

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№1 2019

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

2019

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №1 2019г. – Казань:
ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – 138 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.А. Жихарев – д.ф.-м.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, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

К.Г. Николаев, Б.Н. Иванов, Э.Р. Магдеев, Р.Х. Шагимуллин, В.С. Минкин ХИМИЧЕСКИЙ И ФИЗИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ СООБЩЕНИЕ 1. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ	8
--	---

01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА

М.М. Сорокина О СУЩЕСТВОВАНИИ $\mathcal{F}\Omega$ -ПРОЕКТОРОВ В КОНЕЧНЫХ ГРУППАХ	12
Е.В. Спиридонова, Н.А. Гамова, Н.В. Кулиш, И.П. Томина ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ И СТАГНАЦИИ ПЛОСКИХ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ ПОСТАНОВКЕ	15
В.Г. Шармин, Д.В. Шармин, Е.А. Дмитриева СТРОЕНИЕ МНОЖЕСТВА АКСИАЛЬНЫХ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ БЕЗ КРУЧЕНИЯ	19
А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов, Л.А. Гайнуллова МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНО - СИММЕТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ	21

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Г.Е. Бордина, Н.П. Лопина, Е.Г. Некрасова, Е.В. Ожимкова, А.Е. Соболев ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ	26
Н.Я. Есина, М.Н. Курасова, О.И. Андреева, М.В. Тачаев, И.И. Кожухова, Ци Шэнхуа, А.А. Годзишевская, Е.С. Митрофанова КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ Cu(II), Ni(II), Rh(III) И Ir(IV) С ГИСТИДИНОМ	29
В.В. Семченко, Е.А. Зеленская, Н.П. Шабельская, А.С. Деева, А.И. Мушорянов СИНТЕЗ И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ V – Al – O	33
Е.А. Смирнова РАСТВОР ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ	37

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков ЭФФЕКТ ПЛАСТИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СМАЗАННОЙ МАГНИТНЫМ МАСЛОМ	40
А.П. Буйносов, С.И. Лаптев СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВОВ	43
Л.В. Быков, О.А. Паилов ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ЗА СПУСКАЕМЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ СЕГМЕНТАЛЬНО-КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	47
Т.Н. Иванова ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТЬ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИ ОДНОПРОХОДНОМ И МНОГОПРОХОДНОМ ШЛИФОВАНИИ	51
Н.В. Козулько, К.В. Семиниченко ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)	55
В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, С.Н. Антропов ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ МИНИМУМА ЗАТРАТ ПРИ УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ	59
А.Л. Яблонев, А.М. Гусева О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ КУСКОВОГО ТОРФА, ПОЛУЧАЕМОГО В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ ШНЕКОВЫМ ПРЕССОМ	62

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

<i>Н.А. Абышев, А.В. Ключников</i> К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕНДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЦИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД АСТАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА	66
<i>М.Е. Калинкина, А.С. Козлов, Р.Я. Лабковская, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков</i> РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ	69
<i>М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Д.И. Медведков, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков</i> РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	72
<i>М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Н.Ю. Коновалов, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков</i> ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	78
<i>М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Р.Я. Лабковская, О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков</i> АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ С ТЕРМОСТАБИЛЬНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ	81
<i>С.С. Капитонов, С.Ю. Прытков, С.Ю. Григорович, А.В. Капитонова, С.А. Медведев, Н.П. Слугина</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	84
<i>Ю.И. Шакиров, Р.Г. Садыков, А.А. Хафизов, Р.И. Валиев</i> РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ	88

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>А.В. Алабин, М.А. Свищева</i> ПРЕИМУЩЕСТВА СОЗДАНИЯ ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ, МОДЕРНИЗАЦИИ И ДЕМОНТАЖА ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM ТЕХНОЛОГИЙ	92
<i>Д.А. Безуглов, В.В. Воронин, С.Е. Мищенко, В.И. Юхнов</i> АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ НА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ	97
<i>А.А. Кротких, П.В. Максимов</i> РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ LEVEL-SET МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ШТРАФНОЙ ФУНКЦИИ	103
<i>О.Н. Кузина</i> ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА	107
<i>А.Д. Курзанов, М.А. Фомина</i> МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА	112
<i>С.Л. Леванов, Г.Н. Власичев</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЁТНЫХ КОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000	116
<i>П.В. Максимов, А.А. Кротких</i> ВВЕДЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО АЛГОРИТМОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА	119

<i>В.В. Назарова, Л.А. Надточий, В.А. Демченко, А.Д. Апалько, О.Л. Жданова</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ САЛАТА (<i>LACTUCA SATIVA</i> L) ГИДРОПОННЫМ МЕТОДОМ	122
<i>Н.А. Пшеничникова, Н.В. Пешков, В.А. Ильиных</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ	126
АННОТАЦИИ	129

THE RELEASE MAINTENANCE

<i>K.G. Nikolaev, B.N. Ivanov, E.R. Magdeev, R.H. Shagimullin, V.S. Minkin</i> CHEMICAL AND PHYSICAL RESONANCE IN CHEMICAL PROCESSES AND TECHNOLOGIES MESSAGE 1. FEATURES AND PERSPECTIVES OF APPLICATION	8
---	---

01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS

<i>M.M. Sorokina</i> ON EXISTENCE OF $\mathcal{FQ}$ -PROJECTORS IN FINITE GROUPS	12
<i>E.V. Spiridonova, N.A. Gamova, N.V. Kulish, I.P. Tomina</i> THE PRINCIPLE OF CONSTRUCTION OF AREAS OF DEVELOPMENT AND STAGNATION OF FLAT CRACKS IN THE MIXED STATEMENT	15
<i>V.G. Sharmin, D.V. Sharmin, E.A. Dmitrieva</i> THE STRUCTURE OF THE SET OF AXIAL POINTS OF THE SURFACE WITHOUT TORSION	19
<i>A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov, L.A. Gainulova</i> MATHEMATICAL MODELING OF MOTION IN A CENTRALLY SYMMETRIC FIELD	21

02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES

<i>G.E. Bordina, N.P. Lopina, E.G. Nekrasova, E.V. Ojimkova, A.E. Sobolev</i> IR-SPECTROSCOPY OF ESSENTIAL OILS	26
<i>N.Y. Esina, M.N. Kurasova, O.I. Andreeva, M.V. Tachaev, I.I. Kozhuhova, Tci Shenhua, A.A. Godzishevskaya, E.S. Mitrofanova</i> COMPLEX COMPOUNDS OF Cu(II), Ni(II), Rh(III) AND Ir(IV) WITH HISTIDINE	29
<i>V.V. Semchenko, E.A. Zelenskaya, N.P. Shabel'skaya, A.S. Deeva, A.I. Mushoryapov</i> SYNTHESIS AND PHASE FORMATION IN THE SYSTEM V – Al – O	33
<i>E.A. Smirnova</i> SOLUTION FOR SELECTIVE ETCHING STAINLESS STEEL	37

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

<i>A.N. Bolotov, O.O. Novikova, V.V. Novikov</i> THE EFFECT OF PLASTICIZATION OF THE SURFACE OF THE LUBRICATED MAGNETIC OIL	40
<i>A.P. Buinosov, S.I. Laptev</i> METHOD OF ESTIMATION OF RELIABILITY OF RESULTS AT CARRYING OUT TECHNICAL DIAGNOSTICS OF LOCOMOTIVES	43
<i>L.V. Bykov, O.A. Pashkov</i> STUDY OF THE PARAMETERS OF THE FLOW FOR THE DOWNLOADED SPACE EQUIPMENT SEGMENTAL-CONICAL FORM	47
<i>T.N. Ivanova</i> THE HEAT RELEASE RATE OF THE ABRASIVE GRAIN DURING SINGLE-PASS AND MULTI-PASS GRINDING	51
<i>N.V. Kozulko, K.V. Seminichenko</i> RESEARCH OF PROCESS OF FINAL ABRASIVE PROCESSING OF DETAILS FROM THE POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS (PCM)	55
<i>V.S. Nagovitsyn, A.P. Buinosov, S.N. Antropov</i> THE CHOICE OF TECHNOLOGY FOR RESTORATION OF KNOTS OF ROLLING STOCK TAKING INTO ACCOUNT THE MINIMUM COST WHILE ENSURING THE REQUIRED LEVEL OF RELIABILITY	59
<i>A.L. Yablonev, A.M. Guseva</i> ON THE CORRELATION OF DENSITY AND FLEXURAL STRENGTH SOD PEAT OBTAINED IN THE PROCESS OF SCREW PRESS FORMATION	62

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

<i>N.A. Abyshev, A.V. Klyuchnikov</i> TO THE ISSUE ABOUT ESTIMATION OF FUNCTIONAL PRECISION OF A STAND, WHICH IS INTENDED FOR DEFINITION	
--	--

THE MASS-INERTIA CHARACTERISTICS OF FLYING VEHICLES BY THE ASTATIC PENDULUM METHOD	66
<i>M.E. Kalinkina, A.S. Kozlov, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov</i> DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE SENSITIVE ELEMENT OF THE PRESSURE SENSOR	69
<i>M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, D.I. Medvedkov, O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov</i> DEVELOPMENT OF LIBRARY OF FINAL ELEMENTS FOR CREATING AUTOMATED DESIGN SYSTEMS OF SENSITIVE ELEMENTS OF MICROMECHANICAL DEVICES	72
<i>M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, N.Yu. Konovalov, O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov</i> EFFECT OF ELECTROSTATIC IMPACTS AND TEMPERATURE FACTOR ON DEFORMATION OF THE SENSITIVE ELEMENT OF MICROMECHANICAL DEVICES	78
<i>M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, R.Ya. Labkovskaya, O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov</i> ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF INTEGRAL PRESSURE SENSORS WITH A THERMOSTABLE SENSITIVE ELEMENT	81
<i>S.S. Kapitonov, S.V. Prytkov, S.Yu. Grigorovich, A.V. Kapitonova, S.A. Medvedev, N.P. Slugina</i> RESEARCH OF CHANGE OF COLOR TEMPERATURE AND EMISSION SPECTRUM OF LED LUMINAIRES IN THE COURSE OF THEIR OPERATION	84
<i>Yu.I. Shakirov, R.G. Sadykov, A.A. Khafizov, R.I. Valiev</i> OPERATION MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF OBJECTS OF OIL AND GAS FIELDS	88

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

<i>A.V. Alabin, M.A. Svishcheva</i> ADVANTAGES OF FACILITIES' RECONSTRUCTION, MODERNIZATION AND DISMANTLING PROJECT CREATION USING BIM TECHNOLOGIES	92
<i>D.A. Bezuglov, V.V. Voronin, S.E. Mishchenko, V.I. Yukhnov</i> THE ALGORITHM OF ALLOCATION OF CONTOURS ON THE TV IMAGES DISTORTED BY IMPULSE NOISE USING SPLINE APPROXIMATION	97
<i>A.A. Krotkikh, P.V. Maksimov</i> DEVELOPMENT OF TOPOLOGY OPTIMIZATION ALGORITHM BASE ON LEVEL-SET METHOD WITH USING ADAPTIVE SELECTION OF PENALTY FUNCTION PARAMETERS	103
<i>O.N. Kuzina</i> INFORMATION MODELING OF CONSTRUCTION OBJECT COST AT EACH STAGE OF LIFECYCLE	107
<i>A.D. Kurzanov, M.A. Fomina</i> QUALITY COMPLEX ESTIMATION MODEL OF NON- AUTOCLAVED AERATED CONCRETE STRUCTURE FORMATION PROCESS	112
<i>S.L. Levanov, G.N. Vlasichev</i> USING NUCLEAR CALCULATION CODES FOR OPTIMIZATION TOLERANT FUEL CHARACTERISTICS IN VVER-1000 REACTORS	116
<i>P.V. Maksimov, A.A. Krotkikh</i> CRITERIA INTRODUCTION FOR ESTIMATING THE QUALITY OF THE SOLUTION OF THE TOPOLOGICAL OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON LEVEL-SET METHOD	119
<i>V.V. Nazarova, L.A. Nadtochiy, V.A. Demchenko, A.D. Opalko, O.L. Zhdanova</i> OPTIMIZATION OF PROCESS OF CULTIVATION OF LETTUCE (<i>LACTUCA SATIVA</i> L) HYDROPONIC METHOD	122
<i>N.A. Pshenichnikova, N.V. Peshkov, V.A. Ilinykh</i> APPLICATION OF THE METHOD OF CUMULATIVE SUMS IN THE EVALUATION OF FORM ERROR PROFILE SHAFTS	126

ABSTRACTS	129
------------------	-----

02.00.00

¹К.Г. Николаев, ²Б.Н. Иванов д-р техн. наук, ³Э.Р. Магдеев,
⁴Р.Х. Шагимуллин канд. техн. наук, ⁵В.С. Минкин д-р хим. наук

¹ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт геологии нерудных полезных ископаемых», Казань, k8966808@gmail.com,

²Казанский научно-исследовательский технологический университет, нефтяной факультет, кафедра общей химической технологии, Казань, ivanovbn@rambler.ru,

³АО «НИИнефтепромхим», Казань, info@neftprx.ru,

⁴Главный редактор журнала «Научно-технический вестник Поволжья», Казань, shagimullin@ntvp.ru,

⁵Казанский научно-исследовательский технологический университет, факультет наноматериалов и нанотехнологий, кафедра физики, Казань, yerus@yandex.ru

ХИМИЧЕСКИЙ И ФИЗИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ СООБЩЕНИЕ 1. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Статья продолжает и развивает цикл многолетних работ [1-21] по исследованию общности и отличия физических и химических видов взаимодействия применительно к важнейшим процессам химической технологии и универсальным приемам их осуществления.

Настоящая статья посвящена раскрытию некоторых теоретических и практических аспектов физического и химического резонансов в химико-технологических процессах и в способах их осуществления; их связи и перспективах применения.

Ключевые слова: *химический резонанс, физический резонанс, химическая технология, движение.*

Любые виды движения можно классифицировать по следующим основным группам признаков:

- по сложности движения: индивидуальные и комплексные (по сути все химико-технологические процессы – сложная совокупность различных явлений)
- по природе составляющих ингредиентов движения и их совокупности;
- по соотношению физических и химических видов движения
- по уровню организации рассматриваемых материальных образований (вещества и поля)
- по функциональному назначению и рейтинговой оценке.

Предметом настоящей статьи, в соответствии с поставленной задачей, в основном являются группы признаков химического и физического резонансов по их природе и функциональному назначению.

Если под физическим резонансом принято понимать усиливающееся результирующее (по амплитуде) колебание материального объекта при совпадении частот и фаз¹, то структура химического резонанса² гораздо сложнее.

О химическом резонансе задумались (очень редко) после представления Шредингером своего волнового уравнения: принципа неопределенности Паули; интерпретации их Анри Пуанкаре и, главное, резонансной гипотезы химических взаимодействий Лайнуса Полинга.

При этом следует отметить, что, появившееся тогда и до сих пор превалирующее над всеми другими определениями, понятие «электронного облака» (электронной населенности), гласящее, что это «квадрат вероятности нахождения электрона в данной точке пространства в данный момент времени» совершенно некорректно. Поскольку вероятность и её квадрат определяются математическими характеристиками и от их перекрытия новые материальные субстанции (атомы, молекулы, ионы, радикалы), естественно, образоваться не могут!

Более точной и ясной является точка зрения Л. Полинга о том, что реагирующие молекулы (ионы?), находясь в последовательной совокупности мезонерных форм, активно

взаимодействуют только в некоторых формах, названных им резонансными.

