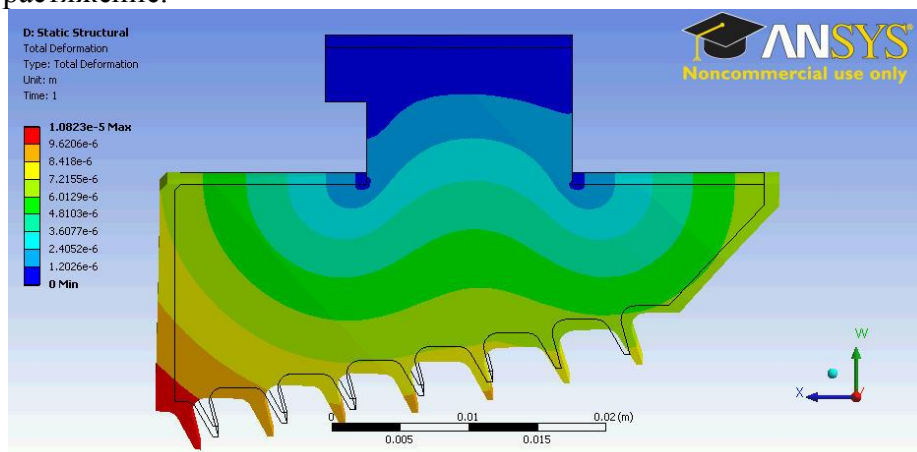


Рисунок 2. Полные перемещения в поперечном сечении ЛУ

Зона максимальных напряжений располагается в центральной части поперечного сечения ЛУ, зона минимальных напряжений – в зоне, наиболее удаленной от проточной части ЛУ,

независимо от материала. Зона расположения максимальных и минимальных напряжений не меняется.

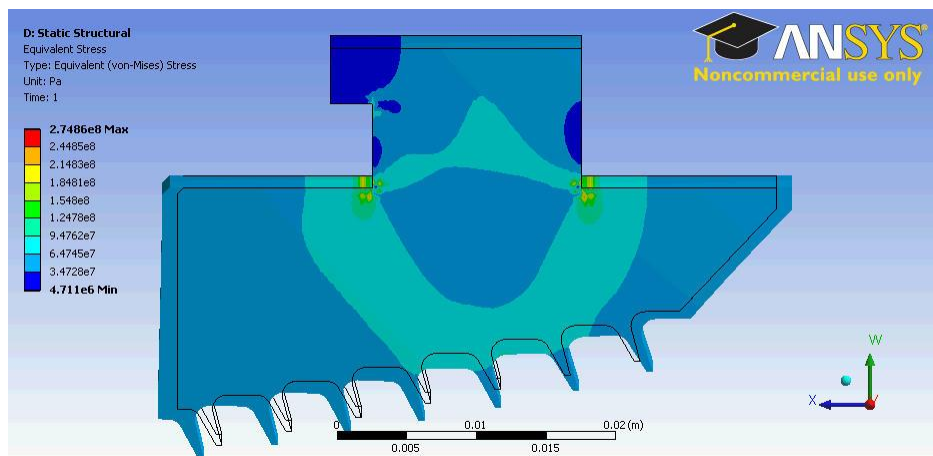


Рисунок 3. Эквивалентные напряжения по Мизесу в поперечном сечении лабиринтного уплотнения третьей ступени компрессора.

Анализ зазоров в зоне лабиринтных уплотнениях показал, что при увеличении частоты вращения с 3000 до 5160 об/мин давление и температура газа в зоне ЛУ растут. Причем, в зоне ЛУ вблизи от стенки наблюдается понижение температуры по сравнению со средним значением в данном сечении, которое связано с понижением плотности и давления газодинамического потока. Следствием этого является рост деформаций, напряжений и перемещений в элементе ЛУ. Причем влияние давления газового потока на НДС мало и составляет примерно 10% от влияния температуры. Влияние температуры приводит к изменению зазора на величину до 61,4 мкм. Лабиринтное уплотнение в зоне первого рабочего колеса сжимается из-за низкой, по сравнению с равновесным значением, температурой. Минимальные значения зазора составляет 11,3 мкм на в зоне ЛУ первого рабочего колеса, максимальные значения 63,2 мкм на в зоне ЛУ третьего рабочего колеса.

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Анализ полей перемещений показал, что на зазоры в лабиринтных уплотнениях наибольшее влияние оказывают температурные деформации. При воздействии температурной нагрузки зазор в уплотнении может изменяться до 100 мкм. Изменение величины зазора может привести к изменению течения газа в уплотнении и возникновению колебаний.

2. Расположения зон максимальных значений компонент НДС от газодинамических и тепловых нагрузок. Расположения зон максимальных значений компонент НДС не меняется при изменении газодинамической и тепловой нагрузки. Изменяются абсолютные значения компонент НДС.

3. Величины зазоров в лабиринтных уплотнениях зависит от физико-механических характеристик материалов. Также, значения максимальных напряжений в ЛУ увеличиваются от ступени к ступени независимо от материала ЛУ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда
(проект №14-19-00877).

Список литературы

1. Mekhonoshina E.V., Modorskii V.Ya., Petrov V.Yu. Numeric simulation of the interaction between subsonic flow and a deformable profile blade on the compressor experiment phase // Proceedings of International Conference Information Technology and Nanotechnology (ITNT-2015). – 2015. – p. 211-218
2. Модорский В.Я., Соколкин Ю.В. Газоупругие процессы в энергетических установках. / Под ред. Ю.В. Соколкина. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. — 176 с.
3. Справка по работе с инженерным программным обеспечением ANSYS Inc., USA, see <http://www.ansys.com/>

05.13.11

В.А. Шапов, к.т.н

Институт механики сплошных сред УрО РАН,
лаборатория телекоммуникационных и информационных систем;
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет,
кафедра информационных технологий и автоматизированных систем,
г. Пермь, phprus@gmail.com

SCIMQ: ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСА ОБРАБОТКИ ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ

В работе описаны технологии, реализованные и используемые в создаваемом сервисе обработки интенсивных потоков экспериментальных данных. Разработка собственных программных решений позволила повысить эффективность использования доступных аппаратных ресурсов, тем самым позволяя решать более ресурсоемкие задачи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-60043.

Ключевые слова: суперкомпьютер, обработка потоков данных, linux, SciMQ, облачные вычисления.

Архитектура сервиса обработки интенсивных потоков данных

В настоящее время в ИМСС УрО РАН создается облачный сервис обработки потоков экспериментальных данных [1,2], позволяющий решать задачи обработки интенсивных потоков данных в пределах инфраструктуры ГИГА УрО РАН [3] с использованием суперкомпьютеров и экспериментальных установок, расположенных в разных городах.

На рис. 1 приведена общая архитектура создаваемого сервиса.

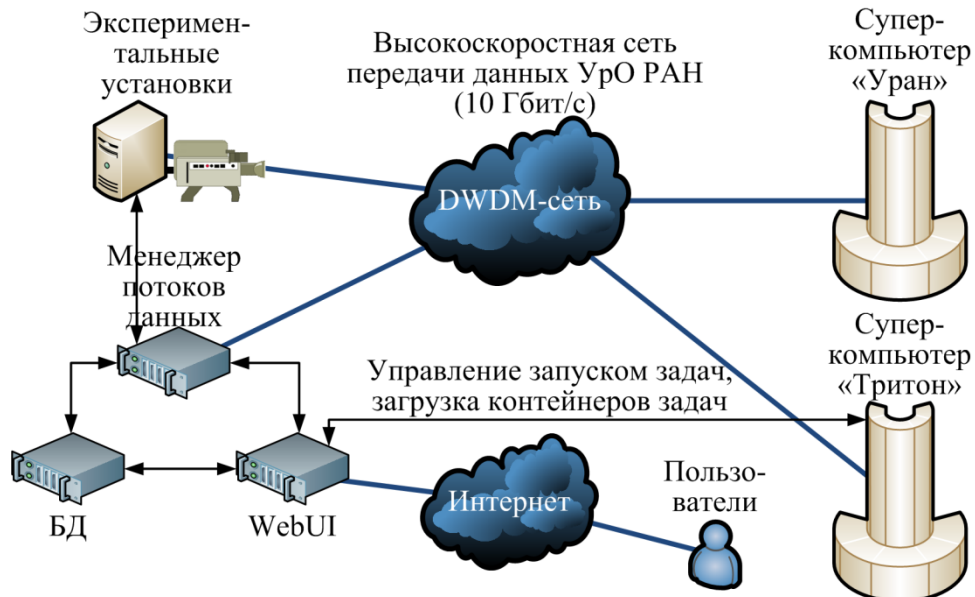


Рис. 1 – Архитектура сервиса обработки интенсивных потоков данных

Ядром системы является высокопроизводительный менеджер потоков данных (сервер очередей SciMQ [4,5]), который решает задачу распределения элементов потоков данных по вычислительным узлам.

База данных PostgreSQL хранит данные пользователей системы, такие как логин, пароль, токены авторизации для приложений и собираемую статистику об используемых ресурсах.

Основная работа с сервисом выполняется через веб-интерфейс. На текущий момент веб-интерфейс позволяет полностью управлять сервером очередей SciMQ и просматривать архив статистики загрузки системы. Разрабатывается механизм управления расчетными

приложениями на суперкомпьютере, в том числе, интеграция с системой управления потоком задач Slurm для обеспечения возможности их запуска на счет в определенное время, на которое были запланированы эксперименты.

Для доставки и запуска расчетных приложений в разнородном вычислительном окружении нескольких суперкомпьютеров планируется использовать технологии контейнерной виртуализации. В настоящее время на суперкомпьютере «Тритон» успешно реализован прототип системы запуска контейнеризированных MPI приложений с использованием системы управления потоком задач Slurm [6].

Далее в работе описывается архитектура основного компонента системы – менеджера потоков данных SciMQ.

Архитектура менеджера потоков данных SciMQ

Менеджер потоков данных состоит из четырех основных компонент: управляющий модуль, модуль фоновых процессов, модуль очередей, модуль сетевого взаимодействия. Все модули работают по событийно-ориентированному принципу с использованием технологий Boost.ASIO. Для диспетчеризации и обработки различных событий используется `boost::asio::io_service`, который реализует требуемую функциональность по мультиплексированию работы с сокетами, таймерами и пользовательскими событиями оптимальным для операционной системы способом [7]. Схема взаимодействия модулей приведена на рис. 2.

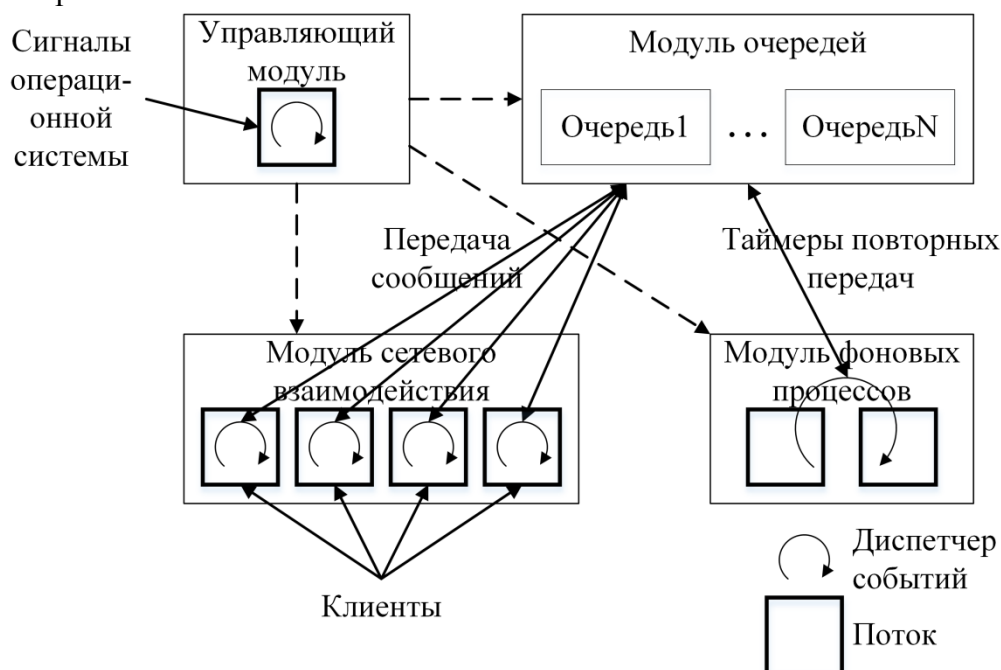


Рис. 2 – Схема взаимодействия модулей менеджера потоков данных SciMQ

Управляющий модуль отвечает за начальную инициализацию сервера, загрузку параметров конфигурации, запуск и остановку остальных модулей, обработку сигналов операционной системы, таких как сигналы немедленного и плавного завершения, сигнал для переоткрытия файлов журналов и инициализацию подсистемы распределения памяти.

Сервер очередей использует три основных пула памяти, предельный объем которых может настраиваться пользователем. Пулы используются для хранения метаданных очередей, для хранения служебных структур очередей и для хранения передаваемых сообщений.

Модуль фоновых процессов предназначен для выполнения низкоприоритетных отложенных задач. Он содержит пул потоков, каждый из которых ожидает и обрабатывает события от общего диспетчера `io_service`. Это позволяет запускать в рамках одного диспетчера событий длительные задачи, так как, пока выполняется одна задача, остальные задачи могут обрабатываться оставшимися потоками.

Модуль очередей управляет хранением очередей сообщений в памяти сервера. Каждая очередь имеет свое уникальное имя в пределах пространства имен пользователей системы. Реализуются два режима работы: с гарантией обработки и без гарантии обработки. Если очередь без гарантии обработки, то сообщение удаляется из очереди сразу же после отправки клиенту. Если очередь с гарантией обработки, то, после передачи клиенту, сообщение помещается во временный список, из которого оно будет удалено в случае получения подтверждения обработки. В случае если по истечению таймаута подтверждения оно получено не было или загрузивший сообщение клиент разорвал соединение с сервером, сообщение из временного списка перемещается в начало очереди. Таким образом, реализуется механизм, при котором каждое сообщение будет обработано хотя бы один раз в порядке, максимально приближенном к порядку поступления сообщений. Для обработки таймеров модулем очередей используются возможности, предоставляемые модулем фоновых процессов. Использование очередей с гарантией доставки повышает требования по доступной памяти, так как передаваемые данные необходимо хранить дольше.

Также очередь может быть постоянно хранимой или временной. Постоянно хранимая очередь и все передаваемые через нее данные записываются на диск и остаются на своем месте даже в случае перезапуска сервера. Временные очереди хранятся только в оперативной памяти, но обеспечивают большее быстродействие.

В случае переполнения пулов памяти реализован механизм вытеснения сообщений и структур очередей на диски. Это замедляет работу системы, но повышает ее надежность.

Модуль сетевого взаимодействия отвечает за реализацию взаимодействия с клиентами по сети с использованием протокола SciMP [4] версии 1. Модуль реализован как пул потоков, в каждом из которых работает собственный диспетчер событий `io_service`. Вновь создаваемые соединения распределяются по диспетчерам в порядке `round-robin`. Таким образом, каждое соединение всегда обрабатывается только одним потоком операционной системы. Такая архитектура выбрана по двум причинам. Первая из них заключается в том, что в операционной системе Linux эффективно ожидать события на сокете может только один `epoll` в одном потоке. В связи с этим выгоднее создать несколько диспетчеров `io_service`, использующих механизм `epoll`, каждый из которых будет обрабатывать свою часть соединений независимо и параллельно другим, вместо того, чтобы иметь разделяемый `epoll`, который фактически будет работать однопоточно. Вторая причина выбора такой архитектуры – возможность полностью убрать различные блокировки и риски одновременного выполнения обработчиков при работе с данными сокета. Так как все обработчики одного сокета, включая обработчики таймеров, отслеживающих таймауты, выполняются в одном потоке, они выполняются только последовательно и не требуют явных блокировок.

В результате на основном пути данных при работе системы остаются только блокировки, связанные с разделяемыми данными очередей, но они защищают небольшие участки кода и, поэтому, не оказывают сильного негативного влияния на итоговую производительность системы.

Заключение

Таким образом, в статье описаны технологии, которые позволили добиться требуемых скоростных характеристик разрабатываемого облачного сервиса, что позволит использовать его при работе с потоками данных в десятки Гбит/с [4].

Список литературы

1. *Щапов В. А.* Архитектура сервиса обработки интенсивных потоков экспериментальных данных на суперкомпьютере // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань. – 2016. – № 2. – С. 175-178.
2. *Щапов В. А., Масич Г. Ф.* Облачный сервис SciMQ по обработке потоков экспериментальных данных на суперкомпьютере // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (26-27 сентября 2016 г., г. Москва). – М.: Изд-во МГУ, 2016. – С. 325-332.
3. *Масич А. Г., Масич Г. Ф.* Инициатива GIGA UrB RAS // Совместный вып. журн. «Вычислительные технологии» и журн. «Вестник КазНУ им. Аль-Фараби». Сер. «Математика, механика, информатика» №3 (58). По материалам Междунар. конф. «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании». - Казахстан, Алматы.-2008. –Т.13. – Ч. II. – С. 413-418 (ISSN 1560-7534).
4. *V. Shchapov, G. Masich, A. Masich*, Platform for Parallel Processing of Intense Experimental Data Flow on Remote Supercomputers // Procedia Computer Science. Vol. 66. 2015. P. 515-524. ISSN 1877-0509. doi:10.1016/j.procs.2015.11.058.
5. *G. Masich, V. Shchapov* The software platform of transmission of intense data streams on remote supercomputers // CEUR Workshop Proceedings (Proceedings of the 1st Russian Conference on Supercomputing (RuSCDays 2015), Moscow, Russia, September 28-29, 2015). Vol. 1482. 2015. P. 720-731.
6. *Щапов В. А., Денисов А. В., Латыпов С. Р.* Применение контейнерной виртуализации Docker для запуска задач на суперкомпьютере // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (26-27 сентября 2016 г., г. Москва). – М.: Изд-во МГУ, 2016. – С. 505-511.
7. Boost.ASIO: Platform-Specific Implementation Notes - 1.61.0. URL: http://www.boost.org/doc/libs/1_61_0/doc/html/boost_asio/overview/implementation.html. дата обращения 20.09.2016.

05.13.01

О.В. Щекочихин, В.В. Шведенко, П.В. Шведенко

Костромской государственный университет, институт физико-математических и естественных наук, кафедра защиты информации, Кострома, slim700@yandex.ru

ОНТОЛОГИЯ ПОНЯТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОВЕДЕНИЕМ

Описывается онтология понятий, используемых при описании информационных систем с поведением, дано понятие модель поведения, представлена концептуальная модель интеллектуальной информационной системы с поведением.

Ключевые слова: *интегрированная информационная система, интеллектуальная информационная система, поведение информационной системы.*

Современные информационные системы должны обладать возможностями быстрой адаптации своего функционала к меняющимся условиям внешней и внутренней среды объекта, для которого они осуществляют информационную поддержку. Одним из методов решения этой задачи является наделение информационных систем свойством поведения. В настоящее время общепринятая система понятий и определений, дающих возможность изучать, проектировать и эксплуатировать информационные системы с поведением не сформирована в полном объеме.

В работе представлена онтология понятий и определений информационных систем с поведением.

Как известно, **Система** представляет собой набор объектов, обладающих заданными свойствами, и набор связей между объектами, которые обеспечивают устойчивость, изменчивость и развитие системы.

Поведение системы – это её свойство, которое позволяет осуществлять переход системы из одного устойчивого состояния в другое. В дальнейшем будет рассматриваться информационная поддержка производственных систем.

Производственная система представляет собой группу взаимонезависимых компонентов, совместно работающих для достижения конечной цели – производства товаров и услуг. Эти компоненты определяются как бизнес-процессы. Таким образом, производственная система состоит из группы взаимосвязанных бизнес-процессов, обеспечивающих достижение целей организации.

Бизнес-процесс — это связанный набор повторяемых действий, преобразующих исходный ресурс в конечный продукт в соответствии с заранее установленными правилами. Для оценки состояния бизнес-процесса используются группы показателей.

Показатель – это количественное или качественное отражение состояния свойства элемента системы или связи между элементами, которое измеряется и может быть представлено набором данных.

Данные – это совокупность значений, характеризующих некоторое явление, ситуацию, некоторый объект, действие или условие. Владелец или пользователь данных определяет смысловое содержание с помощью задания некоторой структуры, и тем самым данные, как некоторые сведения, переходят в состояние категории «информации». Отображение фактов материального мира в виде структуры данных происходит через понятие модели данных.

Модель данных – это абстрактное, логическое определение объектов, которое в совокупности представляет механизм доступа к данным, включая в себя методы взаимодействия с другими объектами. Модели данных реализуются в информационных системах [1].

Информационная система включает в себя вычислительное оборудование и средства коммуникации, программное и лингвистическое обеспечение, информационные ресурсы и поддерживает функции управления производственной системой. Поддержка функций управления осуществляется посредством информационной модели производственной системы или отдельных её частей [1].

Информационная модель производственной системы представляет собой систему сигналов, фиксируемых через набор показателей, характеризующих динамику изменений состояния объекта управления, связей между объектами управления, условий внешней и внутренней среды производственной системы.

Информационная модель производственной системы должна в наибольшей степени соответствовать целям и задачам производственной деятельности предприятия и удовлетворять следующим ее основным требованиям: 1) функциональная полнота; 2) защита данных; 3) целостность информации на уровне предприятия, на уровне отдельных задач, и на уровне временных периодов; 4) актуальность. Корректировка структуры и функций бизнес-процессов, структуры данных, добавление /удаление баз данных, связей, индексов и т.д.; 5) надежность. Наличие средств анализа архитектуры баз данных, статистики обработанной информации с целью принятия решений о внесении изменений в информационную модель ИС, алгоритмов обработки и структурирования данных; 6) адаптивность. Изменение структуры, широты и глубины накопления данных о динамике изменения состояния элементов производственной системы в соответствии с пересматриваемыми целями и задачами, ориентированными на достижение наиболее эффективных результатов.

Рассматривая информационные системы с позиций их способности к быстрой и эффективной адаптации к новым внешним и внутренним условиям функционирования предприятия, следует выделить такие ИС как: интегрированная информационная система и интеллектуальная информационная система [2].

Интегрированная информационная система обеспечивает выполнение задач в условиях меняющихся целей организации, объединяя в себе как гомогенные, так и гетерогенные программные средства, обеспечивающие сбор, хранение и обработку данных о состоянии производственной системы, что приводит к уменьшению затрат на её адаптацию и эксплуатацию.

Интеллектуальная информационная система осуществляет поддержку принятия обоснованных управленческих решений на основе логико-математических методов поиска и обработки информации о состоянии производственной системы, выявления проблемной ситуации и перевода производственной системы в заранее заданное состояние.

Объединение возможностей интегрированной и интеллектуальной информационных систем позволяет перейти к созданию нового класса ИС, которые обладают свойством поведения.

Основная заявляемая характеристика данной системы – расширение функциональных возможностей ИС без перенастройки ее архитектуры. Это особенно важно, когда производственная система под действием негативных факторов перестает достигать заранее установленные цели. При этом происходит рассогласование между функциями управления производственной системы и возможностями их информационной поддержки.

Информационная система с поведением позволяет расширять функциональные возможности ИС без перенастройки отдельных компонентов системы в условиях возникновения проблемных ситуаций, когда производственную систему нужно перевести в устойчивое состояние, или когда имеется набор мероприятий планового перевода производственной системы из одного состояния в другое устойчивое состояние [3]. Состояние производственной системы определяется на основе группы показателей.

Инструментальным средством реализации функций поведения является механизм создания и эксплуатации моделей поведения.

Модель поведения представляет собой алгоритм перевода производственной системы из одного состояния в другое в соответствии с целями производственной системы на основе анализа показателей.

Чем большее количество факторов будет учитываться, тем более эффективными будут алгоритмы модели поведения.

В основе классификации моделей поведения лежит набор показателей и их значений. Создание модели поведения осуществляется в автоматизированном режиме, с использованием методов моделирования бизнес-процессов и известных алгоритмов решения задач управления производственной системой. Модели поведения хранятся в соответствующем репозитории информационной системы.

Модель поведения может быть заранее известна для заданного типа проблемной ситуации, на основе анализа значений показателей состояния производственной системы. Такая модель поведения может быть реализована без участия человека или под его контролем при наличии «красной кнопки».