В этом смысле Л. Полинг достаточно обоснованно заочно полемизировал с теорией строения органических соединений А.М. Бутлерова.

Главным недостатком теории Л. Полинга является то обстоятельство, что, указывая на наибольшую активность «резонансных состояний», он, почему-то, относит их к виртуальным и, даже нематериальным состояниям.

Стержень теории А.М. Бутлерова обусловлен и проявляется в сочетании двух постулатов:

- природа веществ (состав и строение на макроуровне) предопределяет их физ. и хим. свойства;

- атомы в молекуле практически сохраняют свою самостоятельность.

По нашему мнению, А.М. Бутлеров и Л. Полинг рассматривали разные уровни ассоциативности материальных образований. Поэтому теория Бутлерова лучше объясняется классической химической термодинамикой, Полинга – статистической.

Связи обеих теорий способствует предложенный Б.Н. Ивановым и А.К. Мезиковым закон форм существования и взаимных переходов материальных образований.

Кроме того, последний, с учетом сопряженного качественно-количественного физико-математического моделирования с использованием характеристического универсального уравнения, способствует реализации мечты прочих поколений химиков: определения прямой связи скорости химических реакций с изменениями скорости механического (физического) движения частиц, составляющих реакционную систему. В частности, А.М. Бутлеров писал: «Быть может, не ошибется тот, кто назовет движением все явления химизма. Если наступит время, которое уяснит причинную связь между всеми видами этого движения, то явление химизма получит свою механическую теорию».

Именно корреляция тепловых, электрических и трибохимических явлений (как наиболее универсальных) и их свойств, позволяет объяснять, предсказывать и использовать механохимические процессы. В том числе физический и химический резонансы.

Поскольку резонансное взаимодействие, как и любое взаимодействие, представляет собой материальное вещественно-волновое движение, взаимосвязь между химическим и физическим резонансами, по сути, аналогична связи химических и физических взаимодействий [8, 9, 11, 14].

Общность проявляется в едином носителе³, а основное отличие – в величине этого носителя, скорости и количестве его движения.

Согласно классическому (наиболее точному и краткому) определению науки «химия» М.В. Ломоносова⁴, химическое взаимодействие, инициируемое и интенсифицируемое любым способом: физическим, химическим, тепловым, радиационным, ультразвуковым, электромагнитным и др. – то есть, вещественным, полевым или их сочетаниями, - представляет собой изменение качества исходного материального образования на микро- (псевдоэлементарные частицы, электроны, ядра, атомы, молекулы и др.) и/или на макроуровне.

Следовательно, химический резонанс (также как и химическое взаимодействие) – это особый частный случай физического резонанса.

Наиболее наглядно это проявляется в фотохимических сенсibilизационных процессах, когда кванты света, возбуждая физическим путем молекулы третьих компонентов, их посредством активируют искомые частицы, соединения и связи «принуждая» их к химическому взаимодействию.

Химический резонанс заведомо проявляется реже физического, т.к. химических видов движения меньше физических. К тому же он в основном проявляется на микроуровне.

При этом химический резонанс, по уровню организации преимущественно являясь полевым видом движения, может возникнуть в результате и химического, и физического взаимодействий (электромагнитного, светового, электрострикционного трибофизического, трибохимического действия, ударного импульса и многих других)⁵.

Примерами интуитивного (нераспознанного) применения (и проявления) химического резонанса в промышленности могут служить: образование твердых растворов, холодная

пайка, радиационные процессы, механохимическое образование кристаллов под действием сверхвысоких (критических) давлений, большинство процессов катализа и т.д. и т.п.

Наиболее важным, рациональным и универсальным направлением использования химического резонанса представляется, по нашему мнению, трибохимические ассоциативные процессы механохимической технологии.

Взаимодействия в них происходят на поверхностных слоях ингредиентов ассоциатов. Упрощенно для наглядности их можно иллюстрировать «шип-пазовым» взаимодействием локальных максимумов и минимумов количеств движений и веществ в ассоциатах (как различающейся, так и одной природы). Количество этих экстремумов, в первую очередь, предопределяется размерами ассоциатов⁶.

Естественно, физический и химический резонанс в химических превращениях могут взаимно дополнять и обогащать (положительный резонанс) и нивелировать (отрицательный резонанс) друг друга.

РЕЗЮМЕ

Для рационального создания и управления сочетаниями химический и физический резонанс, целесообразно знать аддитивно-взвешенные усредненные параметры резонансных частот и амплитуд индивидуальных веществ, их комплексов и сложных смесей.

Для этого в проблемной совместной межотраслевой лаборатории волновых технологий ОАО «Татнефтехиминвестхолдинг» и КНИТУ (КХТИ) (научный руководитель проф. Б.Н.Иванов) разрабатывается специальный диагностический стенд.

В случае успешной реализации поставленной цели, открывается поистине неограниченное поле деятельности по разработке новых и рационализации действующих процессов химической технологии, что позволит создавать универсальные мобильные модульные производственные установки малой и средней мощности.

Ввиду сложности данной задачи параллельно разрабатываются варианты рационализации различных процессов механохимических технологий с помощью сочетаний физического и химического резонансов на основе несколько иных принципов, о чем будет изложено в следующем сообщении.

Сноски:

¹ Нам представляется целесообразным понимать и их нивелирование (т.е. «отрицательный» резонанс).

² Сам термин и само понятие химического резонанса несмотря на его наличие, чуть ли не впервые рассматривается нами.

³ Парадокс в том, что носителем волны является вещество, а носителем вещества – волна

⁴ «Химия – наука о качественных и количественных изменениях веществ».

⁵ Особым важнейшим событием является открытый Э. Резерфордом процесс образования ядер кислорода из ядер азота, фактически подтверждающий возможность химического резонанса на ядерном уровне.

⁶ Последние предопределены природой (т.е. составом и строением) ассоциатов и параметрами условий осуществления исследуемых процессов.

Список литературы

1. *Иванов, Б.Н.* К вопросу о строении аддуктов мочевины с н-алканами / Б.Н. Иванов, Ш.Ш. Башкиров, Л.М. Козлов, А.С. Хромов // Журнал прикладной химии, - 1977.-Т50- №.9.- С.2057-2061.
2. *Иванов, Б.Н.* Действие активных активаторов-растворителей на мочевины в процессе карбамидной депарафинизации / Б.Н. Иванов, Л.М. Козлов, Д.Л. Осокин, И.А. Сафин, А.И. Андреева // Журнал прикладной химии, - 1981.-Т54-№5.-С.1127-1131.
3. *Иванов, Б.Н.* О роли активаторов-растворителей в процессе образования карбамидо-парафинового комплекса / Б.Н. Иванов, Г.А. Кринари // Журнал прикладной химии, - 1983.-Т56-№3.-С.645-648.
4. *Иванов, Б.Н.* Способ производства низкозастывающих дизтоплив и сырья для получения жидких парафинов / Б.Н. Иванов, Х.Э. Харлампиди // Химия и технология топлив и масел,-

2000.-№6.-С.40-43.

5. *Иванов, Б.Н.* Определение изменения энтальпии образования нефтей / Б.Н. Иванов, Я.И. Кравцов, А.В. Демин, Д.В. Прощекольников, Х.Э. Харлампики // Известия АН. Энергетика. - М.: 2001, №3.-С.120-127
6. *Иванов, Б.Н.* Ассоциативность нефтесодержащих систем / Б.Н. Иванов, В.С. Минкин, Х.Э. Харлампики, А.Р. Садыков // Химия и технология топлив и масел. - 2004. - № 4. - С. 28-31.
7. *Иванов, Б.Н.* Структурополагающие основы ассоциативных процессов нефтепереработки. Сообщения 1, 2 / Б.Н. Иванов, А.Р. Садыков, А.П. Суханов, П.П. Суханов // Нефтепереработка и нефтехимия.-М.: НИИИТЭнефтехим,- 2004.- №6. – С.23-27
8. *Иванов, Б.Н.* Ассоциативная природа сложных органических жидкофазных химико-технологических процессов и их энергоаналитическая оценка / Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, А.П. Суханов // Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники: сб. мат-лов отчетной конф. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. – 2004. – С.1208-1210
9. *Иванов, Б.Н.* «Философский камень» жидкофазных процессов химической технологии. Часть 1, часть 2 / Б.Н. Иванов // Энергосбережение в Республике Татарстан. – Казань, 2005. – №21-22. – с.20-24; Казань, 2006-2007. – №23-24. – с.61-66
10. *Иванов, Б.Н.* Онтология теоретических основ химической технологии: учебное пособие / Б.Н. Иванов – Казань: КГТУ, 2006. – 72с.
11. *Иванов, Б.Н.* Исследование ассоциативной природы сложных жидкофазных органических систем тепловизионными методами / Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, А.К. Мезиков, С.Ю. Горбунов, А.В. Дацков // Вестник Казанского технологического университета – Казань: Отечество, 2007. – №3-4 – с.135-142.
12. *Иванов, Б.Н.* О применимости универсального волнового уравнения при характеристике нефтесодержащих систем. Сообщение 1 / Б.Н. Иванов, А.А. Дацков, Н.А. Лебедев // Вестник КТУ, Казань: Отечество, 2008. - №1. – С.20-31.
13. *Иванов, Б.Н.* Волновая природа процессов генезиса, добычи и подготовки нефти. Части 1-3 / Б.Н. Иванов – Вестник КТУ, Казань: Отечество, 2008. - №3. – С.97-115, №4. – С.100-120, №5. – С.138-157,
14. *Иванов, Б.Н.* Волновые процессы и технологии добычи и подготовки нефти /Б.Н. Иванов, А.И.Гурьянов, А.М.Гумеров // Казань: АН РТ, «ФЭН», - 2009. - 400 с.
15. *Иванов, Б.Н.* Общий базис основных методов увеличения нефтеотдачи / Б.Н. Иванов, Е.Л. Древницкая, Н.А. Лебедев // Нефтяное хозяйство. – 2010
16. *Иванов, Б.Н.* Универсальное волновое уравнение. Обоснование применения. / Б.Н. Иванов, М.И. Билалов, Р.Н. Костромин // Энергетика татарстана. – Казань, 2010. -№3. – С.63-67.
17. *Иванов, Б.Н.* Вещественно-волновая природа материальных систем и их взаимодействий – фундамент нанотехнологии / Б.Н. Иванов, Р.Н. Костромин, И.С. Антипин // Труды XI международной научно-практической конференции “NANOTECH”. – Казань, издательство Казанского государственного технологического университета 2010. – Т1. – С.91-96.
18. *Иванов, Б.Н.* Влияние углеводородов различных групп на фазовую устойчивость этанолсодержащих топлив / Б.Н. Иванов, Р.Р. Шайхутдинов, М.И. Билалов // Химия и технология топлив и масел. – М. – 2011. - №4 – С.8-13.
19. *Kostromin, R.N.* The Conjugated Qualitative and Quantitative Approximation of Water, Salt, Sulfur, Asphaltene and Mechanical Ingredients of Oil-Containing Systems Interrelation./ R.N.Kostromin, B.N. Ivanov, M.S. Petrovnina, M.I. Safiullin. // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences, 2015. – Volume 6, Issue 6, 2015 (November – December).-Pp.1612-1616.
20. *Иванов, Б.Н.* Четвертая материальная форма проявления закона сохранения / Б.Н. Иванов, А.К. Мезиков //Энергетика Татарстана, 2016, №2, с.62-67
21. *Иванов, Б.Н.* Гносеологические корни рациональной методологии получения электретных материалов. / Б.Н. Иванов, В.С. Минкин, К.Г. Николаев, В.С. Желтухин, Р.Х. Шагимуллин // Научно-технический вестник Поволжья, - 2017. - №5. – С.9-15.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.06

М.М. Сорокина д-р физ.-мат. наук

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского,
 физико-математический факультет,
 кафедры математического анализа, алгебры и геометрии,
 Брянск, mmsorokina@yandex.ru

О СУЩЕСТВОВАНИИ $\mathcal{F}_\Omega$ -ПРОЕКТОРОВ В КОНЕЧНЫХ ГРУППАХ

В работе изучаются $\mathcal{F}$ -подгруппы конечных групп, где $\mathcal{F}$ – некоторый класс конечных групп. Доказано существование $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторов в конечной группе G для класса $\mathcal{F}$, являющегося Ω -примитивно замкнутым гомоморфом, где Ω – произвольный непустой класс конечных простых групп.

Ключевые слова: *конечная группа, класс групп, $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор.*

С развитием теории классов конечных групп важное место в теории групп стали занимать вопросы исследования $\mathcal{F}$ -подгрупп, т.е. подгрупп в группах, принадлежащих рассматриваемому классу групп $\mathcal{F}$ (см., например, [1]). К таким подгруппам относятся введенные в рассмотрение В.Гашюцем $\mathcal{F}$ -проекторы. $\mathcal{F}$ -проектором конечной группы G , где $\mathcal{F}$ – класс групп, называется такая $\mathcal{F}$ -подгруппа H группы G , что для любой нормальной подгруппы N из G фактор-группа HN/N является $\mathcal{F}$ -максимальной подгруппой в G/N (см., например, [2], с. 288). В.Гашюцем было установлено существование $\mathcal{F}$ -проекторов в разрешимой группе G для локальной (насыщенной) формации $\mathcal{F}$ [3]. В 1967 году Х.Шунк распространил результат В.Гашюца для класса $\mathcal{F}$, являющегося примитивно замкнутым гомоморфом (классом Шунка) [4]. Рассматривая локальную формацию $\mathcal{F}$, П.Шмид и Э.Ф. Шмигирев независимо друг от друга доказали существование $\mathcal{F}$ -проекторов в произвольной группе G с разрешимым $\mathcal{F}$ -корадикалом [5, 6].

В последние десятилетия в теории классов конечных групп широко используются методы, основанные на рассмотрении простых делителей порядков изучаемых групп, принадлежащих некоторому непустому множеству простых чисел ω . На этом пути были построены ω -локальные (ω -насыщенные) формации, ω -веерные формации и классы Фиттинга, ω -примитивно замкнутые классы групп (см., например, [7, 8]). В работе [9] были введены в рассмотрение $\mathcal{F}^\omega$ -проекторы конечной группы и доказано их существование для класса $\mathcal{F}$, являющегося ω -локальной формацией или ω -примитивно замкнутым гомоморфом, тем самым получено развитие вышеотмеченных результатов из [3 – 6].

Наряду с методами, использующими множество простых чисел ω , достаточно эффективным при изучении классов групп оказался подход, основанный на рассмотрении композиционных факторов изучаемых групп, принадлежащих некоторому непустому классу конечных простых групп Ω . На этом пути были построены Ω -расслоенные формации и классы Фиттинга и др. (см., например, [10]). В настоящей работе изучаются $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторы конечных групп. Цель работы – доказать существование $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторов в конечной группе в случае, когда класс $\mathcal{F}$ является Ω -примитивно замкнутым гомоморфом.