В условиях неопределенности выбора модели поведения возникает ситуация, когда поведение системы осуществляется средствами искусственного интеллекта.

Репозиторий моделей поведения представляет собой многомерную фасеточную таблицу решений, содержащую многообразие состояний показателей, которые записываются в шапки таблицы. Обработка данных и заполнение таблиц решений осуществляется на основе метода аналогий и объединения схожих проблемных ситуаций в одну. Осуществляется моделирование проблемной ситуации и оценка эффективности алгоритма реализации модели поведения. Многомерная фасеточная таблица решений имеет свободные ячейки, в которых проблемная ситуация не анализировалась или для её разрешения не использовалась таблица решений.

Структура интегрированной информационной системы, наделенной свойством поведения включает такие возможности, как съем информации с производственной системы через приложения, обработка и управление данными через шину данных, передача данных в систему поддержки принятия управленческих решений.

Предложенные выше определения позволяют сформулировать понятийный аппарат, дающий возможность создавать алгоритмы и методы проектирования информационных систем с поведением.

Список литературы

1. Сахарова Н.С. Анализ информационной поддержки бизнес-процессов с применением группы запросов модели метаданных [текст] // Научно-технический вестник Поволжья, 2015. – № 5. – с. 272.
2. Веселова Н.С., Шведенко В.Н. Моделирование информационных ресурсов предприятия при процессной организации системы управления [Текст] // Международный журнал «Программные продукты и системы», – №4(108). Тверь - 2014.– с. 260.
3. Шведенко В.Н., Щекочихин О.В., Шведенко П.В. Критерии оценки и модели информационных систем, обладающих свойством поведения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. с. 650. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-4-649-654

**АННОТАЦИИ
ABSTRACTS****Е.А. Вячкина, Е.В. Решетникова, Е.С. Вячкин
РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ВЫПЛАТ ЗА
ВЫБРОСЫ ПРИ ПОЖАРЕ В СТРОИТЕЛЬНЫХ
ОБЪЕКТАХ**

Ключевые слова: химический состав, математическая модель, выбросы, скорость, температура.

Рассматривается реализация методики расчета выплат при пожаре. Методика, полученная авторами в работе [1], содержит физическую и химическую составляющую, а также часть, отвечающую за расчет выплат за загрязнение. В работе проведена её проверка на тестовом примере.

**Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских,
В.А. Шакура, Е.В. Ильченко
КОЛЕБАНИЯ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЬКА В
АНИЗОТРОПНОЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ПОД
ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ**

Ключевые слова: анизотропия, вязкость, ультразвук, газовая полость.

В статье предложена физико-математическая модель колебаний пузырька в анизотропной высоковязкой жидкости. Модель основана на спектральном разложении тензора вязких напряжений по компонентам, характеризующим реологические свойства жидкости при сдвиге в разных направлениях. Анализ модели позволил выявить формы газового пузырька при различных параметрах акустического поля и реологических характеристиках жидкости.

**В.В. Дружинин
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФОРМУЛА ДЛЯ СУММ
ОБОБЩЕННЫХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ПРОГРЕССИЙ**

Ключевые слова: сумма членов арифметической прогрессии, суммы одностепенных чисел, числа Бернулли.

Получена формула для расчета сумм с основаниями, образующих арифметические прогрессии, в одинаковых степенях. Приведены результаты для степеней от «1» до «4». Найдены дифференциальные и рекуррентные соотношения между такими суммами и указаны приложения.

**М.В. Крючков
АПРОБАЦИЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕКОТОРЫХ ФИНАНСОВЫХ
СТРАТЕГИЙ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО**

Ключевые слова: метод Монте-Карло, финансовая стратегия, критерий Байеса, игры с природой.

В работе представлен анализ результатов численного расчета показателя эффективности по Байесу для некоторых финансовых стратегий, применяемых в сериях игр с природой. Реализовано большое число моделирований стохастического процесса игры, сформированных с вероятностными характеристиками совпадающими с аналогичными величинами рассматриваемой задачи. По результатам эксперимента сделаны выводы о близости эмпирического среднего выигрыша к его математическому ожиданию.

**Е.А. Vyachkina, E.V. Reshetnikova, E.S. Vyachkin
IMPLEMENTATION OF PAYMENT METHODS OF
CALCULATION FOR EMISSIONS FROM FIRE IN
BUILDING OBJECTS**

Keywords: chemistry, mathematical model, emissions, speed, temperature.

The realization of the calculation of payments in case of fire techniques. The technique, obtained by the author in [1], provides the physical and chemical component and part, responsible for the calculation of payments for pollution. The work carried out its verification test case.

**R.N. Golykh, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh,
V.A. Shakura, E.V. Ilchenko
OSCILLATIONS OF GASEOUS BUBBLE IN NON-
ISOTROPIC HIGH VISCOUS LIQUID UNDER HIGH-
FREQUENCY ACOUSTIC FIELDS INFLUENCE**

Index Terms: non-isotropy, viscosity, ultrasound, gaseous cavity.

The paper was proposed model of bubble oscillations in non-isotropic high-viscous liquid. The model is based on spectrum decomposition of viscous stress tensor into components, which characterize rheological properties of liquid at shift in different directions. The analysis of model allows to evaluate shapes of gaseous bubble at various parameter of acoustic field and rheological properties of liquid.

**V.V. Druzhinin
THE INTEGRAL FORMULA FOR SUMS OF
GENERALIZED ARITHMETIC PROGRESSIONS**

Keywords: the sum of the terms of an arithmetic progression, the amount of a single-stage numbers, Bernoulli numbers.

The formula for calculating the amounts of the bases forming arithmetic progression, in the same degree. There are results for the degrees from "1" to "4". differential and recurrence relations found between such amounts and this applications.

**M.V. Kryuchkov
CHECKING OF CALCULATION OF EFFICIENCY
INDICATOR FOR SOME FINANCIAL STRATEGIES BY
MONTE CARLO METHOD**

Keywords: Monte Carlo method, financial strategy, Bayes criterion, games with nature.

This paper presents an analysis of the results of numerical calculation of Bayes criterion of efficiency for some financial strategies used in the series of games with nature. A large number of simulations of the stochastic process of the game are formed with probability characteristics coincide with the similar values of the task. The results of experiment allow drawing conclusions about the proximity of the empirical average of win to his theoretical expectation.

А.В. Михайлов, В.Л. Шаблов
НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕОРИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ
КУЛОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ В СИСТЕМАХ
НЕСКОЛЬКИХ ЧАСТИЦ

Ключевые слова: квантовая теория рассеяния, кулоновское взаимодействие, нестационарная теория возмущений, борновские ряды.

Разработан метод выделения кулоновских сингулярностей в членах ряда нестационарной теории возмущений для оператора эволюции в системе N заряженных частиц. Как следствие, получено разложение для амплитуды процесса развала в модифицированные борновские ряды, члены которых регулярны на энергетической поверхности, и новые приближения для волновой функции канала развала.

В.Ш. Ройтенберг
О БИФУРКАЦИЯХ В ОКРЕСТНОСТИ ТОЧКИ СТЫКА
ЛИНИЙ РАЗРЫВА ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ

Ключевые слова: кусочно-гладкие векторные поля на плоскости, линии разрыва, особая точка, бифуркации.

В статье изучаются бифуркации в типичных двухпараметрических семействах кусочно-гладких векторных полей на плоскости в окрестности особой точки на пересечении их линий разрыва. Описана бифуркационная диаграмма. В частности, найдены области параметров, для которых существует устойчивая периодическая траектория.

Г.Н. Демиденко, Д.В. Евдокимова, А.В. Забрусская,
А.В. Быков
ПЛАТИНА, СТАБИЛИЗИРОВАННАЯ В ПОЛИМЕРНОЙ
МАТРИЦЕ, В ЖИДКОФАЗНОМ ГИДРИРОВАНИИ
АРЕНОВ

Ключевые слова: жидкофазное гидрирование, полимерстабилизированный катализатор, платина.

В статье рассмотрены результаты каталитического тестирования жидкофазного гидрирования бензола и анилина на платиновом катализаторе, стабилизированном в стирол-дивинилбензольной матрице. Показана высокая активность и селективность реакции с участием каталитической системы.

Н.В. Лакина, В.Ю. Долуда, В.Г. Матвеева
ИЗУЧЕНИЕ БИОКАТАЛИТИЧЕСКОГО СПОСОБА
ГИДРОЛИЗА ТОРФА ВЕРХОВОГО ТИПА

Ключевые слова: целлюлозолигниновое сырье, химический гидролиз, ферментативный гидролиз, D-глюкоза, биоэтанол. В статье представлены результаты достаточно высокой активности отечественного мультиферментного препарата Целловиридин для гидролиза, предварительно обработанных H_2SO_4 , образцов торфа верхового типа. Показана высокая эффективность делигнифицирующей обработки образцов торфа 90% H_2SO_4 . Актуальность данного биохимического процесса состоит в использовании продуктов гидролиза торфа – моносахаридов как источников получения биоэтанола.

Ю.В. Луговой, К.В. Чалов, Э.М. Сульман
ВЛИЯНИЕ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛОВ НА ПРОЦЕСС
ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТОРФА

Ключевые слова: торф, термохимическая переработка, соединения металлов, газообразные продукты.

Представлены результаты исследования газообразных продуктов процесса термохимической переработки торфа в присутствии $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, $NaCl$, $MgCl_2$, $AlCl_3$. Температура термохимического процесса переработки изменялась в пределах от 550 до 700°C. Концентрация катализатора варьировалась в интервале от 1 до 10% масс. Показано влияние исследуемых соединений на конверсию торфа, состав и теплоценность газообразных продуктов.

A.V. Mikhailov, V.L. Shablov
TIME-DEPENDENT PERTURBATION THEORY FOR
COULOMB SCATTERING IN FEW PARTICLE SYSTEMS

Keywords: quantum scattering theory, Coulomb interaction, time-dependent perturbation theory, Born series

The method to manifest Coulomb singularities in series of time-dependent perturbation theory for the N charged particle system evolution operator. Therefore, modified Born series for the break-up amplitude are elaborated, these series being regular on the energy shell, and new approximations for the break-up channel wave function are obtained.

V.Sh. Roitenberg
ON BIFURCATIONS IN A NEIGHBORHOOD OF JOINING
POINT OF LINES OF DISCONTINUITY OF A VECTOR
FIELD

Keywords: piecewise smooth planar vector fields, lines of discontinuity, singular point, bifurcations.

In this paper we study bifurcations in generic two-parameter families of piecewise smooth planar vector fields in the vicinity of the singular point on the junction of their lines of discontinuity. The bifurcation diagram is described. In particular, we found the domain of parameters for which exist is a stable periodic trajectory.

G.N. Demidenko, D.V. Evdokimova, A.V. Zabruskaya,
A.V. Bykov
PLATINUM STABILIZED IN POLYMERIC MATRIX IN
LIQUID-PHASE ARENE HYDROGENATION

Keywords: liquid-phase hydrogenation, the polymer-stabilized catalyst, platinum.

The article describes the results of the catalytic testing of liquid-phase hydrogenation of benzene and aniline on a platinum catalyst, stable in aromatic styrene-divinylbenzene matrix. The high stability and selectivity of the catalytic reaction system with its participation are shown.

N.V. Lakina, V.Ju. Doluda, V.G. Matveeva
THE STUDY OF THE BIOCATALYTIC METHOD OF
HYDROLYSIS OF THE PEAT TYPE

Keywords: cellulosolvens raw materials, chemical hydrolysis, enzymatic hydrolysis, D-glucose, bioethanol.

The article presents the results of a sufficiently high activity of domestic multienzyme preparation Cellovyridin for hydrolysis of H_2SO_4 pre-treated, samples of the peat type. The high efficiency delignification processing samples of peat 90% H_2SO_4 . The relevance of this biochemical process consists in the use of the products of hydrolysis of peat – monosaccharides as sources of bioethanol.

Yu.V. Lugovoy, K.V. Chalov, E.M. Sulman
INFLUENCE OF METAL COMPOUNDS ON PROCESS OF
PEAT THERMOCHEMICAL PROCESSING

Keywords: peat, thermochemical processing, metal compounds, gaseous products.

The results investigations of gaseous products which produced by thermochemical processing of peat in presence $NaOH$, KOH , $Ca(OH)_2$, $NaCl$, $MgCl_2$, $AlCl_3$ were showed. Temperature of thermochemical process was 550-700°C. Concentration of catalyst was 1 - 10 % wt. Influence of investigated chemical compositions on peat conversion, composition and heat of combustion gaseous products were presented.

Н.Н. Маркузина
 ЭЛЕКТРОДНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДОКОНТАКТНЫХ
 ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ, СОДЕРЖАЩИХ
 ЭЛЕКТРОНОПРОВОДЯЩИЙ ПОЛИМЕР
 ПОЛИ(3-ОКТИЛТИОФЕН)

Ключевые слова: твердоконтактные электрохимические сенсоры, электронопроводящие полимеры, электродная функция, селективность, стабильность электродного потенциала.

Разработаны калийселективные и барийселективные твердоконтактные электрохимические сенсоры на основе поли(3-октилтиофена) в качестве ионоэлектронного трансдюсера. Исследованы основные характеристики твердоконтактных электрохимических сенсоров: пределы выполнения электродной функции, селективность, стабильность электродного потенциала. Полученные результаты свидетельствуют о том, что электронопроводящий полимер поли(3-октилтиофен) можно успешно применять для стабилизации потенциала твердоконтактных электрохимических сенсоров.

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

ПРИРОДА АКТИВНОЙ ФАЗЫ
 ПОЛИМЕРСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ
 РУТЕНИЙСОДЕРЖАЩЕЙ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ
 СИСТЕМЫ ЖИДКОФАЗНОГО СИНТЕЗА N-
 МЕТИЛАНИЛИНА

Ключевые слова: восстановительное N-алкилирование, полимерстабилизированный катализатор, активная фаза. В статье рассмотрены результаты физико-химического исследования рутениевой полимерстабилизированной каталитической системы восстановительного N-алкилирования анилина формальдегидом в присутствии водорода. Методами ИК-спектроскопии, рентгенофотоэлектронной спектроскопии и термогравиметрии определена стабильность полимерной матрицы и состав активной фазы катализатора.

К.В. Чалов, Ю.В. Луговой, Ю.Ю. Косивцов, Э.М. Сульман
 ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКАЯ ДЕСТРУКЦИЯ
 НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ В ПРИСУТСТВИИ
 ХЛОРИДА КОБАЛЬТА

Ключевые слова: каталитический пиролиз, нефтесодержащие отходы, хлориды металлов, газообразные углеводороды.

В данной работе представлены результаты исследования процесса каталитического пиролиза нефтесодержащих отходов в присутствии хлорида кобальта. Представлены результаты термогравиметрического анализа процесса. Определена оптимальная концентрация катализатора.

Е.И. Шиманская, А.А. Степачёва, А.М. Сульман,
 Э.М. Сульман, М.Г. Сульман
 КАТАЛИТИЧЕСКАЯ ГИДРОПЕРЕРАБОТКА АНИЗОЛА И
 ОПИЛОК ХВОЙНЫХ ПОРОД

Ключевые слова: лигнин, гидропереработка, деполимеризация, биотопливо.

В данной статье коммерческий катализатор Pd/C и синтезированные образцы 5%-Pt/Al₂O₃ и 5%-Pt/MN-270 были использованы для гидропереработки лигнина для получения компонентов жидких топлив. Так как лигнин имеет очень сложную структуру, анизол использовался в качестве модельного соединения. Также был исследован процесс гидропереработки опилок хвойных пород. Было обнаружено, что использование Pt-содержащей каталитической системы на основе алюминия и коммерческого катализатора в случае гидропереработки анизола и опилок хвойных пород позволило получить фенольные соединения, а при использовании каталитической системы на основе сверхсшитого полистирола основным продуктом являлся циклоалкан.

N.N. Markuzina
 ELECTRODE PROPERTIES OF SOLID-CONTACT
 ELECTROCHEMICAL SENSORS CONTAINING
 ELECTROCONDUCTIVE POLYMER
 POLY (3-OCTYLTHIOPHENE)

Keywords: Solid-contact electrochemical sensors, electroconductive polymers, electrode function, selectivity, electrode potential stability

Solid-contact potassium-selective and barium-selective electrochemical sensors with electroconductive polymers poly (3-oktylthiophene) as an ion-to-electron transducers have been prepared. Main characteristics of solid-contact electrochemical sensors: dynamic range of electrode function, selectivity, potential stability have been studied. The results obtained indicated that electroconductive polymers poly (3-oktylthiophene) may be used for potential stabilization of solid-contact electrochemical sensors.

G.V. Samoilova, G.N. Demidenko, L.Zh. Nikoshvili,
 A.V. Bykov

NATURE OF CATALYTIC PHASE OF POLYMER-
 STABILIZED RUTHENIUM-CONTAINING CATALYTIC
 SYSTEM OF LIQUID-PHASE N-METHYLANILINE
 SYNTHESIS

Keywords: reductive N-alkylation, polymer-stabilized catalyst, N-methylaniline, catalytic active phase.

The article describes the results of physico-chemical analysis of the polymer-stabilized ruthenium-containing catalytic system of aniline N-alkylation by formaldehyde in the presence of hydrogen. By IR spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and the low-temperature nitrogen adsorption were determined stability of the polymer matrix composition and the active catalyst phase.

K.V. Chalov, Yu.V. Lugovoy, Yu.Yu. Kosivtsov, E.M. Sulman
 THERMOCATALYTIC DESTRUCTION OF OIL-CONTAINING
 WASTES IN THE PRESENCE OF COBALT CHLORIDE

Keywords: Catalytic pyrolysis, oil-containing waste, metals chlorides, gaseous hydrocarbons.

This paper presents the results of a study of oil waste catalytic pyrolysis in the presence of cobalt chloride. Thermogravimetric analysis of process was done. The optimum concentration of catalyst was found.

E.I. Shimanskaya, A.A. Stepacheva, A.M. Sulman,
 E.M. Sulman, M.G. Sulman
 CATALYTIC HYDROPROCESSING OF ANISOLE AND
 SOFTWOOD SAWDUST

Keywords: lignin, hydroprocessing, depolymerization, biofuels. In this article, a commercial catalyst Pd/C and the synthesized samples 5%Pt/Al₂O₃ and 5%Pt/MN-270 were used for hydroprocessing of lignin to produce liquid fuels components. Since lignin has a very complicated structure, anisole was used as a model compound. Also hydroprocessing process of softwood sawdust was investigated. It has been found that the use of Pt-containing catalytic system based on aluminum and in the case of commercial hydroprocessing catalyst in anisole and softwood sawdust hydroprocessing it is possible to obtain phenolic compounds, and the use of catalytic systems based on hypercrosslinked polystyrene leads to obtaining of cycloalkane.

В.И. Ампилов

**ДИДАКТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕДУРЫ
ОБСЛУЖИВАНИЯ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА***Ключевые слова: обучение, система, компьютерная
графика, анимация, модель.*

В статье рассмотрены возможности внедрения анимированных трёхмерных моделей в существующую интерактивную автоматизированную систему обучения ИАСО. Целью данного проекта является усовершенствование процесса обучения при подготовке инженерно-технического состава для обслуживания летной техники. Рассмотрены достоинства использования анимации, а также необходимые для реализации данной задачи программные средства.

А.П. Буйносов

**ЭКСПРЕСС-ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
ЛОКОМОТИВА В СЕРВИСНОМ ДЕПО***Ключевые слова: локомотив, электрооборудование, сервис,
депо, диагностика, экспресс.*

В статье выполнен анализ использования экспресс-диагностики электрооборудования локомотива в сервисном депо с помощью прибора «Доктор-030М», возможность перехода от затратной системы технического диагностирования на экспресс-диагностику.

А.П. Буйносов, Н.Г. Фетисова

**ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И РАСЧЕТ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ ПРУЖИН В
РЕССОРНОМ ПОДВЕШИВАНИИ СОВРЕМЕННЫХ
ЛОКОМОТИВОВ***Ключевые слова: локомотив, подвешивание, рессора,
пружина, использование, варианты, силы, расчет.*

В статье приводятся варианты использования винтовых рессор в различных ступенях рессорного подвешивания, методика расчета цилиндрических винтовых рессор современных локомотивов.

**А.П. Буйносов, И.С. Цихалевский
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ПРОДОЛЬНОЙ
РАЗВЕСКИ ТЕЛЕЖКИ СОВРЕМЕННОГО
ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА***Ключевые слова: железнодорожный транспорт,
электровоз, электропоезд, экипаж, тележка, развеска,
расчет, принципы, основа.*

В статье приводятся основные принципы теоретического расчета развески тележки экипажной части современного электровоза и электропоезда железнодорожного транспорта.

А.В. Варенцов, С.М. Дмитриев, Д.Н. Солнцев,
А.Е. Хробостов**ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ
ТЕЧЕНИЯ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАССЕТНОЙ
АКТИВНОЙ ЗОНЕ ПЛАВУЧЕЙ АЭС***Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая
сборка, гидродинамика теплоносителя, дистанционирующая
решетка.*

В работе представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в модели ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

V.I. Ampilov

**DIDACTIC MODEL FOR TRAINING ON AIRCRAFT
AGGREGATES MAINTENANCE PROCEDURE***Keywords: training, system, computer graphics, animation,
model.*

The article examines guidelines for implementation of animated 3D models in the existing interactive automated training system (IASO). This project focuses on improvement of the training process for engineers and technical specialists engaged in aircraft maintenance. Advantages of animated models as well as software tools necessary for training process improvement are considered.

A.P. Buinosov

**EXPRESS PRELIMINARY TREATMENT OF THE
ELECTRICAL EQUIPMENT OF THE LOCOMOTIVE IN
SERVICE DEPOT***Keywords: locomotive, electrical equipment, service, depot,
preliminary treatment, express.*

In article the analysis of use of express preliminary treatment of an electrical equipment of the locomotive in service depot by means of the Doctor-030M device, a possibility of transition from the expensive test system to express preliminary treatment is made.

A.P. Buinosov, N.G. Fetisova

**OPTIONS OF USE AND CALCULATION OF COIL SCREW
SPRINGS IN SPRING SUSPENSION OF MODERN
LOCOMOTIVES***Keywords: locomotive, suspension, spring, use, options,
forces, calculation.*

In article options of use of screw springs are given in various steps of spring suspension, a method of calculation of cylindrical screw springs of modern locomotives.

A.P. Buinosov, I.S. Tsikhalevsky

**BASIC PRINCIPLES OF CALCULATION OF THE
LONGITUDINAL WEIGHING OF THE CART OF THE
MODERN ELECTRIC ROLLING STOCK***Keywords: railway transport, electric locomotive, electric
train, crew, cart, weighing, calculation, principles, basis.*

The basic principles of theoretical calculation of a weighing of the cart of a vehicular part of a modern electric locomotive and electric train of railway transport are given in article.

A.V. Varentsov, S.M. Dmitriev, D.N. Solntsev,
A.E. Khrobostov**EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HYDRODYNAMICS
OF COOLANT FLOW IN EXPERIMENTAL MODEL OF
FUEL ASSEMBLY FOR REACTOR OF FLOATING
NUCLEAR POWER PLANT***Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, coolant flow
hydrodynamics, spacer grid.*

This paper presents the results of experimental researches of hydrodynamic characteristics of coolant flow in experimental model of fuel assembly for reactor of floating nuclear power plant.

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, М.А. Легчанов,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС-КВАДРАТ
РЕАКТОРА PWR

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя.

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов на течение теплоносителя в ТВС-Квадрат реактора PWR.

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, Д.В. Максянин,
В.Д. Сорокин, А.Е. Хробостов
ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКА ПОТОКА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА
ВВЭР

Ключевые слова: активная зона, тепловыделяющая сборка, дистанционирующие решетки, перемешивающие решетки, гидродинамика теплоносителя.

Представлены результаты экспериментальных исследований гидродинамики теплоносителя в смешанной активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА различных модификаций.

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, И.А. Малышева,
А.Н. Пронин, О.Б. Солдаткин, А.Е. Хробостов
РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ СКОРОСТИ ПОТОКА
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС ПЛАВУЧЕГО ЭНЕРГООБЛОКА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ «КАНАЛ»

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, дистанционирующая решетка.