1. Определения, обозначения и предварительные результаты

В работе рассматриваются только конечные группы. Применяются классические методы доказательств теории конечных групп и теории классов групп. Используемые определения и обозначения для групп и классов групп стандартны, их можно найти в книгах [1, 2]. Приведем лишь некоторые из них. Напомним, что *классом групп* называется всякое множество групп, содержащее вместе с каждой своей группой G и все группы,

изоморфные G . Класс $\mathcal{F}$ называется *гомоморфом*, если из того, что $G \in \mathcal{F}$ и N – нормальная подгруппа в G , следует, что $G/N \in \mathcal{F}$. В дальнейшем Ω – некоторый непустой класс простых групп; $K(G)$ – класс всех простых групп, изоморфных композиционным факторам группы G ; G – Ω -группа, если $K(G) \subseteq \Omega$; $\mathcal{F}_\Omega$ – класс всех Ω -групп, принадлежащих классу $\mathcal{F}$; $O_\Omega(G)$ – наибольшая нормальная Ω -подгруппа группы G . Пусть $\mathcal{F}$ – непустой класс групп. Подгруппа H группы G называется *$\mathcal{F}$ -максимальной* в G , если $H \in \mathcal{F}$ и из $H \leq U \leq G$ и $U \in \mathcal{F}$ следует, что $U = H$ (см., например, [2], с. 281).

Определение 1. Группу G назовем *Ω -примитивной*, если в G существует максимальная подгруппа M (*Ω -примитиватор*) такая, что $\text{Core}_G(M) \cap O_\Omega(G) = 1$ (здесь $\text{Core}_G(M)$ – ядро подгруппы M в группе G).

Доказательство следующей леммы аналогично доказательству теоремы 2.1 из [9].

Лемма 1. Пусть G – Ω -примитивная группа с Ω -примитиватором M и $O_\Omega(G) \neq 1$. Тогда выполняется одно из следующих утверждений:

1) G содержит единственную минимальную нормальную Ω -подгруппу N , $C_G(N) = N \times \text{Core}_G(M)$ и $G = [N]M$;

2) G содержит единственную минимальную нормальную Ω -подгруппу N , $C_G(N) = \text{Core}_G(M)$ и $G = NM$;

3) G содержит точно две минимальные нормальные Ω -подгруппы N_1 и N_2 , причем $G = [N_1]M = [N_2]M$, $N_1 \cong N_2 \cong N_1 N_2 \cap M$, $C_G(N_i) = N_{3-i} \times \text{Core}_G(M)$, $i = 1, 2$.

Определение 2. Пусть $\mathcal{F}$ и $\mathcal{X}$ – непустые классы групп, $\mathcal{F} \subseteq \mathcal{X}$. Класс $\mathcal{F}$ назовем *Ω -примитивно замкнутым* в $\mathcal{X}$, если для любой группы $G \in \mathcal{X}$ из того, что $G/\text{Core}_G(M) \cap O_\Omega(G) \in \mathcal{F}$ для любой максимальной подгруппы M группы G , следует, что $G \in \mathcal{F}$.

Определение 3. Пусть $\mathcal{F}$ – непустой класс групп. Ω -Подгруппа H группы G называется *$\mathcal{F}_\Omega$ -проектором* в G , если для любой нормальной Ω -подгруппы N из G фактор-группа HN/N является $\mathcal{F}$ -максимальной в G/N [11].

Доказательство следующей леммы осуществляется непосредственной проверкой справедливости определения 3.

Лемма 2. Пусть $\mathcal{F}$ – непустой гомоморф, N – нормальная Ω -подгруппа группы G . Если H/N – $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор группы G/N и L – $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор группы H , то L является $\mathcal{F}_\Omega$ -проектором группы G .

2. Существование $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторов в группах

Теорема 1. Пусть $\mathcal{X}$ – наследственный гомоморф, $\mathcal{F}$ – непустой Ω -примитивно замкнутый гомоморф в $\mathcal{X}$, G – $\mathcal{X}$ -группа, обладающая разрешимой нормальной Ω -подгруппой N такой, что $G/N \in \mathcal{F}_\Omega$. Тогда в G существует $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор.

Доказательство. Допустим, что теорема неверна и G – контрпример минимального порядка. Тогда $G \in \mathcal{X}$, в G существует разрешимая нормальная Ω -подгруппа N такая, что $G/N \in \mathcal{F}_\Omega$, но G не имеет $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторов, причем G – группа наименьшего порядка с такими свойствами. В силу выбора группы G , $G \notin \mathcal{F}$ и поэтому $N \neq 1$. Следовательно, в G существует неединичная нормальная Ω -подгруппа.

Пусть R – произвольная неединичная нормальная Ω -подгруппа группы G . Так как $G \in \mathcal{X}$ и $\mathcal{X}$ – гомоморф, то $G/R \in \mathcal{X}$. Поскольку $(G/R)/(NR/R) \cong G/NR \cong (G/N)/(NR/N) \in \mathcal{F}_\Omega$ и $NR/R \cong N/N \cap R$ – разрешимая Ω -группа, то G/R удовлетворяет условию теоремы и по индукции в G/R существует $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор P/R . Тогда по определению 3 $((P/R)(NR/R))/(NR/R)$ является $\mathcal{F}$ -максимальной подгруппой в $(G/R)/(NR/R)$. Это означает, что PN/NR является $\mathcal{F}$ -максимальной подгруппой в G/NR . Из $G/NR \in \mathcal{F}$ следует, что $PN = G$. Так как $K(P/R) \subseteq \Omega$ и $K(R) \subseteq \Omega$, то P является Ω -группой и поэтому $P \cap N$ – разрешимая нормальная Ω -подгруппа группы P . Кроме того, $G/N = PN/N \cong P/P \cap N \in \mathcal{F}_\Omega$. В силу наследственности класса $\mathcal{X}$ имеем $P \in \mathcal{X}$. Если $P \neq G$, то по индукции в P существует $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор, являющийся по лемме 2 $\mathcal{F}_\Omega$ -проектором группы G , что ввиду выбора группы G , невозможно. Следовательно, $P = G$. Это означает, что G/R – $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор в G/R и поэтому $G/R \in \mathcal{F}_\Omega$. Таким образом, приходим к выводу:

$G/R \in \mathcal{F}_\Omega$ для любой неединичной нормальной Ω -подгруппы R группы G (1).

Если для любой максимальной подгруппы M группы G $\text{Core}_G(M) \cap O_\Omega(G) \neq 1$, а значит, ввиду (1), $G/\text{Core}_G(M) \cap O_\Omega(G) \in \mathcal{F}_\Omega$, то по определению 2 $G \in \mathcal{F}$, что невозможно. Следовательно, в G найдется максимальная подгруппа M такая, что $\text{Core}_G(M) \cap O_\Omega(G) = 1$. Это, согласно определению 1, означает, что G – Ω -примитивная группа.

Пусть V – минимальная нормальная Ω -подгруппа группы G . Предположим, что $V \cap M = 1$. Тогда $G = MV$. Так как $M \cong M/1 = M/M \cap V \cong MV/V = G/V \in \mathcal{F}_\Omega$ по (1), то $M \in \mathcal{F}_\Omega$. Пусть $M \leq U \leq G$ и $U \in \mathcal{F}$. Поскольку $G \notin \mathcal{F}$, то $M = U$. Это означает, что M является $\mathcal{F}$ -максимальной подгруппой в G .

Пусть D – произвольная нормальная Ω -подгруппа в G . Если $D = 1$, то по доказанному выше MD/D – $\mathcal{F}$ -максимальная подгруппа в G/D . Пусть $D \neq 1$. Тогда $D \not\leq M$ и $G = MD$. Ввиду (1) $MD/D = G/D \in \mathcal{F}_\Omega$. Это означает, что MD/D – $\mathcal{F}$ -максимальная подгруппа в G/D . Согласно определению 3, M является $\mathcal{F}_\Omega$ -проектором группы G , что, в силу выбора группы G , невозможно. Следовательно, $V \cap M \neq 1$ и по лемме 1 V является единственной минимальной нормальной Ω -подгруппой группы G , причем V – неабелева группа. С другой стороны, $V \leq N$ и поэтому V – абелева группа. Получили противоречие. Тем самым установлено, что контрпримера не существует. Теорема доказана.

В случае, когда класс $\mathcal{X}$ совпадает с классом всех конечных групп, а класс Ω совпадает с классом всех простых конечных групп, из теоремы 1 вытекает следующий известный результат.

Следствие 1 (Гашюц [3], Шунк [4], см. также теорему 15.3 [1]).

Пусть $\mathcal{F}$ – непустая насыщенная формация. Тогда в любой разрешимой группе G существует $\mathcal{F}$ -проектор.

Список литературы

1. Шеметков Л.А. Формации конечных групп. – М.: Наука, 1978.
2. Doerk K., Hawkes T. Finite soluble groups. – Berlin – New York: Walter de Gruyter, 1992.
3. Gaschutz W. Zur Theorie der endlichen Auflösbaren Gruppen // Math. Z. 1963. V. 80. N 4. – P. 300–305.
4. Schunck H. $\mathcal{H}$ -Untergruppen in endlichen Auflösbaren Gruppen // Math. Z. 1967. V. 97. N 4. – P. 326–330.
5. Schmid P. Lokale Formationen endlicher Gruppen // Math. Z. 1974. V. 137. N 1. – P. 31–48.
6. Шмизгирев Э.Ф. О некоторых вопросах теории формаций // в кн. «Конечные группы». – Минск: Наука и техника, 1975.
7. Скиба А.Н., Шеметков Л.А. Кратно ω -локальные формации и классы Фиттинга конечных групп // Матем. труды. 1999. Т. 2. № 2. – С. 114–147.
8. Ведерников В.А. О новых типах ω -всех формаций конечных групп // Украинський математичний конгрес – 2001. Праці. Київ. 2002. – С. 36–45.
9. Ведерников В.А., Сорокина М.М. $\mathcal{F}$ -проекторы и $\mathcal{F}$ -покрывающие подгруппы конечных групп // Сибирский математический журнал. 2016. Т. 57. № 6. – С. 1224–1239.
10. Ведерников В.А., Сорокина М.М. Ω -расслоенные формации и классы Фиттинга конечных групп // Дискретная математика. 2001. Т. 13. № 3. – С. 125–144.
11. Sorokina M.M. The $\mathcal{F}_\Omega$ -covering subgroups and $\mathcal{F}_\Omega$ -projectors of finite groups // Материалы Международной конференции «Groups and Graphs, Metrics and Manifolds». Екатеринбург, 2017. – С. 96.

01.01.00

Е.В. Спиридонова канд. физ.-мат. наук, Н.А. Гамова канд. педагог. наук,
Н.В. Кулиш канд. педагог. наук, И.П. Томина

Оренбургский государственный университет,
факультет математики и информационных технологий,
кафедра прикладной математики,
Оренбург

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ И СТАГНАЦИИ ПЛОСКИХ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ ПОСТАНОВКЕ

В настоящей статье описывается принцип построения участков развития и стагнации трещин на плоскости со смешанными краевыми условиями, заданными на ее берегах. Получено соотношение, которое позволяет контролировать взаимосвязь между коэффициентами аппроксимации, для которых возможно построение таких областей.

Ключевые слова: трещина на плоскости, смешанные краевые условия, развитие трещины, стагнация трещины, коэффициенты интенсивности напряжений.

В рамках данной научной статьи решение задачи производится в условиях, когда трещина представляет из себя прямолинейный математический разрез конечной длины. В смешанной постановке часть берегов трещины находится под действием смещений, а часть – под действием напряжений. Общее представление геометрической модели трещины со смешанными краевыми условиями представлено на Рис.1.

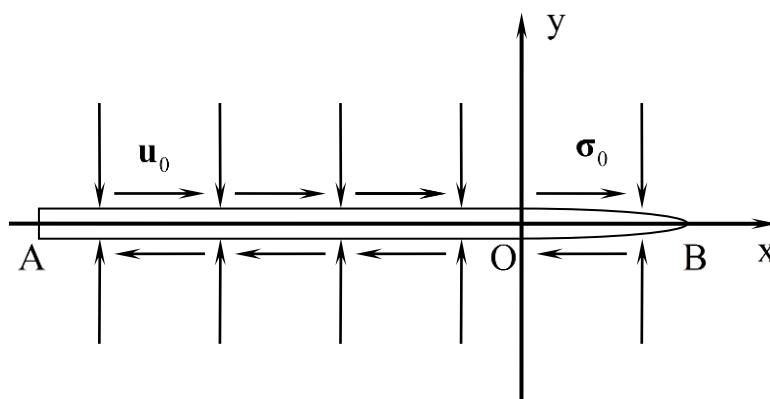


Рис. 1- Геометрическая модель трещины смешанного типа

Известно, что построение участков развития и стагнации трещин на плоскости всецело зависит от функциональной связанности компонентов векторов граничных условий в системе уравнений вида

$$\begin{cases} K_I(\mathbf{u}_0, \boldsymbol{\sigma}_0) = K_{Ic}, \\ K_{II}(\mathbf{u}_0, \boldsymbol{\sigma}_0) = K_{IIc}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{u}_0 = (u_n^0 \quad u_s^0)^T$ – вектор смещений; $\boldsymbol{\sigma}_0 = (\sigma_n^0 \quad \sigma_s^0)^T$ – вектор напряжений; K_I и K_{II} – коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) первого и второго рода соответственно; K_{Ic} и K_{IIc} – критические КИН.

В работе [1] было показано, что для тех комбинаций, которые имеют подобие с комбинацией типа

$$u_s^i = \sum_j B_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_j B_{sn}^{ij} D_n^j, \quad \sigma_s^i = \sum_j A_{ss}^{ij} D_s^j + \sum_j A_{sn}^{ij} D_n^j + \sigma_s^{gi},$$

$$u_n^i = \sum_j B_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_j B_{nn}^{ij} D_n^j, \quad \sigma_n^i = \sum_j A_{ns}^{ij} D_s^j + \sum_j A_{nn}^{ij} D_n^j + \sigma_n^{gi}$$

функциональная зависимость от координаты в аппроксимациях раскрытий

$$D_n(x) = D_n^{(1)}(x) p_n \sum_{i=0}^M \alpha_{in} \left(u_s^0 / u_n^0 \right)^i + D_n^{(\sigma)}(x) \sum_{i=0}^M \beta_{in} \left(\sigma_s^0 / \sigma_n^0 \right)^i,$$

$$D_s(x) = D_n^{(1)}(x) p_s \sum_{i=0}^M \alpha_{is} \left(u_n^0 / u_s^0 \right)^{i-1} + D_n^{(\sigma)}(x) \sum_{i=0}^M \beta_{is} \left(\sigma_n^0 / \sigma_s^0 \right)^{i-1},$$

позволяют записать КИН в виде пределов согласно представлению формул А.М. Линькова [2]

$$K_I = -\frac{G}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_n}{\sqrt{L-x}}, \quad K_{II} = -\frac{G}{2(1-\nu)} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_s}{\sqrt{L-x}},$$

где

G – модуль сдвига, Н/м²;

ν – коэффициент Пуассона;

L – длина трещины, м;

$$p_n = \left[\gamma_{0n} + \gamma_{1n} \exp(\gamma_{2n} b L^{-1}) \right] \left[\eta_{0n} + \eta_{1n} \exp(\eta_{2n} b L^{-1}) \right];$$

$$p_s = \left[\gamma_{0s} + \gamma_{1s} \exp(\gamma_{2s} b L^{-1}) \right] \left[\eta_{0s} + \eta_{1s} \exp(\eta_{2s} b L^{-1}) \right];$$

$$D_n^{(1)}(x) = \frac{-4u_n^0}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \arctg \left(\sqrt{\frac{x}{L-x}} \right) \right], \quad D_n^{(\sigma)}(x) = \frac{2(1-\nu)\sigma_n^0}{G} \sqrt{x(L-x)};$$

$$\begin{pmatrix} \sigma_s^g \\ \sigma_n^g \end{pmatrix} = M[\theta(x, y)] \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \end{pmatrix};$$

$M(\theta)$ – матрица поворота;

$B_{ss}^{ij}, B_{sn}^{ij}, B_{ns}^{ij}, B_{nn}^{ij}, A_{ss}^{ij}, A_{sn}^{ij}, A_{ns}^{ij}, A_{nn}^{ij}$ – граничные коэффициенты влияния.