Представлены результаты и анализ экспериментальных и расчетных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

С.М. Дмитриев, Д.В. Доронков, А.Н. Пронин,
А.Е. Хробостов
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ РЕАКТОРА
ВВЭР С ТВСА-12 PLUS

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, межъячеечный массообмен, дистанционирующая решетка, перемешивающая решетка.

Представлены результаты экспериментальных исследований течения теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР, состоящей из ТВСА-12 PLUS.

С.М. Дмитриев, И.В. Каратушина, И.Ю. Ляхов,
А.Н. Пронин, А.Е. Хробостов
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ЛОКАЛЬНЫХ МАССООБМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЗА
ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМИ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ
РЕШЕТКАМИ В ТВС-КВАДРАТ

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен.

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локального массообмена и гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реакторов PWR с поясами перемешивающих решеток различной конструкции.

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, M.A. Legchanov,
V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov
THE EXPERIMENTAL RESEARCH COOLANT MIXING
IN TVS-KVADRAT FOR PWR

Keywords: core, the fuel assembly, the coolant fluid dynamics. The results of experimental studies of the effect of mixing spacer grids with different types of vents for a coolant in the TVS-Kvadrat for PWR.

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, D.V. Maksyanin
V.D. Sorokin, A.E. Khrobostov
INVESTIGATION OF FLUID FLOW TO THE COOLANT
FLOW IN THE CORE OF WVER

Keywords: core, fuel assembly, spacer grids, mixing grids, the coolant fluid dynamics.

The results of experimental investigations in hydrodynamics coolant mixed WVER reactor core consisting of TVSA various modifications.

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, I.A. Malysheva, A.N. Pronin,
O.B. Soldatkin, A.E. Khrobostov
DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE
DISTRIBUTION OF AXIAL VELOCITY COOLANT FLOW
IN THE FUEL ASSEMBLIES OF FLOATING POWER
USING THE PROGRAM "KANAL"

Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, spacer grid.

Experimental research of local hydrodynamics of coolant in the KLT-40S nuclear reactor FA.

S.M. Dmitriev, D.V. Doronkov, A.N. Pronin,
A.E. Khrobostov
RESEARCH MIXING A COOLANT IN THE REACTOR
CORE WVER WITH TVSA-12 PLUS

Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, intercell mass transfer, spacing grid, mixing grid.

The results of experimental research currents of coolant in the core of VVER reactor consisting of TVSA 12 PLUS.

S.M. Dmitriev, I.V. Karatushina, I.Yu. Lyahov,
A.N. Pronin, A.E. Khrobostov
EXPERIMENTAL RESEARCHES OF LOCAL MASS
TRANSFER OF THE COOLANT FLOW BEHIND THE
MIXING GRID IN TVS-KVADRAT FUEL ASSEMBLIES
OF PWR REACTORS

Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, coolant hydrodynamics, interchannel mass transfer.

Presents the results and analysis of experimental data for study the local mass transfer and hydrodynamics of coolant flow in fuel assemblies of PWR reactors with zones of mixing grids of various designs.

С.М. Дмитриев, А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов,
М.А. Легчанов, А. В. Котин
ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ ANSYS CFX
И LOGOS ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАКРУЧЕННОГО ТЕЧЕНИЯ В
КОЛЬЦЕВОМ КАНАЛЕ С ВНУТРЕННЕЙ
СПИРАЛЬНОНАВИТОЙ ТРУБОЙ ТЕПЛООБМЕННЫХ
АППАРАТОВ АЭС МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Ключевые слова: численное моделирование, вычислительная гидродинамика, турбулентная вязкость, математическая модель, уравнения Навье-Стокса.

Представлены результаты численного моделирования на базе экспериментального исследования гидродинамических характеристик однофазного закрученного потока воздуха в кольцевом канале, выполненном по принципу «труба в трубе» с внутренней спирально навитой трубой.

А.А. Добров, К.А. Мартынова, А.Е. Хробостов
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В
ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРА PWR С
ПРИМЕНЕНИЕМ КОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ГИДРОДИНАМИКИ

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплогидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В настоящей статье представлены результаты моделирования процессов теплопереноса в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за дистанционирующими решетками, снабжёнными дефлекторами перемешивающего типа. Расчёты проводились в программном комплексе Ansys CFX. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации конструкции ПР и повышения ее эффективности.

А.А. Добров, Ю.А. Фадеева, А.Е. Хробостов
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ В
ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR С ПРИМЕНЕНИЕМ CFD-
КОДОВ

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, теплогидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В данной статье приводятся результаты моделирования гидравлических процессов в тепловыделяющих сборках реакторов PWR за дистанционирующими решётками с дефлекторами перемешивающего типа. Полученные результаты используются для уточнения гидравлических характеристик потока теплоносителя при обосновании теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR.

Г.В. Ильиних, О.Ю. Сметанников
МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ШЕСТЕРЕННОГО НАСОСА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАЛОЖЕНИЯ
СЕТКИ

Ключевые слова: ANSYS CFX, течение с изменяемой геометрией, Immersed solid, шестеренный насос, уравнения Навье-Стокса, кавитация.

Представлен анализ использования технологии наложения сеток (Immersed solid) для моделирования работы шестеренного насоса в нестационарной постановке. С целью определения оптимальных параметров численного решения проведен ряд численных экспериментов по образованию кавитационных зон при течении воды в трубке с местным сопротивлением. Исследованы зоны кавитации, возникающие в ходе работы насоса. Проведена верификация численной модели.

S.M. Dmitriev, A.V. Mamayev, R.R. Ryazapov,
A.E. Sobornov, M.A. Legchanov, A.V. Kotin
APPLICATION OF SOFTWARE PACKAGES ANSYS CFX
AND LOGOS FOR SWIRLING FLOW ANALYSIS IN AN
ANNULUS WITH THE INNER SPIRAL WOUND TUBE OF
HEAT EXCHANGERS LOW POWER NUCLEAR PLANT
Keywords: numerical simulation, computational fluid
dynamics, turbulent viscosity, mathematical model, Navier-
Stokes equations

This paper presents the results of numerical modeling on the basis of experimental study of hydrodynamic characteristics of a single-phase swirling flow of air in the annular channel, performed on a "tube in tube" principle with an inner spiral wound tube.

A.A. Dobrov, K.A. Martynova, A.E. Khrobostov
MODELING OF THERMAL PROCESSES IN THE PWR
REACTOR FUEL ASSEMBLIES USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS CODES
Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, coolant heat
hydrodynamics, spacing grid.

This article presents the results of modeling coolant thermal processes in the PWR fuel assemblies downstream spacer grids with split type mixing vanes. The software Ansys CFX has been used for carrying out calculations. The results obtained can be used to optimize the spacer grids construction and to increase its effectiveness.

A.A. Dobrov, Y.A. Fadeeva, A.E. Khrobostov
MODELING OF HYDRAULIC PROCESSES IN THE PWR
REACTOR FUEL ASSEMBLIES USING CFD CODES
Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, coolant heat
hydrodynamics, spacing grid.

This article presents the results of modeling coolant hydraulic processes in the PWR fuel assemblies downstream spacer grids with split type mixing vanes. The results obtained are used to refine the hydraulic characteristics of the coolant flow during the justification of thermotechnical reliability of the PWR reactors cores.

G.V. Ilinykh, O.Yu. Smetannikov
MODELING OF GEAR PUMP WORK USING IMMERSED
SOLID METHOD

Keywords: ANSYS CFX, flow with variable geometry, Immersed solid, gear pump, Navier-Stokes equations, cavitation.

The analysis of the use of overlay grids (Immersed solid) technology to simulate the gear pump work in the unsteady formulation presented. Some numerical experiments on the formation of cavitation zones in the water flow throw the tube with local resistance were hold to determine the optimal parameters of the numerical solution. We investigated the cavitation zone, arising during the pump work. Verification of numerical model was implemented.

А.П. Карамышев, И.И. Некрасов, В.С. Паршин,
А.А. Федулов, А.Е. Чигринский
АНАЛИЗ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ И
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В
ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДА РАДИАЛЬНО-КОВОЧНОЙ
МАШИНЫ РКМ-45

Ключевые слова: РКМ-45, динамическая модель, неравномерность движения, коэффициенты динамичности. В работе представлены основы модели динамического нагружения радиально-ковочной машины РКМ-45, определены коэффициенты динамичности. Изложена методика определения коэффициента неравномерности движения.

А.В. Мамаев, Р.Р. Рязанов, А.Е. Соборнов,
А.В. Котин, Е.В. Пликин, Е.С. Кречетов, Л.Н. Храпунова
ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕМЕНТОВ ОБОРУДОВАНИЯ
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПРИ
ТЕРМОПУЛЬСАЦИЯХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Ключевые слова: экспериментальные исследования, неразрушающий контроль, термическая усталость. Представлены результаты экспериментального исследования по отработке методики неразрушающего контроля повреждений конструкционных материалов элементов оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ) при термической усталости с применением измерительно-вычислительного комплекса «АСТРОН».

И.М. Пышный
ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ
ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ ПУТЕМ ЛУБРИКАЦИИ

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, износ бандажей, повышение ресурса. Выполненный анализ лабораторных и натурных экспериментальных исследований интенсивности износа бандажей колесных пар позволил определить причины и способы повышения ресурса бандажей локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте, к которым можно отнести лубрикацию.

И.М. Пышный
ПРОДЛЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ХОДОВЫХ
ЧАСТЕЙ ЛОКОМОТИВОВ С ПОМОЩЬЮ
ТВЕРДОСМАЗОЧНЫХ СТЕРЖНЕЙ

Ключевые слова: промышленные локомотивы, колесные пары, износ бандажей, повышение ресурса. Выполненный анализ лабораторных и натурных экспериментальных исследований интенсивности износа бандажей колесных пар позволил определить причины и способы повышения ресурса бандажей локомотивов на промышленном железнодорожном транспорте, к которым можно отнести применение триботехнического состава.

В.В. Семашко, Л.В. Судник, Д.Ю. Мазалов, В.С. Ивашко
ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
МАШИН МЕТОДАМИ ИМПУЛЬСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

Ключевые слова: сварка взрывом, упрочнение, композиционный материал. В работе представлены результаты исследования экспериментальных образцов, изготовленных по технологии сварки взрывом и термообработанных по традиционной технологии с различными температурами отпуска. Отработаны оптимальные режимы сварки и термической обработки, обеспечивающие материал необходимыми физико-механическими и эксплуатационными свойствами. Установлено, что повышенная твердость и фрагментированная структура упрочненных слоев в многослойном изделии позволяет достичь высоких прочностных и вязкостных характеристик, а также минимизировать процесс абразивного изнашивания.

A.I. Karamyshev, I.I. Nekrasov, V.S. Parshin,
A.A. Fedulov, A.E. Chigrinskiy
THE ANALYSIS OF MOVEMENT IRREGULARITY AND
THE DEFINITION OF DYNAMIC LOADS IN ELEMENTS
OF THE RADIAL-FORGING MACHINE DRIVE
Keywords: RKM-45, dynamic model, movement irregularity, dynamic coefficients.

The basis of a dynamic load model for the radial-forging machine RKM-45 is presented in the study. Dynamic coefficients are determined. A method of a movement irregularity coefficient definition is described.

A.V. Mamayev, R.R. Ryazapov, A.E. Sobornov, A.V. Kotin,
E.V. Pliikin, E.S. Krechetov, L.N. Khrapunova
DAMAGE LEVEL CONTROL OF ENGINEERING
MATERIALS OF UNITS OF NUCLEAR PROPULSION AT
TEMPERATURE PULSATIONS BY ACOUSTIC METHOD
Keywords: experimental research, non-destructive testing, thermal fatigue

This paper presents the results of experimental research to develop methods of nondestructive testing of engineering materials damaged units of equipment for nuclear propulsion in the thermal fatigue with the use of measuring-computing complex "ASTRON".

I.M. Pishniy
LIFE EXTENSION OF RUNNING PARTS OF
LOCOMOTIVES BY MEANS LUBRICATION
Keywords: industrial engines, wheel pairs, wear bands, increase resource.

The analysis laboratory and field experimental studies wear bandages wheel sets intensity allowed us to determine the causes of and ways to improve resource bandages locomotives on industrial railway transport, which include lubrication.