Для трещин отрыва $p_n, p_s = 1$, $D_n^{(\sigma)} = 0$, а постоянные коэффициенты α_{in} и α_{is} , находятся методом наименьших квадратов (МНК). Для трещин сдвига $D_n^{(\sigma)} = 0$, и с помощью МНК находятся коэффициенты α_{in}, α_{is} , а затем постоянные $\gamma_{in}, \gamma_{is}, \eta_{in}$ и η_{is} . Для смешанного типа трещин проводятся последовательно действия для трещин отрыва и сдвига, а затем находятся коэффициенты β_{in} и β_{is} .

Поиск численного значения предела позволяет исключить зависимость КИН от координаты. В результате уравнения системы (1) примут вид

$$p_n \sum_{i=0}^J \alpha_{in} \left(\frac{u_s^0}{u_n^0} \right)^i \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_n^{(1)}(x)}{\sqrt{L-x}} + \sum_{i=0}^J \beta_{in} \left(\frac{\sigma_s^0}{\sigma_n^0} \right)^i \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_n^{(\sigma)}(x)}{\sqrt{L-x}} \sim K_{Ic}, \quad (2)$$

$$p_s \sum_{i=0}^J \alpha_{is} \left(\frac{u_s^0}{u_n^0} \right)^{i-1} \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_n^{(1)}(x)}{\sqrt{L-x}} + \sum_{i=0}^J \beta_{is} \left(\frac{\sigma_s^0}{\sigma_n^0} \right)^{i-1} \cdot \lim_{x \rightarrow L} \frac{D_n^{(\sigma)}(x)}{\sqrt{L-x}} \sim K_{IIc}. \quad (3)$$

Пределы в (2) и (3) известны и определены в порядке их следования как $K_I^{(1)}$ и q_n . При этом $K_I^{(1)} \sim u_n^0$ и $q_n \sim \sigma_n^0$.

Введем обозначения

$$A_{in} = p_n \frac{\sqrt{2G}}{\sqrt{\pi L}(1-\nu)} \alpha_{in}, \quad A_{is} = p_s \frac{\sqrt{2G}}{\sqrt{\pi L}(1-\nu)} \alpha_{is},$$

$$B_{in} = \sqrt{\frac{\pi L}{2}} \beta_{in}, \quad B_{is} = \sqrt{\frac{\pi L}{2}} \beta_{is}.$$

Тогда система уравнений примет вид

$$\sum_{i=0}^J \left\{ A_{in} u_n^0 \left(\frac{u_s^0}{u_n^0} \right)^i + B_{in} \sigma_n^0 \left(\frac{\sigma_s^0}{\sigma_n^0} \right)^{i-1} \right\} = K_{Ic}, \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^J \left\{ A_{is} u_n^0 \left(\frac{u_s^0}{u_n^0} \right)^i + B_{is} \sigma_n^0 \left(\frac{\sigma_s^0}{\sigma_n^0} \right)^{i-1} \right\} = K_{IIc}. \quad (5)$$

Введем функции

$$U_i = u_n^0 \left[\frac{u_s^0}{u_n^0} \right]^i, \quad S_i = \sigma_n^0 \left[\frac{\sigma_s^0}{\sigma_n^0} \right]^{i-1}.$$

Тогда

$$\sum_{i=0}^J \{ A_{in} U_i^i + B_{in} S_i^{i-1} \} = K_{Ic}, \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^J \{ A_{is} U_i^i + B_{is} S_i^{i-1} \} = K_{IIc}. \quad (7)$$

От функциональной зависимости для суммы можно перейти к функциональной сумме для членов ряда, если представить правую часть в виде конечной суммы от некоторой функции $t = t(i)$. Например, в [3] приводится конечный ряд

$$\sum_{i=0}^J i = \frac{J(J+1)}{2} \rightarrow t(i) = \frac{2i}{J(J+1)} \rightarrow \sum_{i=0}^J t(i) = 1. \quad (8)$$

Тогда в (6) и (7) можно перейти к членам ряда, т.е.

$$A_{in} U_i^i + B_{in} S_i^{i-1} = K_{Ic} t(i),$$

$$A_{is} U_i^i + B_{is} S_i^{i-1} = K_{IIc} t(i).$$

В результате расчетов получим решение в виде

$$\begin{cases} U_i^i = \frac{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}}{A_{in} B_{is} - A_{is} B_{in}} t(i), \\ S_i^{i-1} = \frac{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}}{A_{in} B_{is} - A_{is} B_{in}} t(i) \end{cases}. \quad (9)$$

Таким образом, решение (9) зависит не только от коэффициентов аппроксимации, но и от вида функции $t = t(i)$. Исключить зависимость от этой функции можно, если принять ее за параметр. В результате получим

$$\frac{U_i^i}{S_i^{i-1}} = \frac{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}}{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}} \Rightarrow \frac{u_n^0 \sigma_s^0}{\left[\sigma_n^0 \right]^2} \left(\frac{u_s^0 \sigma_n^0}{u_n^0 \sigma_s^0} \right)^i = \frac{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}}{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}},$$

откуда приходим к уравнению поверхности в явном виде

$$\left[u_n^0 \sigma_s^0 \right]^{1-i} \left[u_s^0 \right]^i \left[\sigma_n^0 \right]^{i-2} = \frac{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}}{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}}. \quad (10)$$

Очевидно, что представленное в разделенных переменных оно будет решением, хотя бы одного из частных случаев и обращается в ноль при любом $0 \leq i \leq J$. Принимая одну из них зависимой, получаем уравнение поверхности как функцию трех независимых переменных. Точки этой поверхности будут являться границей раздела участков развития и стагнации трещины. Далее, для того, чтобы уравнение (10) было тождественным системе (4) – (5), а его решение было единственным, необходимо, чтобы решение (10) не зависело от порядкового индекса суммирования. В итоге, одинаковым должно быть решение каждого из J уравнений. В связи с этим найдем связь между решениями i -го и j -го уравнений. Пусть $i < j$ и $k = j - i$. Тогда j -е уравнение есть

$$\left[u_n^0 \sigma_s^0 \right]^{1-k-i} \left[u_s^0 \right]^{k+i} \left[\sigma_n^0 \right]^{k+i-2} = \frac{B_{(k+i)s} K_{Ic} - B_{(k+i)n} K_{IIc}}{A_{(k+i)n} K_{IIc} - A_{(k+i)s} K_{Ic}}. \quad (11)$$

Разделив (11) на (10), получаем

$$\frac{\sigma_n^0 u_s^0}{u_n^0 \sigma_s^0} = \left\{ \frac{B_{(k+i)s} K_{Ic} - B_{(k+i)n} K_{IIc}}{A_{(k+i)n} K_{IIc} - A_{(k+i)s} K_{Ic}} \cdot \frac{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}}{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}} \right\}^{\frac{1}{k}}.$$

Полученное условие преобразуется к форме с исключенной зависимостью от напряжений и смещений, если рассматривать равенство правых частей при k и $w \neq k$:

$$\left\{ \frac{B_{(k+i)s} K_{Ic} - B_{(k+i)n} K_{IIc}}{A_{(k+i)n} K_{IIc} - A_{(k+i)s} K_{Ic}} \right\}^{\frac{1}{k}} \left\{ \frac{B_{(w+i)s} K_{Ic} - B_{(w+i)n} K_{IIc}}{A_{(w+i)n} K_{IIc} - A_{(w+i)s} K_{Ic}} \right\}^{\frac{1}{w}} = \left\{ \frac{A_{in} K_{IIc} - A_{is} K_{Ic}}{B_{is} K_{Ic} - B_{in} K_{IIc}} \right\}^{\frac{1}{w} - \frac{1}{k}}.$$

Данное равенство позволяет контролировать соотношения между коэффициентами аппроксимации, для которых возможно построение зон развития и стагнации трещины смешанного типа в пространстве переменных u_n^0 , u_s^0 , σ_n^0 и σ_s^0 , одна из которых берется зависимой.

Список литературы

1. Спиридонова, Е.В. Численно-аналитическое решение плоских задач теории трещин в смешанной постановке // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева, 2015. – № 1 (23). – С. 39-49.
2. Линьков, А.М. Комплексный метод граничных интегральных уравнений теории упругости. – СПб.: Наука, 1999. – 382 с.
3. Градштейн, И.С., Рыжик, И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.

01.01.04

В.Г. Шармин канд. физ.-мат. наук, Д.В. Шармин канд. педагог. наук,
³Е.А. Дмитриева

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»,
 Институт математики компьютерных наук,
 кафедра алгебры и математической логики,
 Тюмень, vgsharmin@mail.ru, dsharmin@mail.ru, dmitrieva1995@gmail.com

СТРОЕНИЕ МНОЖЕСТВА АКСИАЛЬНЫХ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ БЕЗ КРУЧЕНИЯ

В статье изучаются свойства поверхностей в многомерном евклидовом пространстве. Получены необходимые условия принадлежности поверхности некоторому подпространству объемлющего пространства, а также выяснено строение множества аксиальных точек поверхности без кручения.

Ключевые слова: поверхность, коэффициенты кручения, аксиальная точка, каноническая система нормалей.

В работах [1], [2] рассматривались свойства поверхностей в евклидовых пространствах, размерность которых больше трех.

Основным результатом данной статьи является теорема о строении множества аксиальных точек поверхности без кручения в евклидовом пространстве E^{n+2} , где $n > 1$.

1. Основные определения

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 1. Функции $\alpha_{ij}^k = (\vec{m}_i)_{u_j} \cdot \vec{m}_k$ называются коэффициентами кручения поверхности F^2 в E^{n+2} , где $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \dots, \vec{m}_n$ - базис нормальной n -плоскости.

Равенство

$$b_{11,i}b_{22,j} - 2b_{12,i}b_{12,j} + b_{22,i}b_{11,j} = 0, \text{ где} \quad (1)$$

$$i \neq j; i, j = 1, \dots, n$$

является необходимым и достаточным условием каноничности базиса $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \dots, \vec{m}_n$, где $b_{st,l}$ - коэффициенты второй квадратичной формы поверхности в направлении вектора $\vec{m}_l$ [3].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 2. Поверхность, у которой в каноническом базисе коэффициенты кручения равны нулю, называется поверхностью без кручения [3].

Равенство нулю коэффициентов $\alpha_{ij}^k = (\vec{m}_i)_{u_j} \cdot \vec{m}_k$ не зависит от выбора параметризации поверхности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 3. Точка на поверхности F^2 называется аксиальной, если размерность линейной оболочки векторов $\vec{b}_i = (b_{11,i}, b_{12,i}, b_{22,i}), i = 1, \dots, n$ равна единице [3].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ 4. Поверхность F^2 в E^{n+2} называется k -мерной, если существует k -плоскость E^k такая, что $F^2 \subset E^k, 3 \leq k \leq n+2$.

2. Необходимое условие принадлежности поверхности F^2 k -плоскости $E^k \subset E^{n+2}$

ТЕОРЕМА 1. Если поверхность F^2 является k -мерной, то всегда найдется канонический базис $\vec{m}_1, \vec{m}_2, \dots, \vec{m}_n$ такой, что среди функций $\alpha_{ij}^k = (\vec{m}_i)_{u_j} \cdot \vec{m}_k$ ровно $(n+k-3)(n-k+2)+n$ являются нулевыми.

Доказательство теоремы является следствием утверждения работы [3] о существовании канонической системы нормалей поверхности. Легко видеть, что $n-k+2$ векторов можно выбрать постоянными.

3. *Изолированность аксиальных точек на поверхности без кручения в E^{n+2}*

ТЕОРЕМА 2. Аксиальные точки $(n+2)$ - мерной поверхности F^2 без кручения положительной гауссовой кривизны, коэффициенты Кристоффеля $\Gamma_{\alpha\beta}^\gamma$ которой ограничены, являются изолированными.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО. Легко видеть, что если поверхность без кручения положительной гауссовой кривизны состоит из аксиальных точек, то она трехмерна. Так как гауссова кривизна поверхности положительна, то хотя бы одна из вторых квадратичных форм является эллиптической. Положим для определенности, что это φ_1 . Тогда существует такая параметризация поверхности, при которой $l_1 = n_1 \neq 0, m_1 = 0$. С учетом равенства (1) на поверхности F^2 получим $l_i = -n_i, i \neq 1$. Выпишем подсистему, состоящую из уравнений Петерсона-Кодацци, входящих в систему основных уравнений, определяющих поверхность [3]:

$$\begin{cases} l_{i_{u_2}} - m_{i_{u_1}} = (\Gamma_{11}^2 - \Gamma_{22}^2)l_i + 2\Gamma_{12}^2 m_i, \\ l_{i_{u_1}} + m_{i_{u_2}} = (\Gamma_{22}^1 - \Gamma_{11}^1)l_i + 2\Gamma_{12}^1 m_i. \end{cases} \quad (2)$$

Пусть некоторая точка $A \in F^2$ является аксиальной. Тогда для всех вторых квадратичных форм $\varphi_i, i \neq 1$ в точке $A \in F^2$ имеем $l_i = m_i = n_i = 0$. Предположим, что точка A не является изолированной, то есть через нее проходит хотя бы одна дуга, состоящая из аксиальных точек.

Найдем решения системы (2) такие, что в аксиальных точках $l_i = m_i = 0$. Система (2) является эллиптической системой уравнений, удовлетворяющей условиям теоремы Т. Карлемана. Тогда в области изменения параметров (u_1, u_2) единственным решением этой системы является $l_i \equiv m_i \equiv 0$ [4]. Итак, коэффициенты второй квадратичной формы φ_i в направлении вектора $\vec{m}_i$ равны нулю на поверхности F^2 . Следовательно, векторное поле $\vec{m}_i$ является постоянным, а значит, размерность поверхности F^2 не превосходит $(n+1)$, что невозможно, поскольку она $(n+2)$ -мерная.

4. *Заключение*

Таким образом, получено необходимое условие принадлежности поверхности некоторому подпространству и доказано, что аксиальные точки на $(n+2)$ -мерной поверхности без кручения изолированы.

Список литературы

1. *Фоменко В.Т.* Классификация двумерных поверхностей с нулевым нормальным кручением в четырехмерном пространстве постоянной кривизны / В.Т. Фоменко // Математические заметки. 2004. Т. 75, № 5. С. 744-756.
2. *Шармин В.Г., Шармина Т.Н.* Кривизна сферического образа двумерной поверхности с ненулевым кручением в E^4 / В.Г. Шармин, Т.Н. Шармина // Вестник Бурятского университета. Математика, информатика. 2017. № 1. С. 3-9.
3. *Фирсов А.И.* Канонические нормали поверхности большой коразмерности / А.И. Фирсов // Вестник МГУ. Механика. Математика. 1976. № 2. С. 37-42.
4. *Мышкис А.Д.* Единственность решения задачи Коши / А.Д. Мышкис // Успехи математических наук. 1948. Выпуск 2. С. 3-46.

01.01.00

¹А.Г. Шляхова канд. техн. наук, ²А.Т. Шляхов канд. физ.-мат. наук,
²Л.А. Гайнулова канд. педагог. наук

¹Альметьевский государственный нефтяной институт,
 кафедра нефтегазового оборудования и технологии машиностроения,
 Альметьевск,

²Казанский Кооперативный Институт Российского Университета Кооперации,
 кафедра естественных дисциплин сервиса и туризма,
 Казань, 9274573382@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В ЦЕНТРАЛЬНО - СИММЕТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

«Полезно решать дифференциальные уравнения»

И.Ньютон

В данной работе рассмотрено движение точки в центрально-симметрическом поле. Показано, что в зависимости от начальных условий точка либо удаляется от центра поля, либо к нему приближается.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, физические законы, центрально-симметрическое поле, логарифмическая спираль.

С введением новых стандартов ФГОС ВПО, кроме фундаментального обучения, необходимо развивать навыки экспериментально-исследовательской деятельности. Поэтому даже по дисциплине «Математика» вводится лабораторный практикум, сочетающий знания математики, физики, химии, экономики и информатики [1-4], что способствует усилению прикладной направленности обучения. Многие физические законы имеют вид дифференциальных уравнений. Вывод этих уравнений основан на знании законов изучаемых явлений. Задача интегрирования этих уравнений - важнейшая задача математики.

Пример. Материальная точка массой m движется под действием силы притяжения F к неподвижной точке O , изменяющейся обратно пропорционально кубу расстояния между точками и пропорционально массе точки m . Коэффициент пропорциональности равен единице. В начальный момент времени при $t=0$ координата x_0 и скорость v_0 ($\vec{v}_0 \uparrow \downarrow \vec{F}$). Определить закон движения точки?

$$F = -\frac{m}{x^3} = ma = \frac{mdv}{dt} = \frac{mvdv}{dx} \Rightarrow vdv = -\frac{dx}{x^3} \Rightarrow \int_{v_0}^v vdv = -\int_{x_0}^x \frac{dx}{x^3} \Rightarrow \frac{v^2}{2} \Big|_{v_0}^v =$$

$$= \frac{1}{2x^2} \Big|_{x_0}^x \Rightarrow v^2 - v_0^2 = \frac{1}{x^2} - \frac{1}{x_0^2} \Rightarrow v = \sqrt{v_0^2 + \frac{1}{x^2} - \frac{1}{x_0^2}}, \quad (*)$$

Возможны два случая рассмотрения:

1) $v_0 \geq \frac{1}{x_0}$. Пусть $v_0 = \frac{1}{x_0}$, например, $x_0 = 2м$, $v_0 = 0,5 м/с$

2) $v_0 < \frac{1}{x_0}$. Например, $x_0 = 2м$, $v_0 = 0,3 м/с$

1. Скорость точки (*) при первом условии:

$$v = \frac{1}{x} \Rightarrow \frac{dx}{dt} = \frac{1}{x} \Rightarrow xdx = dt \Rightarrow \int_{x_0}^x xdx = \int_0^t dt \Rightarrow \frac{x^2}{2} \Big|_{x_0}^x = t \Rightarrow x^2 - x_0^2 = 2t \Rightarrow x = \sqrt{x_0^2 + 2t} \quad \text{При}$$

$$x_0 = 2м \Rightarrow x = \sqrt{4 + 2t} \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{4 + 2t}}, \quad t \rightarrow \infty \Rightarrow x \rightarrow \infty, \quad v \rightarrow 0 \quad (\text{рис.1}).$$

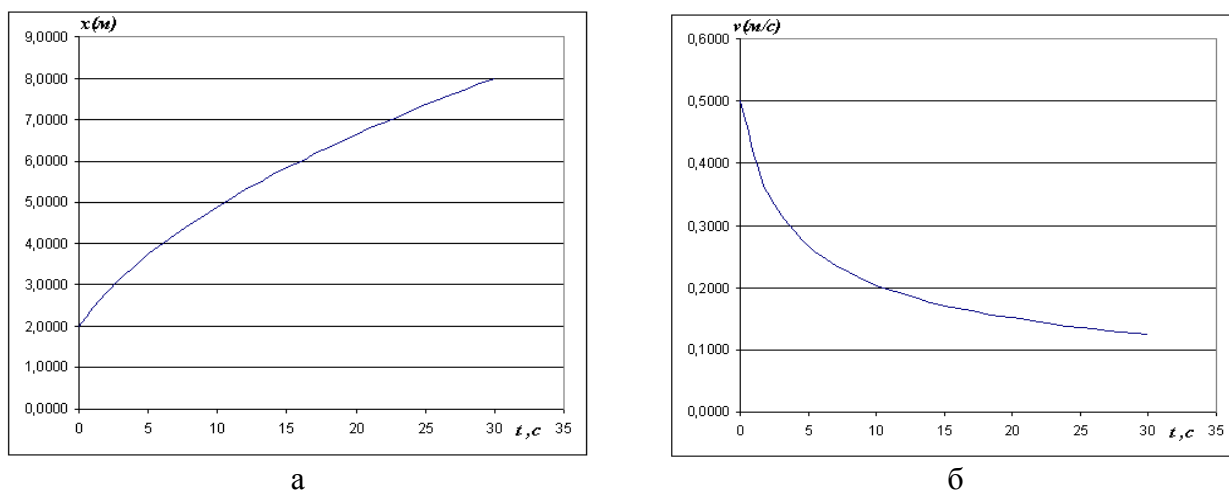


Рис. 1- Зависимости координаты точки (а) и скорости (б) от времени при условии ее удаления от силового центра притяжения

Первый случай является условием для нахождения аналога «первой (второй) космической скорости». Далее будет показано, что это частное условие, есть следствие фундаментальных законов природы.

2. Скорость точки (*) при втором условии ($x_0 = 2m$, $v_0 = 0,3m/c$) имеет вид:

$$v = \sqrt{0,09 + \frac{1}{x^2} - \frac{1}{4}} = \frac{\sqrt{1-0,16x^2}}{x} \Rightarrow v = \frac{dx}{dt} = \frac{\sqrt{1-0,16x^2}}{x} \Rightarrow \frac{xdx}{\sqrt{1-0,16x^2}} = dt \Rightarrow \int_{x_0}^x \frac{xdx}{\sqrt{1-0,16x^2}} = \int_0^t dt \Rightarrow -\frac{1}{2 \cdot 0,16} \int_{x_0}^x \frac{d(1-0,16x^2)}{\sqrt{1-0,16x^2}} = t \Rightarrow -\sqrt{1-0,16x^2} \Big|_{x_0}^x = 0,16t \Rightarrow -\sqrt{1-0,16x^2} + \sqrt{1-0,16 \cdot 4} = 0,16t \Rightarrow (0,6 - 0,16t)^2 = 1 - 0,16x^2 \Rightarrow x = \sqrt{4 + 1,2t - 0,16t^2}$$

$x = f(t)$ имеет максимум при $t = 3,75 c$, действительно, из условия

$$x' = 0 \Rightarrow 0,6 - 0,16t = 0 \Rightarrow t = 3,75c, \quad x(3,75) = 2,5m.$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2} \frac{(1,2 - 0,32t)}{\sqrt{4 + 1,2t - 0,16t^2}} = \frac{0,6 - 0,16t}{\sqrt{4 + 1,2t - 0,16t^2}} = \frac{0,6 - 0,16t}{x(t)}; \quad v = 0 \text{ при } t = 3,75c.$$

Затем при дальнейшем увеличении времени скорость меняет знак, т.е. частица разворачивается и начинает приближаться к силовому центру притяжения О со всё возрастающей скоростью. Графики зависимости $x = f(t)$ и $v = f(t)$ красноречиво об этом свидетельствуют (рис.2).

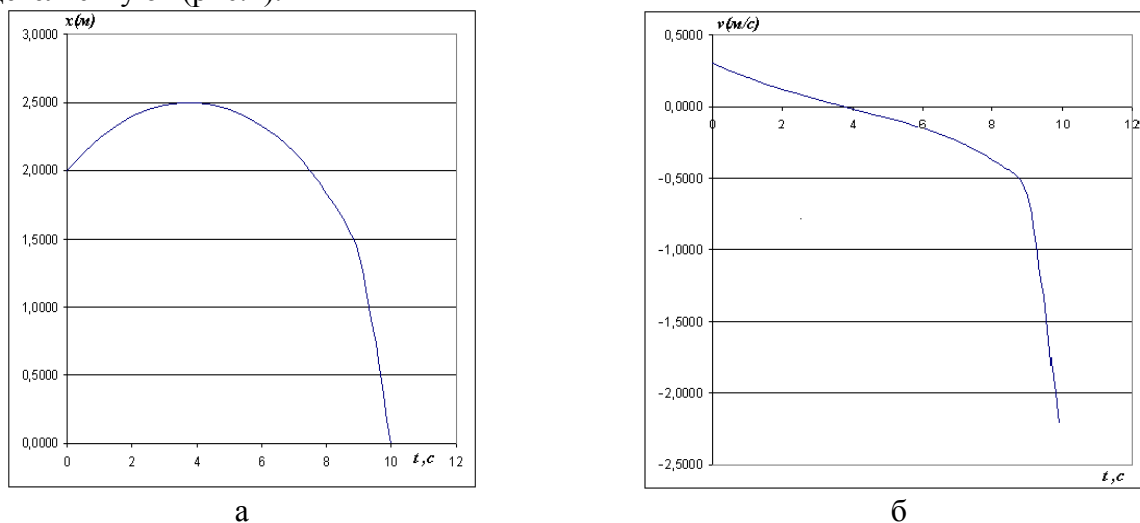


Рис. 2- Зависимости координаты точки (а) и скорости (б) от времени при условии ее приближения к силовому центру притяжения

Рассмотрим одномерное радиальное движение. Исследование движения частицы в центрально-симметрическом поле $u(r)$ сводится к определению функций $r(t)$, $\varphi(t)$ и $r(\varphi)$. Через полярные координаты (r, φ) законы сохранения энергии и момента импульса записываются в виде:

$$E = \frac{m}{2}(\dot{r}^2 + r^2\dot{\varphi}^2) + U(r) = \text{const} \text{ и } L = mr^2\dot{\varphi} = \text{const} \Rightarrow$$

$$E = \frac{m\dot{r}^2}{2} + \frac{m}{2}r^2\dot{\varphi}^2 + U(r) = \frac{m\dot{r}^2}{2} + \frac{L^2}{2mr^2} + U(r) = \frac{m\dot{r}^2}{2} + U_{\varphi\varphi}(r) \Rightarrow$$

$$E - U_{\varphi\varphi} = \frac{m\dot{r}^2}{2} \Rightarrow \dot{r} = \frac{dr}{dt} = \pm \sqrt{\frac{2}{m}(E - U_{\varphi\varphi})} \Rightarrow t = \pm \int_{r_0}^r \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{m}(E - U_{\varphi\varphi})}}, (*)$$

$$L = mr^2\dot{\varphi} = mr^2 \frac{d\varphi}{dt} \Rightarrow \varphi = \frac{L}{m} \int_0^t \frac{dt}{r^2}, (**)$$

$$F = \frac{km}{r^3}, k=1, F = -\frac{dU}{dr} \Rightarrow U = -\frac{m}{2r^2}, v_0 = \frac{1}{r_0} \text{ (например, } r_0 = 2\text{м, } v_0 = 0,5\text{ м/с)}.$$

Начальная скорость $v_0 = \dot{r}(0)$ составляет угол α между $\vec{r}_0(0)$ и $\vec{v}_0(0)$ (за полярную ось принимаем прямую, соединяющую центр поля с начальным положением частицы, и $\varphi_0 = 0$). Возможны два случая :

$$\alpha_1 = 45^\circ \Rightarrow \dot{r}(0) > 0, \sin \alpha_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}, (1), \alpha_2 = 135^\circ \Rightarrow \dot{r}(0) < 0, \sin \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}, (2)$$

$$\text{Из начальных условий } \Rightarrow E = T_0 - U_0 = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{m}{2r_0^2} = \frac{m\left(\frac{1}{r_0}\right)^2}{2} - \frac{m}{2r_0^2} = 0, E = 0.$$

$$L = mr_0 v_0 \sin \alpha = mr_0 \cdot \frac{1}{r_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{m}{\sqrt{2}}, U_{\varphi\varphi} = \frac{L^2}{2mr^2} - U = \frac{m^2}{4mr^2} - \frac{m}{2r^2} = -\frac{1 \cdot m}{4r^2}$$

Определим $r(t)$, $\varphi(t)$ и $r(\varphi)$ при первом условии (1):

$$1. \text{ Из выражения } (*) \Rightarrow t = + \int_{r_0}^r \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{m} \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{m}{r^2}}} = \sqrt{2} \int_{r_0}^r r dr = \sqrt{2} \frac{r^2}{2} \Big|_{r_0}^r = \frac{\sqrt{2}}{2} (r^2 - r_0^2)$$

$$\Rightarrow \frac{2t}{\sqrt{2}} = r^2 - r_0^2 \Rightarrow r^2 = r_0^2 + \sqrt{2} t$$

$$\text{Из формулы } (**) \Rightarrow \varphi = \frac{L}{m} \int_0^t \frac{dt}{r^2} = \frac{m}{\sqrt{2}m} \int_{r_0^2}^{r_0^2 + \sqrt{2}t} \frac{dt}{(r_0^2 + \sqrt{2} \cdot t)} = \frac{1}{2} \ln(r_0^2 + \sqrt{2} t) \Big|_0^t =$$

$$= \frac{1}{2} \ln \frac{r_0^2 + \sqrt{2} t}{r_0^2} = \frac{1}{2} \ln \frac{r^2}{r_0^2} = \ln \frac{r}{r_0} \Rightarrow \frac{r}{r_0} = e^\varphi \Rightarrow r = r_0 e^\varphi \text{ (рис.3).}$$

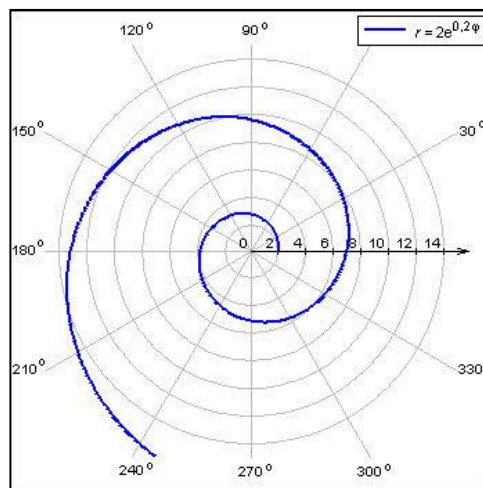


Рис. 3- Траектория логарифмической спирали точки при условии ее полной энергии $E=0$

2. При втором рассмотрении в формуле (*) перед интегралом следует взять знак минус

$$\Rightarrow r^2 = r_0^2 - \sqrt{2}t \Rightarrow \varphi = -\frac{1}{2} \ln \frac{r_0^2 - \sqrt{2}t}{r_0^2} = -\frac{1}{2} \ln \frac{r^2}{r_0^2} \Rightarrow r = r_0 e^{-\varphi}.$$

Таким образом, рассматриваемая частица при $E=0$ т.е. $v_0 = \frac{1}{r_0}$, в зависимости от знака

ее начальной радиальной скорости либо улетает на ∞ либо «падает» на силовой центр по логарифмической спирали.

Рассмотрим случай $E < 0$, т.е. $v_0 < \frac{1}{r_0}$, например, $v_0 = \frac{1}{2r_0} = 0,25 \text{ м/с}$. Пусть $\dot{r}(0) > 0$, т.е.