I.M. Pishniy
LIFE EXTENSION OF RUNNING PARTS OF
LOCOMOTIVE BY THE SOLID STICKS
Keywords: industrial engines, wheel pairs, wear bands, increase resource.

The analysis laboratory and field experimental studies wear bandages wheelsets intensity allowed us to determine the causes of and ways to improve resource bandages locomotives on industrial railway transport, which include the use of tribological composition.

V.V. Semashko, L.V. Sudnik, D.IU. Mazalov, V.S. Ivashko
INCREASE OF OPERATING PARAMETERS OF
WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MASHINES BY
PULSE HARDENING METHODS
Keywords: explosion welding, hardening, multilayer composite.

Studies of experimental samples made by explosion welding technology and treated by traditional technology with different tempering temperatures have been carried out. Optimal welding conditions and heat treatment have been fulfilled providing material with necessary physical-mechanical and operating properties. It has been found that the increased hardness and fragmented structure of hardened layers in a multilayer composite allow to achieve high strength and viscosity characteristics as well as minimize the process of abrasive wear.

О.Ю. Сметанников, Г.В. Ильиных, Т.А. Смертина
МНОГОУРОВНЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АРМИРУЮЩЕГО
КАРКАСА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ключевые слова: Многоуровневая модель, композиционный материал, вычислительная гидродинамика.

Представлено многоуровневое исследование фильтрационных свойств армирующего каркаса полимерных композитов. Принятый подход основан на применении моделей механики многофазной жидкости на трех масштабных уровнях: уровень волокна, уровень ткани, уровень многослойной выкладки. Верхний уровень соответствует техпроцессу инфузии или пропитки под давлением. Численные модели реализованы в виде универсальных макросов САЕ пакета Ansys. Показано удовлетворительное соответствие данным эксперимента, по которым проведена верификация модели.

А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев, А.В. Котин,
Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧИСЛЕННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ
ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ

Ключевые слова: численное моделирование, модель турбулентности, интенсификация теплообмена.

В работе представлены результаты численного моделирования теплогидравлических процессов в каналах теплообменного оборудования ЯЭУ с ленточными интенсификаторами различной геометрии.

А.Е. Соборнов, С.М. Дмитриев, А.В. Котин,
Р.Р. Рязанов, А.В. Мамаев, М.А. Легчанов
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРИМЕНЕНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ
РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ
ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ТЕПЛООБМЕННОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ

Ключевые слова: оценка эффективности, интенсификация теплообмена, гидравлическое сопротивление.

В работе представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию теплогидравлических процессов в каналах теплообменного оборудования ЯЭУ с ленточными интенсификаторами различной геометрии.

А.Е. Хробостов, А.В. Варенцов, Н.С. Волков,
Н.П. Курбатова, А.Н. Терехин
ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В
ТВС-КВАДРАТ РЕАКТОРА PWR ПРИ ПОСТАНОВКЕ
ПЕРЕМЕШИВАЮЩИХ ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИХ
РЕШЕТОК С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ДЕФЛЕКТОРОВ

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая дистанционирующая решетка.

В работе представлены комплексные исследования по определению гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реактора PWR при постановке перемешивающих дистанционирующих решеток с различными типами дефлекторов.

O.Yu. Smetannikov, G.V. Ilinykh, T.A. Smertina
MULTILEVEL RESEARCH OF FILTRATION
PROPERTIES OF FIBER REINFORCED POLYMERS

Keywords: Multilevel research, composite material, computational fluid dynamics.

Multilevel research of filtration properties of fiber reinforced polymers, which contains numerical three-level models of multiphase fluid mechanics is considered. Research is based on three levels: fiber level, fabric level and multilayer composite level. Parameters and conditions of the level are match known experimental data, which are used for model verification. The process of matrix molding of multilayer fiber reinforced polymers is studied at last level. Ansys macros are used to implement multilevel research.

A.E. Sobornov, S.M. Dmitriev, A.V. Kotin,
R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev
NUMERICAL EVALUATION OF HEAT TRANSFER
INTENSIFICATION EFFICIENCY IN NPP CHANNELS
WITH TWISTED METALLIC BANDS

Keywords: numerical modeling, turbulence model, heat transfer intensification.

This paper presents the results of numerical modeling of heat transfer and pressure drop of coolant flow in npp channels with twisted metallic bands.

A.E. Sobornov, S.M. Dmitriev, A.V. Kotin,
R.R. Ryazapov, A.V. Mamaev, M.A. Legchanov
EXPERIMENTAL EVALUATION OF HEAT TRANSFER
INTENSIFICATION EFFICIENCY IN NPP CHANNELS
WITH DIFFERENT TWISTED METALLIC BANDS

Keywords: evaluation of efficiency, heat transfer intensification, pressure drop.

This paper presents the results of experimental researches of heat transfer and pressure drop of coolant flow in npp channels with different twisted metallic bands.

A.E. Khrobostov, A.V. Varentsov, N.S. Volkov,
N.P. Kurbatova, A.N. Terechin
EXPERIMENTAL STUDY OF LOCAL HYDRODYNAMICS
OF THE COOLANT IN THE FUEL ASSEMBLY OF
SQUARE PWR WHEN SETTING MIXING
DISTANTSIONNAYA LATTICES WITH VARIOUS TYPES
OF DEFLECTORS

Keywords: nuclear reactor, fuel assembly, coolant flow hydrodynamics, mixing distantSIONNAYA lattice.

The paper presents a comprehensive study on the determination of the hydrodynamic characteristics of the coolant flow in the fuel Assembly of PWR when setting mixing grid with different types of baffles.

А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов
АДАПТАЦИЯ МЕТОДА МАТРИЧНОЙ
КОНДУКТОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
СМЕШЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОТОКОВ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РЕАКТОРНЫМ
УСТАНОВКАМ

Ключевые слова: измерительная система, кондуктометрия, ядерный реактор, гидродинамика теплоносителя, турбулентные потоки.

Рассмотрены принципы действия измерительных систем с использованием матричных кондуктометров. Дано описание созданной измерительной системы и экспериментального стенда. Разработаны методики исследований, проведены первичные эксперименты. Созданный лабораторно-методический комплекс адаптирован к проведению модельных исследований гидродинамики в реакторных установках.

А.А. Баринов, С.М. Дмитриев, А.Е. Хробостов
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОЙ
ДИФФУЗИИ СОЛЕВОЙ ПРИМЕСИ В ПОТОКЕ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ

Ключевые слова: турбулентная диффузия, смешение потоков, кондуктометрия, ядерный реактор, гидродинамика теплоносителя.

Проведено исследование характерных особенностей турбулентной диффузии примеси в экспериментальной модели при помощи метода матричной кондуктометрии. Получено хорошее согласие полученных оценок осредненных характеристик потока с данными других исследователей. Выполнены замеры по определению характеристик турбулентных вихревых структур. По результатам данных исследований оценены временные и геометрические масштабы вихрей, распределения спектральной плотности энергии турбулентности в ядре потока.

Д.С. Мукатин, И.В. Нелин, Д.А. Смирнов
СИСТЕМА РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩАЯ
ЧЕРЕДОВАНИЕ СВЕРТОЧНЫХ КОДОВ

Ключевые слова: сверточный код, радиосвязь, чередование кодовых последовательностей, помехозащищенность.

Рассматривается возможность увеличения пропускной способности радиоканала, в котором применяются методы добавления избыточной информации для увеличения вероятности правильного приёма информационного сообщения. Увеличение помехоустойчивости канала связи, как правило, связано с уменьшением пропускной способности. Предложен метод динамического изменения пропускной способности канала связи в зависимости от условий передачи информации.

А.Е. Терлыч, И.И. Аликина
РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ
КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ
ЖИЛАМИ

Ключевые слова: кабель с секторными жилами, электрическая емкость кабеля, моделирование.

Предложены зависимости для инженерных расчетов частичных емкостей кабелей с секторными жилами как функции от сечения жилы и толщины изоляции, а также методика получения подобных выражений на основе регрессионного анализа результатов численного моделирования электрического поля в кабеле, полученных в среде инженерных расчетов ANSOFT Maxwell.

A.A. Barinov, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov
MATRIX CONDUCTOMETRY METHOD ADAPTION TO
INVESTIGATION OF TURBULENT COOLANT FLOW
MIXING AS APPLIED TO NUCLEAR POWER UNITS

Keywords: measuring system, conductometry, nuclear reactor, coolant hydrodynamics, turbulent flows.

Operating principles of conductometry systems using the matrix-type conductometers were observed. The description of created measuring system and experimental circuit was done. Investigation methods were developed, primary experiments were carried out. Created testing and methodical basis was adopted for hydrodynamical modeling as applied to nuclear power units.

A.A. Barinov, S.M. Dmitriev, A.E. Khrobostov
EXPERIMENTAL INVESTIGATION RESULTS OF SALT
ADDITIVE TURBULENT DIFFUSION IN COOLANT
FLOW USING SPATIAL CONDUCTOMETRY SENSORS

Keywords: turbulent diffusion, flow mixing, conductometry, nuclear reactor, coolant hydrodynamics.

Investigation of turbulent diffusion characteristic features in experimental model was carried out by means of matrix conductometry method. Good agreement with other investigations was obtained. Measurements to define characteristics of turbulent structures were done. Postprocessing of the test data made it possible to estimate temporal and spatial scales of vortices, turbulence energy spectral density distribution in the core of the flow.

D.A. Mukatin, I.V. Nelin, D.A. Smirnov
COMMUNICATION SYSTEM USING THE
ALTERNATION OF CONVOLUTIONAL CODES

Keywords: convolutional code, telecommunication, interleaving of code sequences, noise immunity.

The article considers the possibility of increasing the bandwidth of the radio channel, which apply methods add redundant information to increase the probability of correct reception of the information message. Increase noise immunity of the communication channel, usually associated with a decrease in throughput. The proposed method dynamically changes the bandwidth of the communication channel depending on the conditions of information transmission.

A.E. Terlich, I.I. Alikina
CALCULATION OF THE ELECTRIC CAPACITY OF THE
POWER CABLE WITH SECTOR CORES

Keywords: cable with sector conductors, the electrical capacitance of the cable, modeling.

Dependences for engineering calculations of partial capacities cables with sector conductors as a function of the cross section of the core and the thickness of insulation, as well as the procedure for the preparation of such statements, based on regression analysis of numerical simulation of the electric field results in a cable obtained in a medium of engineering calculations ANSOFT Maxwell.

В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров,
В.А. Шакура, Е.В. Ильченко
**ВЫЯВЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ
УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ
КАВИТАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКОЙ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ АБСОРБЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Ключевые слова: ультразвук, абсорбция, газовая смесь,
конструкция, трубчатый рабочий инструмент.

В статье предложена конструкция ультразвукового излучателя с трубчатым рабочим инструментом для интенсификации абсорбции. Путём конечно-элементного анализа колебаний разработанной конструкции установлено, что для обеспечения равномерного распределения колебаний масса утолщения в месте крепления рабочего инструмента к концентратору должна составлять половину массы ультразвукового излучателя. Разработанная конструкция может служить основой для изготовления лабораторного или промышленного образца излучателя для ускорения абсорбции.

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских,
В.А. Нестеров, Р.Н. Голых
**СПОСОБ КАВИТАЦИОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ ВЯЗКИХ
ЖИДКОСТЕЙ**

Ключевые слова: ультразвук, распыление, вязкие жидкости,
физическая модель, кавитация, оптимальные режимы.

В статье рассмотрен способ кавитационного ультразвукового (УЗ) распыления вязких жидкостей. Для объяснения физических явлений происходящих в распыляемой жидкости, предлагается модель. Она описывает поэтапное преобразование энергии механических колебаний ультразвуковой частоты в энергию капиллярных волн, затрачиваемую на увеличение свободной поверхности жидкости, т.е. образование капель.

В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских,
Р.Н. Голых, К.В. Шалунова, А.А. Нестеров
**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АНИЗОТРОПИИ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ
ДИСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

Ключевые слова: ультразвук, дисковый излучатель,
резонансная частота, амплитуда, анизотропия
механических свойств.

Статья посвящена исследованию влияния анизотропии механических свойств материала на распределение колебаний ультразвуковых дисковых излучателей. Такие излучатели предназначены для создания высокоинтенсивных колебаний в газодисперсных средах. В результате исследований установлено, что при 4,5 % анизотропии происходит снижение равномерности амплитуд колебаний более чем в 5 раз.