при $\alpha_1 = 45^\circ$. $L = \frac{m}{2\sqrt{2}}$. $E = T_0 - U_0 = \frac{m}{2 \cdot 4 \cdot r_0^2} - \frac{m}{2r_0^2} = -\frac{3m}{8r_0^2}$.

$$U_{y\phi\phi} = \frac{L^2}{2mr^2} - \frac{m}{2r^2} = -\frac{7m}{16r^2} \Rightarrow E - U_{y\phi\phi} = -\frac{3m}{8r_0^2} + \frac{7m}{16r^2} = -\frac{3m}{32} + \frac{7m}{16r^2} = \frac{m\left(7 - \frac{3}{2}r^2\right)}{16r^2}.$$

$$t = \int_{r_0}^r \frac{dr}{\sqrt{\frac{2}{m} \cdot m \left(\frac{7 - \frac{3}{2}r^2}{16r^2} \right)}} = \int_{r_0}^r \frac{4rdr}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{7 - \frac{3}{2}r^2}} \quad t = -\frac{8}{3\sqrt{2}} \left(\sqrt{7 - \frac{3}{2}r^2} - 1 \right) \Rightarrow r = \sqrt{4 + \frac{\sqrt{2}}{2}t - \frac{3}{16}t^2}.$$

$r = f(t)$ имеет максимум при $t^* = 4\sqrt{2}/3 \approx 1,885 \text{ с}$ и $r(t^*) \approx 2,16 \text{ м}$.

$$v_r = \dot{r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1/\sqrt{2} - 3/16 \cdot 2 \cdot t}{\sqrt{4 + t/\sqrt{2} - 3/16 t^2}} \right); \quad v_r = 0 \text{ при } t^* \approx 1,885 \text{ с (рис.4)}.$$

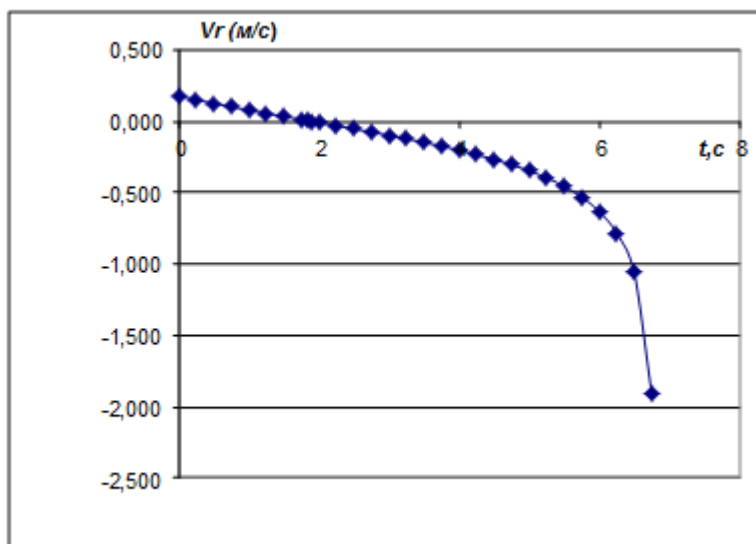


Рис.4- Зависимость радиальной скорости точки от времени при условии ее полной энергии $E < 0$

При $E < 0$ (т.е. при $v_0 < \frac{1}{r_0}$) захват частицы силовым центром происходит независимо от

знака ее начальной радиальной скорости: при $\dot{r}(0) < 0$ частица падает на центр, все время приближаясь к нему, а при $\dot{r}(0) > 0$ частица до некоторого времени t^* удаляется от центра поля, пока она не попадет в поворотную точку r^* и не изменит направление своей радиальной скорости и только затем начинает на него падать.

Список литературы

1. Микрюкова Е.Ю., Алишева Е.А., Мингазова С.Г., Шигабиев Т.Н. Применение методов математического моделирования для изучения кинетики химических реакций // Научно-технический вестник Поволжья.-2018.-№6-С.21-23.
2. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т., Биктимирова Х.С., Магдеева М.Р. Техничко -экономическое обоснование патента на изобретение № 2561335 // Научно-технический вестник Поволжья.-2018.-№11-С.178-181.
3. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т. Термический анализ веществ: идеи, реализации, результаты. // Научно-технический вестник Поволжья.-2018.-№3-С.33-36.
4. Жирнов Н.И. Классическая механика. – М.:Просвещение.-1980.-303с.

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)

02.00.00

¹Г.Е. Бордина канд. биол. наук, ¹Н.П. Лопина канд. хим. наук,
¹Е.Г. Некрасова канд. мед. наук, ²Е.В. Ожимкова канд. хим. наук,
²А.Е. Соболев канд. хим. наук

¹Тверской государственный медицинский университет,
 кафедра химии, дерматовенерологии;

²Тверской государственный технический университет,
 кафедра химии и биотехнологии,

ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ

Эфирные масла обладают множеством полезных свойств, поэтому пользуются большим спросом на фармацевтическом рынке. Многие производители идут на ухищрения, чтобы увеличить выпуск конечной продукции. Проблема фальсификации на сегодняшний день особенно актуальна. Пользование фальсифицированными эфирными маслами неблагоприятно сказывается на здоровье человека.

Ключевые слова: эфирные масла, ИК-спектроскопия, характеристические частоты, органолептические свойства.

Эфирные масла используются в традиционной фармакологии, так как обладают целебными свойствами. Фармакологическое действие эфирных масел разнообразно (противовоспалительное, антимикробное, спазмолитическое, желчегонное и др.) и обусловлено наличием в их составе определенных функциональных групп. Эфирные масла используются не только для лечения, но и для профилактики различных заболеваний. При этом масло должно соответствовать заявленному составу, только тогда станет реальным ожидаемый результат лечения. Качественный состав масла устанавливается при помощи метода ИК-спектроскопии, широко применяемого в медицине и фармакологии. Учитывая возрастающую роль профилактики в современной медицине, можно уверенно говорить о возрастании роли эфирных масел в данной области: правильно подобранное масло оказывает на организм человека исключительно положительное воздействие, не имея никаких побочных эффектов [1, 2, 3].

Цель исследования: идентификация образцов эфирных масел, представленных на фармацевтическом рынке.

Материалы и методы: исследовано 3 образца эфирных масел (лаванды, семян брокколи, жожоба и нероли).

Для идентификации исследуемых образцов масел использовали метод ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье [4, 5].

В работе использовались эфирные масла следующих производителей (табл. 1).

Таблица 1

Эфирные масла и их производители.

Эфирное масло	Производитель
Лаванда	ООО «Натуральные масла», Россия
Семян брокколи	ООО «Спивак», Россия (страна производства – Германия)
Жожоба и нероли	ООО «Спивак», Россия (страна производства – Нидерланды)

Для трех эфирных масел были сняты ИК-спектры.

ИК-спектр эфирного масла лаванды (рис.1)

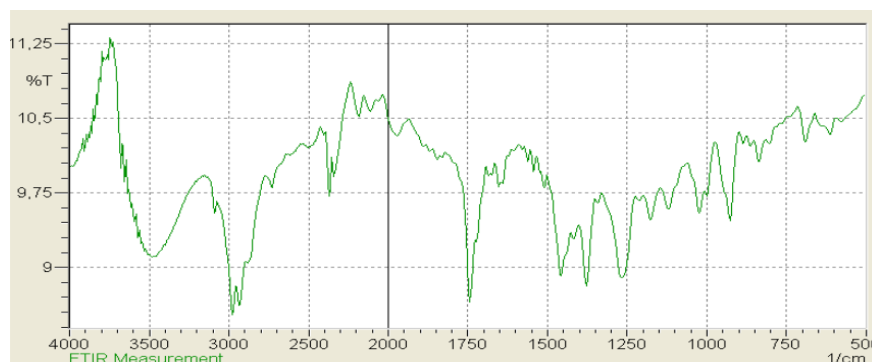


Рис. 1- Спектр масла лаванды

В лавандовом масле основными составляющими элементами являются сложные эфиры и спирты. Из спиртов наиболее велико содержание линалоола, относящегося к терпеноидам. Из эфиров самый высокий процент содержания имеет линалилацетат (рис.2), сложный эфир линалоола и уксусной кислоты, относящийся к терпеноидам.

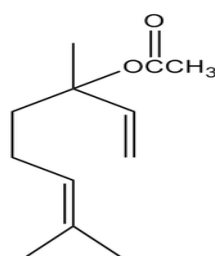


Рис. 2- Линалилацетат

На частоте 1750 см^{-1} проявляются валентные колебания $\text{C}=\text{O}$ в сложных эфирах. Пик ярко выражен и довольно интенсивен, что свидетельствует о большом количестве соединений, включающих в свой состав данную функциональную группу.

В диапазоне $1450\text{--}1250\text{ см}^{-1}$ наблюдаются 3 пика средней интенсивности. Данные частоты характерны для колебаний, связанных с $\text{C}-\text{OH}$ группой, являющейся структурным элементом линалоола. Диапазон принадлежит “области отпечатков пальцев”, а это означает, что участок спектра в этой области имеет большое практическое значение, так как по колебаниям в диапазоне частот $1500\text{--}500\text{ см}^{-1}$ обычно проводится идентификация соединений.

На частотах $1420\text{--}1410\text{ см}^{-1}$, 905 см^{-1} можно увидеть полосы поглощения, характерные для двойных $\text{C}=\text{C}$ связей, что свидетельствует о наличии в составе лавандового масла непредельных соединений. Полосы лежат в зоне деформационных колебаний.

Пик сильной интенсивности на частоте 3000 см^{-1} демонстрирует валентные колебания, означающие присутствие тех же двойных $\text{C}=\text{C}$ связей.

ИК-спектр эфирного масла брокколи (рис.3)

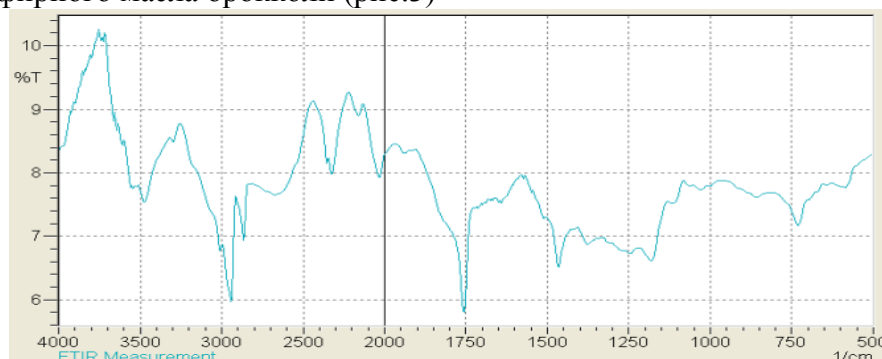


Рис. 3- Спектр масла брокколи

Масло семян брокколи содержит уникальную композицию жирных кислот: эруковая кислота (44%), олеиновая кислота (16%), линолевая кислота (10-14%) и др.

На частоте $3000\text{--}2950\text{ см}^{-1}$ хорошо выражен пик, свидетельствующий о присутствии $\text{C}-\text{H}$ связей (sp^3 гибридизация). Небольшое расщепление пика влево по оси X говорит о наличии также и двойных связей в соединении.

Валентные колебания на частоте 1750 см^{-1} указывают на наличие карбоксильных групп карбоновых кислот и подтверждают их присутствие в составе масла брокколи. В то же время на ИК-спектре отсутствуют пики $1720, 1715\text{--}1680\text{ см}^{-1}$ характерные для двойных связей, что говорит о том, что в анализируемом образце отсутствуют непредельные кислоты, заявленные в составе данного эфирного масла.

Пик средней интенсивности в диапазоне $1480\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ может подтверждать присутствие сразу нескольких структурных фрагментов органических веществ: $-\text{CH}_3$ и $-\text{CH}_2-$.

Пик средней интенсивности на частоте около 740 см^{-1} так же свидетельствует о наличии фрагментов $-\text{CH}_2-$. Тип колебаний – деформационные.

ИК-спектр эфирного масла жожоба (рис.4)



Рис. 4- Спектр масла жожоба

Эфирное масло жожоба содержит комплекс различных жирных кислот: гадолеиновая (65-80%), эруковая (10-22%), олеиновая (5-15%) и др.

Пик на частоте 1750 см^{-1} указывает на наличие $\text{C}=\text{O}$ связей в карбоновых кислотах и подтверждает присутствие этих кислот в составе соединения в довольно большом количестве.

Колебания, лежащие чуть ниже 3000 см^{-1} , говорят о наличии C-H связей (sp^3 гибридизация) в соединении.

Пик средней интенсивности в диапазоне $730\text{--}700\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о присутствии в составе масла соединений с некоторым количеством двойных $\text{C}=\text{C}$ связей. В данном случае это непредельные карбоновые кислоты.

Пик в диапазоне 1470 см^{-1} может подтвердить как присутствие структурных фрагментов $-\text{CH}_3-$ ($1470\text{--}1435\text{ см}^{-1}$), так и $-\text{CH}_2-$ ($1480\text{--}1440\text{ см}^{-1}$) в составе компонентов масла.

Выводы:

1. Анализ ИК-спектров эфирных масел лаванды и жожоба показал, что их состав соответствует заявленному.

2. В ИК-спектре масла семян брокколи отсутствуют характеристические частоты, соответствующие двойным связям, что говорит о низком качестве данного эфирного масла.

Список литературы

1. Бикмурин Н.И. Натуральные растительные и эфирные масла для дыхания, питания и здоровья – 2003. – С. 32.
2. Пекли Ф.Ф. Ароматология. – М.: Медицина, 2001. – С. 288.
3. Солдатченко С.С., Кащенко Г.Ф., Головкин В.А., Гладышев В.В. Профилактика и лечение заболеваний эфирными маслами – 2003 – С. 190.
4. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы – М.: МГУ, 2012. – С. 54.
5. Пентин Ю.А. Основы молекулярной спектроскопии. – М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. С. 398.

02.00.01

¹Н.Я. Есина канд. хим. наук, ¹М.Н. Курасова канд. хим. наук,
¹О.И. Андреева канд. хим. наук, ²М.В. Тачаев канд. хим. наук, ¹И.И. Кожухова,
¹Ци Шэнхуа, ¹А.А. Годзишевская, ¹Е.С. Митрофанова

¹ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов, ФФМиЕН,
кафедра неорганической химии,
Москва, 206127@mail.ru,

²ФГБОУ ВО Российский государственный аграрный университет - МСХА
имени К.А.Тимирязева, Москва

КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ Cu(II), Ni(II), Rh(III) И Ir(IV) С ГИСТИДИНОМ

Синтезированы комплексные соединения $\text{Cu}(\text{Hist}^-)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{Hist}^-)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Rh}(\text{HistH})_2\text{Cl}_3$ и $\text{Ir}(\text{HistH})\text{Cl}_4$. Выделенные соединения охарактеризованы методами химического, рентгеноспектрального, термогравиметрического анализов и ИК-спектроскопией. Определен способ координации лиганда ионами некоторых переходных металлов.

Ключевые слова: родий, иридий, гистидин, координационные соединения, аминокислота.