И.З. Ахметзянов, В.С. Каримов
**АНАЛИТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ КВАЗИАДАПТИВНОЙ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ
ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ ПО ВХОДУ ПРИ
НЕДОСТУПНОСТИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЕКТОРА
СОСТОЯНИЯ**

Ключевые слова: наблюдатель полного порядка, объект
управления, запаздывания по входу, компенсация
запаздываний, технология вложения систем.

Было найдено аналитическое решение задачи синтеза квазиадаптивной системы автоматического управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по входу на основе технологии вложения систем. Наблюдатель полного порядка применялся для воспроизведения вектора состояния объекта. Получено множество решений задачи синтеза с условиями существования этих решений.

V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov,
V.A. Shakura, E.V. Ilchenko

**EVALUATION OF OPTIMUM CONSTRUCTION OF
ULTRASONIC RADIATOR FOR CAVITATION AND
ACOUSTIC INTENSIFICATION OF ABSORPTION
PROCESSES BY METHODS OF COMPUTER MODELING**

Index Terms: ultrasound, absorption, gaseous mixture,
construction, tube working instrument.

The paper was proposed construction of ultrasonic radiator with tube work instrument for absorption intensification. Finite element analysis was shown that mass of thick element in joining between instrument and concentrator must be half of mass of ultrasonic radiator. The developed construction can be used for making laboratory and industrial sample.

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.S. Dorovskikh,
V.A. Nesterov, R.N. Golykh
**THE PROCESS OF CAVITATION SPRAYING VISCOUS
LIQUIDS**

Keywords: ultrasound, spray, viscous liquids, the physical
model, cavitation, optimal modes.

The article describes the method of cavitation ultrasound spraying viscous liquids. For an explanation of the physical phenomena occurring in the sprayed liquid, the authors propose a model. It describes the gradual transformation of the mechanical energy of ultrasonic frequency vibrations into energy capillary waves expended to increase the free surface of the liquid – formation of drops.

V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, V.A. Nesterov,
R.S. Dorovskikh, R.N. Golykh, K.V. Shalunova, A.A. Nesterov
**STUDY OF THE INFLUENCE OF THE ANISOTROPY OF
THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL
ON THE DISTRIBUTION OF ULTRASONIC VIBRATIONS
DISK RADIATORS**

Keywords: ultrasound, transducer disk, resonance frequency,
amplitude, anisotropy of mechanical properties.

The article investigates the influence of the anisotropy of the mechanical properties of the material on the distribution of ultrasonic vibrations of disk radiators. The radiators are necessary for creating high-intensity vibrations in the gas-dispersed environments. As a result, studies show that at 4,5% reduction in anisotropy occurs uniform oscillation amplitude is more than 5 times.

I.Z. Ahmetzyanov, V.S. Karimov
**ANALYTICAL SYNTHESIS OF THE QUASIADAPTIVE
CONTROL SYSTEM OF THE MULTIVARIABLE PLANT
WITH DELAYS IN THE INPUT AT INACCESSIBILITY TO
MEASUREMENT OF THE VECTOR OF THE STATE**

Keywords: observer of complete order, control plant, delays on
input, compensating of delays, embedded technology systems.

It was proposed an analytical solution to the problem of synthesis of quasiadaptive automatic control system with a reference model for multivariable controlled plant with time delays on the input on basis of system embedding technology. The observer of a full order was applied to reproduction of a state vector of plant. Were calculated the algebraically expressions, which to determine solution set of problem design and existence conditions this solution.

А.В. Бабушкина, В.Я. Модорский, А.Ф. Шмаков
НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В МОДЕЛЬНОМ
ЦЕНТРОБЕЖНОМ КОМПРЕССОРЕ

Ключевые слова: центробежный компрессор, газоперекачивающие агрегаты, система инженерного анализа ANSYS, тепловой анализ, оценка напряженно-деформированного состояния, численное моделирование.

В работе представлены результаты численного моделирования газодинамического процесса в модельном центробежном компрессоре в нестационарной постановке с учетом переноса тепловых нагрузок и нагрузок по давлению на стенд установки для дальнейшей оценки его теплового и напряженно-деформированного состояний. Расчеты проведены для диапазона параметров работы компрессорной установки от 6000 об/мин до 10000 об/мин вращения рабочего колеса. Разработана инженерная методика численного моделирования нестационарных газодинамических процессов в модельном центробежном компрессоре.

Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, Д.В. Тундыков
ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ
ИМПУЛЬСОВ НАПЯЖЕНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ
ФОРМЫ НА ПЛИС

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, ПЛИС, ЦАП, интерфейс SPI, отладочная плата, язык VHDL, BAX, диод.

Статья посвящена разработке программы для формирования 12-разрядных цифровых кодов в составе 32-разрядного протокола передачи данных, передаваемого по интерфейсу SPI (Serial Peripheral Interface) от программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) XC3S500E Xilinx Spartan-3E на ИМС цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) LTC2624 в составе отладочной платы NI Digital Electronics FPGA Board. Рассматривается создание программного модуля на языке VHDL при помощи специализированного программного обеспечения WebPACK ISE фирмы Xilinx.

Д.В. Вожегов, Д.А. Страбыкин
МЕТОД ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ДЕДУКТИВНОГО
ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ЗАКЛЮЧЕНИЙ В
ИСЧИСЛЕНИИ ПРЕДИКАТОВ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ
ФАКТОВ

Ключевые слова: дедуктивный логический вывод, исчисление предикатов, определение фактов, параллельные вычисления. Дается формальная постановка задачи и предлагается метод параллельного дедуктивного вывода заключений в исчислении предикатов с определением фактов. Приводится пример логического вывода, отмечаются достоинства метода.

Л.В. Галина, Д.А. Проскурин, А.С. Русяев
ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ВЫСОКОАВТОМАТИЗИРОВАННЫХ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

Ключевые слова: эффективность производства, имитационное моделирование, производственная система. Настоящая статья посвящена исследованию вопроса оценки эффективности производственных систем. Рассмотрены два метода – аналитический расчет и компьютерное моделирование. Приведены результаты имитационного моделирования, позволившие получить математические модели применимые для оперативной оценки эффективности работы производственной системы при проектировании нового изделия на этапе подготовки производства.

A.V. Babushkina, V.Ya. Modorskii, A.F. Shmakov
NUMERICAL MODELING OF GASDYNAMIC
PROCESSES AND PROCESSES OF DEFORMATION IN
COMPRESSOR OF MODEL TEST BENCH OF THE GAS-
DISTRIBUTING UNIT

Keywords: radial compressor, gas compressor units, system engineering analysis ANSYS, thermal analysis, assessment of stress-strained state, numerical modeling.

The results of numerical modeling of gas-dynamic processes in the modeling centrifugal compressor in the unsteady formulation are provided. Calculation was carried out taking into account the transfer of thermal loads and pressure loads for the evaluation of the thermal and stress-strain state of the stand. The calculations were performed for the compressor installation options range from 6000 rev / min to 10,000 rev / min the impeller rotation. Developed engineering method for numerical simulation of such processes.

N.N. Bespalov, Y.V. Goryachkin, D.V. Tundukov
SOFTWARE IMPLEMENTATION CONTROL PULSE
VOLTAGE OF SQUARE WAVE FPGA

Keywords: hardware and software complex, FPGA, DAC, interface SPI, debug board, VHDL language, I–V curve, diode. The article is devoted to the development of the program to form a 12-bit digital codes as a part a 32-bit data transfer protocol transmitted via SPI (Serial Peripheral Interface) from a Field-Programmable Gate Array (FPGA) XC3S500E Xilinx Spartan-3E on IC digital-to-analog converter (DAC) LTC2624 evaluation board as a part NI Digital Electronics FPGA board. Consider the creation of a software module in VHDL language using specialized software WebPACK ISE Xilinx company.

D.V. Vozhegov, D.A. Strabikin
THE PARALLEL METHOD INFERENCE IN PREDICATE
CALCULUS WITH FACTS DETERMINATION

Keywords: deductive inference, determination of the facts, predicate calculus, parallel computing.

Describes formal statement of the problem and proposes method of inference in predicate calculus with facts determination. Presents example of inference, explains advantages of method.

L.V. Galina, D.A. Proskurin, A.S. Rusyaev
THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING IN
ASSESSING THE EFFICIENCY OF HIGHLY
AUTOMATED PRODUCTION SYSTEMS

Keywords: the efficiency of production, simulation modeling, manufacturing system.

This article investigates the question of performance analysis of production systems. Discusses two methods – the analytic calculation and computer simulation. The results of simulation, which allowed us to obtain mathematical models applicable to operational assessment of the efficiency of the production system when designing a new product at the stage of preparation of production.

В.Г. Дегтярь, В.И. Пегов, А.Д. Чешко
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАПУСКА РЕАКТИВНОГО
ДВИГАТЕЛЯ В ВОДЕ

Ключевые слова: ракета, подводная лодка, реактивный двигатель, моделирование, эксперимент.

Разработаны методы расчёта и экспериментальных исследований на моделях избыточного давления при запуске реактивного двигателя ракеты в воде и в затопленной водой шахте подводной лодки. Вызванное нестационарное течение жидкости предполагается потенциальным, а газ – совершенным. Решение задачи сводится при этом к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих истечение идеальной жидкости из отверстий различных конфигураций в безграничную жидкость, методом Рунге-Кутты четвёртого порядка точности. Достоверность разработанных методов расчёта подтверждается полученными результатами экспериментов.

А.А. Денисевич, Е.В. Ефремов, М.И. Грачев
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА
ПРЕССОВАНИЯ ТАБЛЕТОК ПРИ ФАБРИКАЦИИ СНУП-
ТОПЛИВА

Ключевые слова: математическая модель, карботермический синтез, СНУП-топливо.

Работа посвящена математическому описанию процесса прессования топливных таблеток для изготовления твэлов при фабрикации СНУП-топлива в рамках проекта «Прорыв». Рассмотрен дискретно-контактный подход при построении модели.

С.Л. Калюлин, В.Я. Модорский, Р.В. Бульбович
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОТОКА В ЗАМКНУТОЙ
МАЛОГАБАРИТНОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Ключевые слова: малогабаритная аэродинамическая труба, численное моделирование, газодинамический поток, спрямляющие решетки, ANSYS CFX.

Для экспериментального изучения аэродинамических процессов, протекающих при обтекании тел потоком газа, поиска оптимальных конструкций летательных аппаратов и верификации расчетных моделей, широко используются испытания в аэродинамических трубах. Климатических аэродинамических труб (КАДТ) в нашей стране недостаточно, при этом можно отметить большой объем зарубежных исследований с использованием КАДТ. В данной работе предпринята попытка разработки методики проектирования малогабаритной КАДТ замкнутого цикла, не требующей больших финансовых затрат при эксплуатации. При этом предполагается использование высокопроизводительного вычислительного комплекса Пермского национального исследовательского политехнического университета (ВВК ПНИПУ) для верификации численных моделей процессов КАДТ и масштабирования их для реальных конструкций. В данной статье рассмотрен первый этап работы – моделирование газодинамического потока в замкнутой КАДТ переменного сечения с учетом влияния спрямляющих решеток на газодинамические характеристики потока.

В.С. Каримов, В.Б. Рождественская
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА И
АНАЛИЗА ТЕКСТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТИ
ИНТЕРНЕТ

Ключевые слова: интеллектуальный алгоритм, поиск и анализ информации, карты Кохонена, методы ранжирования VSM и BM25F.

Был разработан интеллектуальный алгоритм поиска и анализа тестовой информации в сети интернет. Алгоритм был реализован в виде программного комплекса на языках

V.G. Degtiar, V.I. Pegov, A.D. Cheshko
INVESTIGATION OF IGNITION OF A SUBMERGED JET
ENGINE

Keywords: missile, submarine, jet engine, ignition of an engine, launch from underwaters, modeling, experiment.

Analytical methods and experimental methodologies for the study of overpressure are developed for a jet engine ignited in waters or in a waterlog silo of a submarine. The resulted nonstationary flow of the fluid is assumed to be potential with an ideal gas. Thus, the task is reduced to the integration of a system of standard differential equations describing the outflow of an ideal fluid from holes of various configurations into an unlimited fluid with the Runge-Kutta method of the fourth order. The developed methods are validated by experiential results.

A.A. Denisevich, E.V. Efremov, M.I. Grachev
MATHEMATICAL MODEL OF TABLET PRESSING
PROCESS IN FABRICATION OF MNUP-FUEL

Keywords: mathematical model, carbothermic synthesis, MNUP-fuel.

This paper is devoted to mathematical description of tablet pressing process for producing fuel elements during fabrication of MNUP-fuel within the project «Breakout». Considered discrete-contact approach in constructing of this model.

S.L. Kalyulin, V.Ya. Modorskii, R.V. Bulbovich
NUMERICAL SIMULATION OF GAS-DYNAMIC FLOW
IN A SMALL-SIZED WIND TUNNEL

Keywords: small-sized wind tunnel, numerical simulation, gas-dynamic flow, rectifying lattice, ANSYS CFX.

Testing in wind tunnels is widely used for experimental research of aerodynamic processes for bodies undergoing gas-dynamic flows, for selection of optimal structures of aircrafts and verification of computing models. There number of climatic wind tunnels in our country is not enough; however, there are a lot of foreign researches related to them. The paper undertakes to develop a method for designing a closed-cycle small-sized wind tunnel which requires no high operational expenses. High performance computing system of Perm National Research Polytechnic University will be used to verify numerical models of wind tunnel processes and scaling them for real structures. The paper considers the first step of work, i.e. simulation of gas-dynamic flow in a closed cycle wind tunnel of variable section, considering the influence of rectifying lattices on flow gas-dynamic characteristics.

V.S. Karimov, V.B. Rozhdestvenskaya
INTELLECTUAL SEARCH ALGORITHM AND ANALYSIS
OF TEXT INFORMATION ON THE INTERNET

Keywords: intellectual algorithm, search and information analysis, Kohonen's cards, methods of ranging of VSM and BM25F

Intellectual search algorithm and the analysis of test information on the Internet was developed. The algorithm was realized in the form of a program complex in programming languages C++, C# and php on the basis of the analysis of text

программирования C++, C# и php на основе анализа текстовой информации с помощью самоорганизующихся карт Кохонена. Ранжирование тестовой информации для выдачи её пользователю проводилось с помощью методов VSM и BM25F.

В.В. Киселев, Л.Г. Бабушкина, В.Д. Володин, А.А. Шаронов
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОММУТАЦИОННОГО
БЛОКА КРАНО-МАНИПУЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Ключевые слова: крано-манипуляторная установка, микропроцессорное управление, программное обеспечение, формирование управляющих сигналов.

В статье приводятся результаты разработки программного обеспечения для микропроцессорной системы управления крано-манипуляторной установкой. Рассмотрены подробно два главных участка программы: считывание и усреднение показаний датчиков положения рукоятки и формирование управляющих сигналов для гидрораспределителей. Представлены схемы блока сопряжения с датчиком положения управляющей рукоятки, формирователя управляющего напряжения и методика расчета управляющего напряжения.

Э.Ю. Курчатова, Д.Е. Чикрин, П.А. Кокунин, Д.В. Бережной,
И.Г. Галиуллин, А.Н. Степанов, Н.В. Харченко
РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В СУПЕРМАХОВИКАХ

Ключевые слова: маховик, удельная энергоемкость, кинетическая энергия.

В работе получено точное решение задачи вращения супермаховика, изготовленного путем насадки семейства концентрических цилиндров друг на друга с постоянным натягом. Отмечено увеличение удельной энергоемкости супермаховика при уменьшении относительного радиуса внутреннего отверстия в маховике и при увеличении коэффициента Пуассона материала супермаховика.

Э.Ю. Курчатова, Д.Е. Чикрин, П.А. Кокунин, Д.В. Бережной,
И.Г. Галиуллин, А.Н. Степанов, Н.В. Харченко
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОУСТАНОВОК
ДЛЯ СИСТЕМ С ВЫСОКИМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К
КАЧЕСТВУ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Ключевые слова: моделирование, эффективное функционирование, эксплуатация сетей, сложные системы, система маховик-кожух, удельная энергоемкость, кинетическая энергия, повышение эффективности технических систем, оценка эффективности сложных систем.

В работе рассматривается способ повышения эффективности энергоустановок для систем с высокими требованиями к качеству энергоснабжения, таких как телекоммуникационные сети, узлы связи и центры обработки данных. Увеличение эффективности энергоустановок обеспечивается за счет использования взаимодействия в системе маховик-кожух посредством потенциального поля постоянных магнитов. Приведены схемы конструкции, математическая модель и результаты математического моделирования.

Т.И. Синельникова, Н.А. Швецова
РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОВ СИСТЕМОЛОГИИ
ЭПИСТЕМОЛОГИЧЕСКОГО УРОВНЯ ПОРОЖДАЮЩИХ
СИСТЕМ

Ключевые слова: системология, автоматизация решения задач, эпистемологический уровень порождающих систем. Дан краткий обзор метода поиска оптимальной системы эпистемологического уровня порождающих систем, предназначенного для автоматизации решения системных задач. В статье представлена программная реализация метода, разработанная на основе авторского алгоритма.

information by means of the self-organized Kohonen's cards. Ranging of test information for output to its user was carried out by means of the VSM and BM25F methods.

V.V. Kiselev, L.G. Babushkina, V.D. Volodin, A.A. Sharonov
SWITCHING CENTER SOFTWARE OF CRANE
MANIPULATOR

Keywords: crane manipulator, microprocessor control, software, control signal formation.

The article presents the results of software development for microprocessor system to control crane manipulator. There is analysis of two parts of the software: reading and averaging indicators of handle position sensors and the second - control signal formation for hydraulic distributor. The article also describes a microcontroller interface circuit, the unit generating control voltage and the algorithm for calculating control voltage.

E.Yu. Kurchatov, D.E. Chickrin, P.A. Kokunin,
D.V. Berezhnoi, I.G. Galiullin, A.N. Stepanov,
N.V. Kharchenko

CALCULATION OF STRESSES IN SUPERFLYWHEEL

Keywords: flywheel, specific energy capacity, kinetic energy.

In this work was obtained the exact solution of a problem of rotation of the superflywheel, which was made by a packing of family of concentric cylinders at each other with a constant tightness. It was noted the increase in power capacity of a superflywheel while reducing of relative radius of an internal opening in a flywheel and with increasing the coefficient of Poisson of superflywheel material.

E.Yu. Kurchatov, D.E. Chickrin, P.A. Kokunin,
D.V. Berezhnoi, I.G. Galiullin, A.N. Stepanov,
N.V. Kharchenko

IMPROVING THE EFFICIENCY OF POWER SYSTEMS
WITH HIGH DEMANDS ON QUALITY OF POWER
SUPPLY

Keywords: modeling, efficient functioning, operation of networks, complex systems, the system-flywheel housing, specific energy, kinetic energy, increasing the efficiency of technical systems, evaluation of complex systems.

The paper deals with a method of increasing the efficiency of power plants for systems with high demands on the quality of power supply, such as telecommunication networks, communication nodes and data centers. Increasing the efficiency of power plants is ensured by the use of interactions in the system, the flywheel housing through the potential field of the permanent magnets. Results circuit design, mathematical model and the results of mathematical modeling.

T.I. Sinelnikova, N.A. Shvetsova
REALIZATION OF SYSTEM SCIENCE METHODS OF
EPISTEMOLOGICAL LEVEL OF GENERATIVE SYSTEMS

Keywords: system science, automation of systems problem solving, epistemological level of generative systems.

A short review of optimal system of epistemological level of generative systems search method is given. The method is destined for automation of systems problem solving. The article presents the software implementation of the method on the basis of the author's algorithm.

Е.В. Спиридонова
КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕШЕНИЙ
КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ
ПОСТАНОВКЕ

Ключевые слова: теория трещин, метод разрывных смещений, смешанные краевые условия.

В работе проведен качественный анализ численных решений краевых задач теории трещин со смешанными краевыми условиями. Решение задач осуществлялось методом разрывных смещений. Установлены закономерности смещений берегов трещины в продольном и поперечном направлениях, при варьировании значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона в широком диапазоне допустимых значений.

А.Ф. Шмаков, В.Я. Модорский
ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЗОРОВ В ЛАБИРИНТНЫХ
УПЛОТНЕНИЯХ ПРИ ДЕЙСТВИИ
ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК В FSI
ПОСТАНОВКЕ

Ключевые слова: напряженно-деформированного состояние, численное моделирование, лабиринтное уплотнение, FSI, газоперекачивающий агрегат.

В данной работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции лабиринтных уплотнений в зоне лабиринтных уплотнений рабочих колес модельного трехступенчатого компрессора газоперекачивающего агрегата. Разработана методика анализа влияния потока перекачиваемого газа на деформации конструкции. Получены результаты оценки напряженно-деформированного состояния конструкций лабиринтных уплотнений в зоне рабочих колес от действия давления, температуры.

В.А. Щапов
SCIMQ: ТЕХНОЛОГИИ СЕРВИСА ОБРАБОТКИ
ИНТЕНСИВНЫХ ПОТОКОВ ДАННЫХ

Ключевые слова: суперкомпьютер, обработка потоков данных, linux, SciMQ, облачные вычисления.

В работе описаны технологии, реализованные и используемые в создаваемом сервисе обработки интенсивных потоков экспериментальных данных. Разработка собственных программных решений позволила повысить эффективность использования доступных аппаратных ресурсов, тем самым позволяя решать более ресурсоемкие задачи. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-37-60043.

О.В. Щекочихин, В.В. Шведенко, П.В. Шведенко
ОНТОЛОГИЯ ПОНЯТИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ С ПОВЕДЕНИЕМ

Ключевые слова: интегрированная информационная система, интеллектуальная информационная система, поведение информационной системы.

Описывается онтология понятий, используемых при описании информационных систем с поведением, дано понятие модель поведения, представлена концептуальная модель интеллектуальной информационной системы с поведением.

Е.В. Spiridonova
QUALITATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL SOLUTIONS
OF BOUNDARY VALUE PROBLEMS THEORY OF
CRACKS IN THE MIXED STATEMENT

Keywords: crack theory, the method of discontinuous shifts, mixed boundary conditions.

Qualitative analysis of numerical solutions of boundary value problems of the theory of cracks in the work carried out with mixed boundary conditions. Problem solving was performed by discontinuous shifts. The regularities of the displacement of the crack in the longitudinal and transverse directions, by varying the values of Young's modulus and Poisson's ratio in a broad range of acceptable values.

А.Ф. Shmakov, V.Ya. Modorskiy
RESEARCH GAPS IN LABYRINTH SEAL FROM THE
ACTIONS GASDYNAMIC AND THERMAL LOADS IN FSI
FORMULATION

Keywords: stress-strain state, numerical simulation, labyrinth seal, FSI, coupled analysis, gas pumping unit

This paper presents the results of numerical modeling estimation of stress-strain state of structure in the area of the labyrinth seals labyrinth seals near impellers of model three-stage compressor pumping unit. A method for analyzing of influence the flow of the pumped gas in the deformation of the structure was developed. Results of the evaluation of the stress-strain state of structures in the area of the labyrinth seals of impellers on the pressure action of temperature is obtained.

V.A. Shchapov
SCIMQ: TECHNOLOGIES FOR INTENSIVE DATA FLOW
PROCESSING SERVICES

Keywords: supercomputer, data flow processing, linux, SciMQ, cloud computing.

We describe technologies implemented and used in a software service being designed for processing intensive experimental data flows. We also create our own software solutions to meet our customers' expectations. This ensures a more efficient use of the available hardware resources and, consequently, the execution of different resource-intensive tasks. This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 16-37-60043).

O.V. Schekochikhin, V.V. Shvedenko, P.V. Shvedenko
ONTOLOGY CONCEPTS OF INFORMATION SYSTEM
BEHAVIOR

Keywords: integrated information system, intelligent information system, information system behavior

Ontology describes the concepts used in the description of the information systems behavior, given to the concept of pattern of behavior, a conceptual model of intelligent information systems behavior.

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ

№5 2016

Направления:

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

**05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И
МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**05.11.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ПРИБОРОСТРОЕНИЕ,
МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

**05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

www.ntvp.ru

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 21.10.2016 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

13,3 усл.печ.л. 15,3 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 2103.

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»