Биологическая и фармакологическая активность пептидов, широко применяемых в качестве противовирусных препаратов, в значительной степени зависит от эффективности транспорта соединений в клетки. Проникновение пептидов через клеточные мембраны улучшается, если они находятся в компактном состоянии, что существенно повышает их фармакологическую активность. Способность природных пептидов, обогащенных остатками гистидина, к связыванию с ионами металлов, подтверждена рядом исследований [1-2]. С другой стороны, известно, что атомы переходных металлов в металлоферментах обычно координированы донорными атомами азота аминокислотных белковых фрагментов. Таким образом, введение металла позволяет упорядочить структуру белковых соединений, повысить селективность и, соответственно, биодоступность лекарственных препаратов. Гистидин, имеющий три различных донорных центра, в комплексных соединениях с переходными металлами проявляет широкий спектр координационных возможностей, как при комплексообразовании в водных растворах, так и в кристаллическом состоянии [3]. Поэтому синтез низкомолекулярных координационных соединений, моделирующих окружение металлов в различных биологических системах по-прежнему актуален.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Синтез комплексных соединений с гистидином в соотношениях M:L равных 1:1 и 1:2 проводился по апробированным методикам [4,5]. В ходе синтеза были выделены в твердую фазу четыре комплекса: $\text{Cu}(\text{Hist}^-)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (далее I), $\text{Ni}(\text{Hist}^-)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (далее II), $\text{Rh}(\text{HistH})_2\text{Cl}_3$ (далее III) и $\text{Ir}(\text{HistH})\text{Cl}_4$ (далее IV).

Идентификация синтезированных соединений была проведена методами химического, рентгеноспектрального, термогравиметрического анализов и ИК - спектроскопией.

Химический анализ на C, N, H проводили на CHN-анализаторе EuroVector EA3000 (Италия, 2008 г.) с точностью 0.01-0.1%. Никель(II) и медь(II) определяли титриметрически, родий и иридий – термогравиметрическим методом.

Результаты химического анализа (найденно/рассчитано) для (I): Cu (14.7/15.6), C (34.6/35.1), H (5.9/5.4), N (19.8/20.5). Для (II): Ni (14.8/14.6), C (35.3/35.6), H (6.2/5.4), N (19.2/20.7). Для (III): Rh (14.6/19.8), C (28.6/27.7), H (3.1/3.5), N (15.3/16.2). Для (IV): Ir (42.3/39.3), C (15.4/14.7), H (1.1/1.8), N (7.7/8.6).

Термограммы синтезированных соединений записывались на термоанализаторе T.A.Instruments SDT Q600 (USA)), термическая устойчивость синтезированных комплексов изучена в интервале температур 20°C-1000°C, скорость нагрева - 5°C/минуту, Pt/PtRh термопара, Pt тигли.

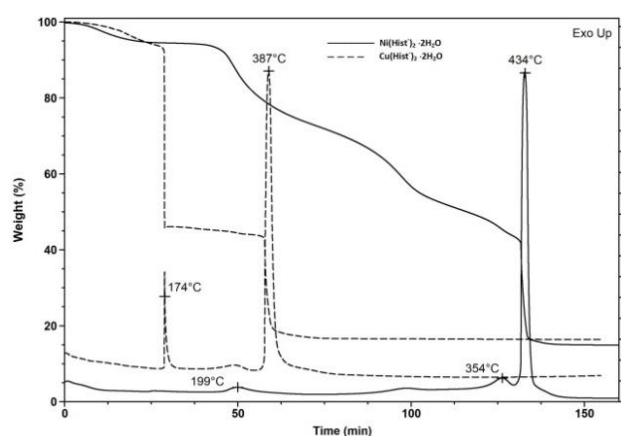


Рис. 1– Термограммы комплексов (I) и (II)

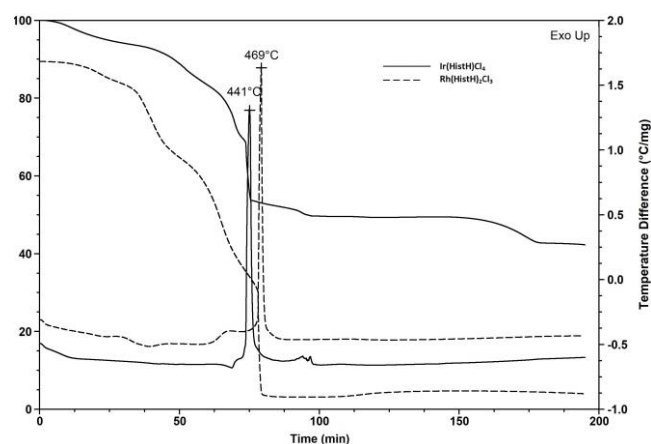


Рис. 2– Термограммы комплексов (III) и (IV)

Термогравиметрия синтезированных соединений выявила следующие закономерности: комплексы, синтезированные на основе гистидина, являются взрывоопасными. Наиболее сильно экзотермические эффекты проявились у комплексов (I) и (II). Схемы термической деструкции комплексов (I) и (II) показывают, что при температуре 50-160°C комплексы подвергаются дегидратации. На термограммах комплексов (III) и (IV) в области 100-300°C наблюдается убыль массы, по-видимому, связанная с удалением хлороводорода, что хорошо согласуется с расчётными данными. При последующем повышении температуры характер дериватограмм всех четырёх комплексов идентичен. В интервале 300-550°C наблюдаются ярко выраженные экзотермические эффекты, сопровождающие разрушение комплексных соединений и выгорание органической части молекул. Устойчивых промежуточных фаз не образуется. Конечным продуктом термолитиза являются соответственно оксид меди(II) / никеля(II) или чернь благородных металлов.

Согласно данным рентгеноспектрального анализа, проведённого на энергодисперсионном рентгено-флуоресцентном спектрометре CLEVER C-31 (40.0kV, 100.0mA, F:Cu, 0.05mm, 100s) синтезированы чистые вещества, не имеющие в составе примесей в количестве более 50ppm, которые могли бы исказить структуру или повлиять на физико-химические свойства соединений.

ИК-спектры поглощения комплексных соединений, а также исходного лиганда сняты на спектрометре Nicolet 6700 в области 4000 – 400 см⁻¹ на приставке НПВО (Pike), алмаз. Спектры комплексных соединений отличаются от спектра чистого гистидина. Имидазольное кольцо гистидина участвует в координации, по-видимому, за счет N3 гетероцикла, что подтверждается смещением полос поглощения в области 3100-3200 см⁻¹ (3003-3074 см⁻¹ в гистидине) относящихся к колебаниям связи N=CH [6].

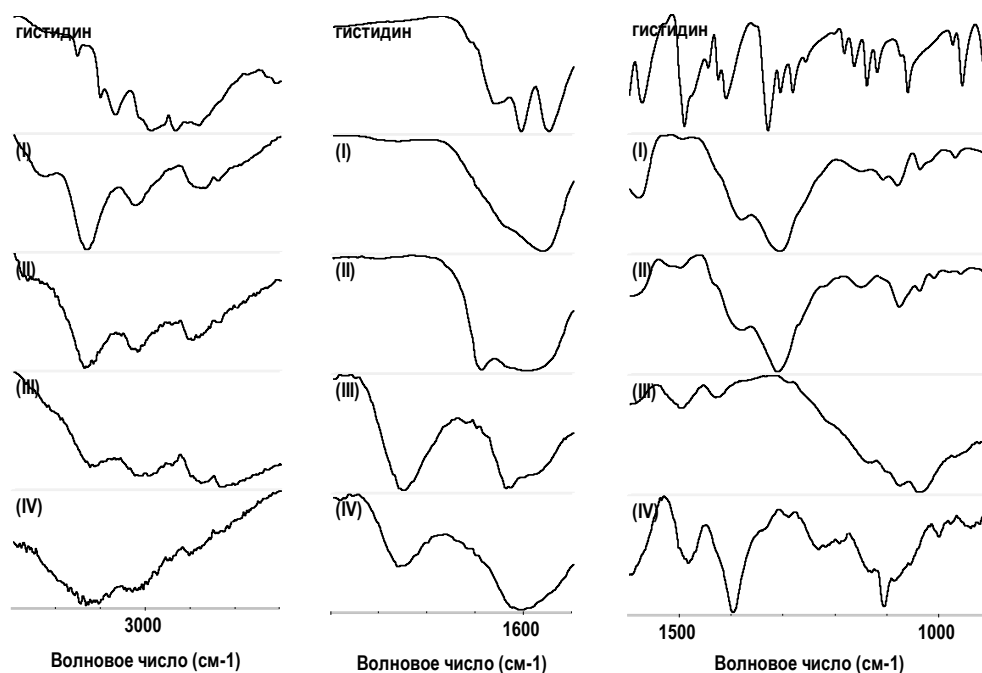


Рис.3– ИК - спектры поглощения комплексов I-IV и гистидина

Все ионы металлов координируют с гистидином за счёт NH_2 -группы, что подтверждается группой полос поглощения аминокислоты с понижающейся интенсивностью около 1510, 1150, 1070 см^{-1} , а также исчезновением полосы при 2000 см^{-1} , относящейся к обертому валентных колебаний группы NH_3^+ . В комплексных соединениях (I) и (II) проявляются полосы поглощения характерные для депротонированной карбоксильной группы гистидина, что говорит о ее возможной координации с металлом. Можно предположить, что гистидин в этих соединениях выступает как трехдентатный лиганд. В спектрах соединений (III) и (IV) проявляются полосы поглощения неионизированной COOH группы гистидина, что говорит о бидентатности лиганда в комплексах.

Таблица 1 – Волновые числа максимумов (см^{-1}) полос поглощения комплексных соединений.

	(I)	(II)	(III)	(IV)
$\nu \text{ NH}_2$ -группы	3135 (3071)	3141 (3071)	3128 (3071)	3138 (3071)
$\delta \text{ NH}_2$ -группы	1496, 1153, 1083	1503, 1154, 1080	1578, 1142, 1064	1603, 1109
Обертон $\nu \text{ NH}_3^+$ -группы	отсутствие полосы 2000			
$\nu \text{ COO}^-$ -группы	1620 (ас.) (1605), 1310 (сим.) (1414)	1600 (ас.) (1605), 1383 (сим.) (1414)		
$\nu \text{ COOH}$ -группы			1726	1732
ν и δ связей гетероцикла	1620 (1632)	1645 (1632), 1314 (1333)	1618 (1632)	1615 (1632), 1343 (1333)

Таким образом, данное исследование подтвердило, что ионы меди(II) и никеля(II) взаимодействуют с 3 координационными центрами гистидина. В комплексных соединениях родия(III) и иридия(IV) карбоксильная группа аминокислоты не участвует в координации с ионами металлов, что может быть связано, с одной стороны, с методикой синтеза, так как исходный раствор имел $\text{pH} < 7$ [7], а с другой, энергия стабилизации ионов металлов (родий и иридий) кристаллическим полем благоприятствует координации с атомами азота гистидина. Различие в способах координации гистидина ионами меди(II)/никеля(II) и родия(III)/иридия(IV) также хорошо объясняется положениями теории Пирсона [8]

(медь(II)/никель(II) – промежуточные ионы, одинаково хорошо координирующие и азот, и кислород, а родий(III)/иридий(IV), как мягкие металлы имеют большее сродство к мягким лигандам (азот)).

Список литературы

1. *Leng Q., Mixson J.* Modified branched peptides with histidine - rich tail enhance in vitro gene transfection // *Nucl. Acids. Res.* - 2005. Vol.33, - e:40.
2. *Hua Zhao H., and Waite J.H.* Proteins in Load-Bearing Junctions. The Histidine-Rich Metal-Binding Protein of Mussel Byssus // *Biochemistry.* - 2006. - 45(47). – P.14223-14231.
3. *Панюшкин В.Т., Буков Н.Н., Волинкин В.А., Болотин С.Н.* Координационная химия природных аминокислот. / М.: Изд-во «Красант», 2008., - 367 с.
4. *Есина Н.Я., Курасова М.Н., Тачаев М.В., Малага У.М.* // *Научно-технический вестник Поволжья.* - 2015. - № 1, - С. 23 - 26.
5. *Пугачев Д.В., Есина Н.Я., Курасова М.Н., Фортальнова Е.А., Венсковский Н.У., Лазаренко В.А., Тригуб А.Л., Хрусталева В.Н.* // *Журнал структурной химии (ЖСХ),* Том 58, №7, 2017, 1358 – 1363.
6. *Xin Tan, Yun-Xia Che, Ji-Min Zheng.* Two chiral complexes constructed from mixed L-histidine and L-alanine/thiocyanate ligands: Synthesis, structure, ferromagnetic and ferroelectric properties // *Inorg. Chem. Commun.* - 2012. - Т.22 – P.10-13.
7. *Youssef El Khoury, Petra Hellwig* Infrared spectroscopic characterization of copper-polyhistidine from 1,800 to 50 cm⁻¹: model systems for copper coordination // *J Biol Inorg Chem.* – 2009. - 14:23–34.
8. *Басало Ф., Пирсон Р.* Механизмы неорганических реакций. / М.: Изд-во «Мир», 1971., - 592с.

02.00.01

**В.В. Семченко канд. хим. наук, Е.А. Зеленская канд. техн. наук,
Н.П. Шабельская д-р техн. наук, А.С. Деева канд. техн. наук, А.И. Мушоряпов**

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, технологический факультет,
кафедра общей химии и технологии силикатов,
Новочеркасск, shabelskaya.nina@yandex.ru

СИНТЕЗ И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ V – Al – O

В работе изучен процесс фазообразования в сложной оксидной системе V–Al–O. Показана принципиальная возможность синтеза композиционного материала состава V_2O_5 – Al_2O_3 с применением в качестве органического восстановителя лимонной кислоты. Предложен механизм формирования фазового состава образцов в процессе синтеза и дополнительной термообработки при температурах 700 и 900 °C.

Ключевые слова: оксид ванадия, оксид алюминия, синтез оксидных соединений.

Введение

Сложные композиционные соединения на основе оксидов металлов обладают рядом важных технических свойств и являются объектом интенсивного изучения. Особый интерес представляют оксидные соединения переходных металлов переменной валентности, такие, как марганец, хром, ванадий. Применение подобных материалов связано, в первую очередь, с их высокой каталитической активностью в ряде процессов [1], например, поликонденсации индола [2], превращения метанола в диметоксиметан [3], крекинга н-гептана [4], дегидратации глицерина в акролеин [5]. Соединения на основе системы V–Al–O находят применение в качестве материалов литий-ионных аккумуляторов [6], источников питания на основе алюминия [7, 8], получения диода повышенной чувствительности «металл-изолятор-металл» [9]. Для соединения AlV_2O_4 [10] со структурой шпинели установлено формирование кластеров с зарядовым, атомным и орбитальным упорядочением.

Синтез материалов на основе разновалентных катионов переходных металлов может быть осуществлен различными способами. Как правило, синтез подобных материалов по классической керамической технологии сопряжен с длительностью термической обработки. Например, в работе [11] синтез шпинели состава AlV_2O_4 проводили из оксидов V_2O_3 , V_2O_5 и металлического Al в кварцевой ампуле при температуре 1100 °C в течение 150 часов. Для снижения энергоемкости синтеза применяют ряд технологических приемов. Так, в работе [12] использован алюмотермический процесс восстановления оксида ванадия (V) с получением соединения Al_3V , возможно использование гидротермального метода с применением в качестве органического восстановителя щавелевой кислоты [8], этанола [6], этиленгликоля [1], применяют электронно-лучевую литографию [9]. Наноразмерные композиционные материалы в системе Al_2O_3 – V_2O_5 могут быть получены с применением золь-гель методики [2], ультразвукового воздействия [3]. Как видно из приведенных примеров, синтез материалов в системе Al–V–O требует либо применения высоких температур термообработки, либо использования специальной аппаратуры. В представленной работе целью являлось проведение энергосберегающего синтеза композиционных материалов в системе Al–V–O и обсуждение возможного механизма формирования структуры образцов.

Экспериментальная часть

Синтез материалов осуществляли по методике, предложенной в работе [13], с применением следующих технологических приемов. Растворяли метаванадат аммония NH_4VO_3 в дистиллированной воде с получением раствора с концентрацией 0,3 моль/л. Добавляли 60 г лимонной кислоты $C_6H_8O_7$. Наблюдали процесс растворения с выделением газообразных продуктов реакции ее восстановления. Цвет раствора последовательно изменялся на зеленый и сине-фиолетовый. После полного растворения кислоты полученный

раствор переносили в сосуд из нержавеющей стали, добавляли порошок металлического алюминия и нагревали до полного разложения органической составляющей смеси (*образец 1*). Для изучения влияния термической обработки на фазовый состав образцы подвергали дополнительной термообработке в течение 1 часа при температурах 700 °С (*образец 2*), 900 °С (*образец 3*).

Фазовый состав образцов изучали на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (использовали Cu-K α излучение) в ЦКП «Нанотехнологии» ЮРГПУ(НПИ). Анализ количественного соотношения между фазами проводили по методике, описанной в [14]. Определение площади поверхности проводили методом БЭТ на аппарате ChemiSorb 2750 B.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1. приведены фрагменты дифрактограмм синтезированных образцов. Согласно анализу дифрактограмм, *образец 1* содержит фазы V₂O₅ (PDF Number 000-41-1426), V₆O₁₃ (PDF Number 010-89-0100), Al (PDF Number 010-72-3440) (рис. 1, а). Площадь поверхности материала имеет значение S_{БЭТ} = 4,3 м²/г. Состав образца: V₂O₅, V₆O₁₃, Al, соотношение V₂O₅ : V₆O₁₃ = 1 : 4. Проведение дополнительной термообработки материала при температуре 700 °С не приводит к изменению фазового состава (рис. 1, б), соотношение V₂O₅ : V₆O₁₃ = 3 : 2. Термообработка системы при температуре 900 °С сопровождается формированием композиционного материала состава V₂O₅ – Al₂O₃ (PDF Number 000-41-1426 (V₂O₅), 010-76-8057(Al₂O₃)) (рис. 1, в).

Процесс фазообразования в изучаемой системе может быть представлен следующими реакциями. Разложение метаванадата аммония с образованием оксида ванадия (V): 2NH₄VO₃ = 2NH₃ + H₂O + V₂O₅.

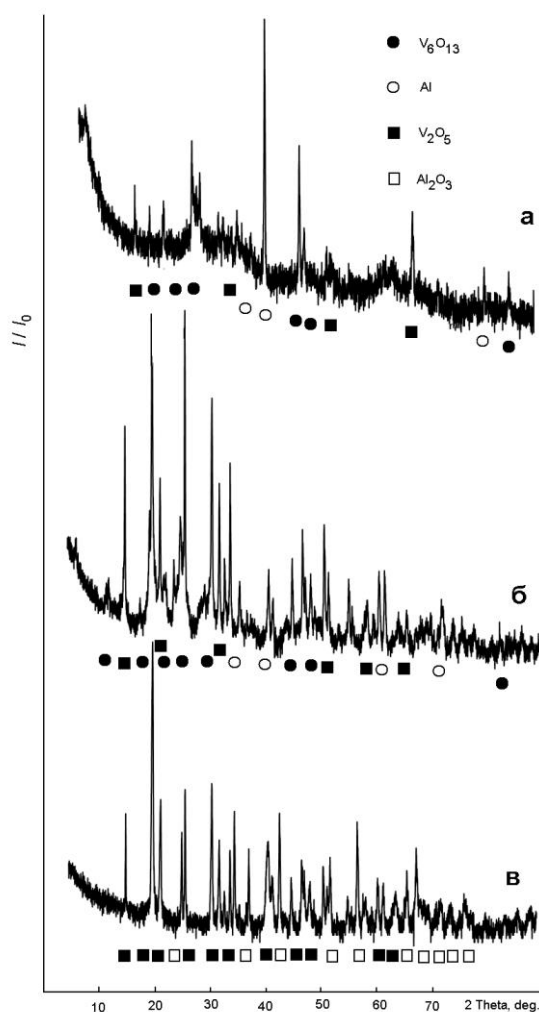
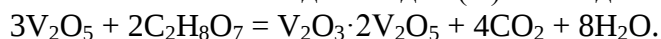


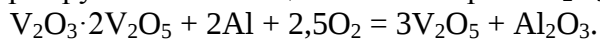
Рис. 1– Дифрактограммы образцов системы Al-V-O:
а – *образец 1*, б – *образец 2*, в – *образец 3*.

Восстановление оксида ванадия (V) в оксид ванадия (III)-(V):



Данная реакция начинает протекать, вероятно, еще в растворе. Прокаливание образца при температуре 700 °С сопровождается увеличением степени окристаллизованности фаз и соотношения $\text{V}_2\text{O}_5 \cdot \text{V}_6\text{O}_{13}$, состав образца не изменяется.

При термообработке при температуре 900 °С в реакцию вступает алюминий и формируется композиционный материал $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Al}_2\text{O}_3$:



Выводы

Изучен процесс фазообразования в сложной оксидной системе V-Al-O. Показана принципиальная возможность синтеза композиционного материала состава $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Al}_2\text{O}_3$ с применением в качестве органического восстановителя лимонной кислоты $\text{C}_2\text{H}_8\text{O}_7$. Данная методика проста в аппаратном обеспечении и позволяет получать заданное соединение при более низкой температуре термообработки, с меньшей продолжительностью по сравнению с используемыми в настоящее время технологическими приемами синтеза аналогичных материалов. Предложен механизм формирования фазового состава образцов в процессе синтеза и дополнительной термообработки при температурах 700 и 900 °С.

Список литературы

1. Usharani S., Rajendran V. Size Controlled Synthesis and Characterization of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ Nanocomposites // Colloids and Interface Science Communications. 2018. V. 24. P. 7-12.
2. Hassani H., Zakerinasab B., Hossien Poor H. Synthesis, characterization and application of alumina/ vanadium pentoxide nanocomposit by sol-gel method // Applied Organometallic Chemistry. 2018. V. 32. Is. 1. № e3945.
3. Jamei M.R., Ranjbar M., Eliassi A. Sonochemical synthesis of vanadium complex nano-particles: a new precursor for preparation and evaluation of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ nano-catalyst in selective oxidation of methanol to methylal // Journal of the Iranian Chemical Society. 2017. V. 14. Is. 12. P. 2627-2635.
4. Hu X., Yan X., Feng R., Xue J. Influences of Reaction Temperature and Carrier Gas Flow-Rate on n-Heptane Cracking over ZSM-5 Catalyst Without and With Activation of $\text{V}_2\text{O}_5/\text{Al}_2\text{O}_3$ // Bulletin of the Korean Chemical Society. 2017. V. 38. Is. 10. P. 1129-1133.
5. Mahdavi V., Monajemi A. Gas phase dehydration of glycerol catalyzed by gamma Al_2O_3 supported V_2O_5 : a statistical approach for simultaneous optimization // RSC Advances. 2016. V. 6. Is. 115. P. 114244-114255.
6. Wu X., Zou Z., Li S., Yang Q. Solvothermal preparation of Al/Fe-doped V_6O_{13} as cathode materials for lithium-ion batteries with enhanced electrochemical performance // Journal of Electroanalytical Chemistry. 2018. V. 829. P. 20-26.
7. Gu S., Wang H., Wu C., Bai Y., Li H., Wu F. Confirming reversible Al^{3+} storage mechanism through intercalation of Al^{3+} into V_2O_5 nanowires in a rechargeable aluminum battery // Energy Storage Materials. 2017. V. 6. P. 9-17.
8. Yuan Q., Zou Z. Hydrothermal Synthesis of Al/Cr-doped V_6O_{13} as Cathode Material for Lithium-ion Battery // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 88. № 010062016.
9. Abdel-Rahman M., Issa K., Zia M.F., Alduraibi M., Siraj M., Ragheb A., Alshebeili S. High sensitivity vanadium-vanadium pentoxide-aluminium metal-insulator-metal diode // Micro and Nano Letters. 2018. V. 13. Is. 5. P. 680-683.
10. Talanov M.V., Shirokov V.B., Avakyan L.A., Talanov V.M., Borlakov Kh.Sh. Vanadium clusters formation in geometrically frustrated spinel oxide AlV_2O_4 // Acta Cryst. 2018. B74. P. 1-17.
11. Matsuno K., Katsufuji T., Mori S., Moritomo Y., Machida A., Nishibori E., Takata M., Sakata M., Yamamoto N., Takagi H. Charge Ordering in the Geometrically Frustrated Spinel AlV_2O_4 // Journal of the Physical Society of Japan. 2001. V. 70. No. 6. P. 1456-1459.

12. Xu Y., Jiao H., Wang M., Jiao, S. Direct preparation of V-Al alloy by molten salt electrolysis of soluble NaVO_3 on a liquid Al cathode // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 779. P. 22-29.
13. Шабельская Н.П. Процессы фазообразования в системе $\text{NiO} - \text{CuO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Cr}_2\text{O}_3$ при разложении солей // *Неорганические материалы*. 2014. Т. 55. № 11. С. 1205-1209.
14. Шабельская Н.П., Таланов М.В., Захарченко И.Н., Кирюшина Р.О., Ульянов А.К., Резниченко Л.А. Исследование процессов образования хромитов MCr_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cd}, \text{Mg}$) // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. 2013. Т. 56. №. 8. С. 59-62.

02.00.00

Е.А. Смирнова канд. хим. наук

Ярославский государственный технический университет,
химико-технологический факультет,
кафедра общей и физической химии,
Ярославль, smirnovaea@ystu.ru

РАСТВОР ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

В работе представлены результаты изучения влияния состава растворов на качество обработки поверхности изделий, емкость травильных растворов и скорость селективного травления нержавеющей стали, находящихся в контакте с медью.

Ключевые слова: *химическое селективное травление, состав травильных растворов, нержавеющая сталь, медь.*

Одним из самых перспективных методов обработки неорганических материалов является метод химического фрезерования, основной технологической операцией которого является химическое травление. Большое количество литературных данных по составу травильных растворов относится в основном к обработке поверхности определенных металлов и их сплавов [1-3]. Такие растворы не позволяют проводить избирательное травление металлов, находящихся в контакте с другими металлами или сплавами. Недостаток литературных данных по селективному травлению металлов приводит к необходимости подробного исследования этого процесса.

Целью данной работы являлась разработка состава травильных растворов для селективного травления нержавеющей стали, находящихся в контакте с медью. Основные критерии выбора состава растворов: селективное качественное травление стали, высокая скорость травления, большая емкость травильного раствора, невысокая температура процесса, хорошие экономические условия производства, возможность захоронения отходов. Такие жесткие условия ограничили выбор основного компонента травильного раствора серной кислотой.

Выбор основного компонента раствора и его концентрации проводился на основании экспериментальных данных, полученных при химическом травлении плат из стали С8КП, находящейся в контакте с медью, в стационарных условиях и при струйном травлении. Использование растворов при струйном травлении дает значительное увеличение скорости травления.

С целью изучения влияния концентрации серной кислоты на свойства травильных водных растворов было проведено изучение скорости травления при массовой доле кислоты в растворах от 5 до 60 % при температуре 40 °С. Было установлено, что массовая доля серной кислоты в растворе ниже 40 и выше 53 % снижает скорость травления. Кроме того, эксперимент показал, что в этом интервале концентраций кислоты качество травления неудовлетворительное. Селективность раствора также снижается из-за частичного растворения меди.

Ранее [3, 4] при изучении механизма струйного метода травления нержавеющей стали было показано влияние структуры и состава органических добавок к травильному раствору на скорость травления и боковое подтравливание. При струйном методе на скорость травления большое влияние оказывает вязкость травильного раствора, омывающего металл. Уменьшение вязкости раствора позволяет увеличить относительную скорость травления в направлении потока по сравнению со скоростью подтравливания на боковых гранях. Введение в раствор органических добавок, имеющих линейную структуру и содержащих электроненасыщенные группы атомов, должно уменьшить вязкость раствора. Такие

молекулы будут оказывать ориентирующие действие на компоненты в движущемся потоке травильного раствора и увеличат скорость взаимодействия металлов с окислителем. При этом должна уменьшиться адсорбция ионов железа на боковой поверхности изделия и окислитель значительно интенсивнее будет реагировать с металлом в направлении движения потока.

С этой целью в качестве добавки к серноокислотному раствору была испытана щавелевая кислота, при добавлении которой к раствору наблюдалось более качественное глубинное травление стали. Для выбора оптимального содержания щавелевой кислоты в растворе изучено влияние концентрации щавелевой кислоты на свойства травильного серноокислотного раствора при температуре 40 °С (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость скорости травления стали и емкости травильного раствора от массовой доли щавелевой кислоты

Массовая доля компонентов раствора, %		Скорость травления, мкм/мин	Емкость травильного раствора, г/л
Серная кислота	Щавелевая кислота		
42	4,1	5,2	14,1
42	3,4	4,9	20,4
42	2,8	3,1	32,4
47	1,5	2,3	61,3

Эксперимент показывает, что введение щавелевой кислоты снижает скорость травления стали. Причем с увеличением концентрации щавелевой кислоты в растворе происходит увеличение скорости травления и уменьшение емкости раствора. Кроме того, в растворе щавелевой кислоты, близкому к насыщенному (массовая доля щавелевой кислоты около 4 %), при травлении стали происходит кристаллизация и выпадает осадок, что ухудшает технологические свойства раствора. Вместе с тем при введении щавелевой кислоты в раствор уменьшается боковое подтравливание и повышается чистота обрабатываемой поверхности.

Для определения скорости травления образцы плат предварительно взвешивали на аналитических весах и помещали в термостатированный стакан с исследуемым травильным раствором. Температура раствора составляла 40 °С и поддерживалась с помощью ультратермостата. Процесс травления образцов проводили в течение 15-60 минут. Образцы печатных плат промывали в проточной воде, сушили в сушильном шкафу и взвешивали. Скорость травления рассчитывали по изменению веса образца в единицу времени. Каждый опыт проводили не менее трех раз. Чистоту поверхности образца контролировали с помощью микроскопа.

Анализ растворов на содержание ионов железа (III) и меди проводился методом комплексонометрического титрования, а ионов железа (II) – методом амперометрического титрования. Определение щавелевой кислоты в травильных растворах проводили совместным окислением щавелевой кислоты и ионов двухвалентного железа раствором перманганата калия в кислой среде.

Для определения емкости травителя процесс растворения плат проводили многократно в одном и том же растворе до резкого уменьшения скорости травления.

С целью увеличения скорости травления и емкости растворов были изучены серноокислотные растворы с добавками пероксида водорода и соли Мора. Как показал эксперимент, добавление пероксида водорода снижает селективность раствора. При введении в травильные растворы соли Мора повышается емкость растворов (табл. 2). Зависимость скорости травления от концентрации соли Мора носит экстремальный характер (рис.1). Это, очевидно, связано с положительным влиянием соли Мора на соотношение скоростей первой и второй стадий окисления железа до двух- и трехвалентного состояния. Оптимальной является массовая доля соли Мора в травильном растворе 1,5-2,2%. При этом скорость травления достигает 17-18 мкм/мин, а емкость раствора 92-97 г/л.

Таблица 2. Зависимость емкости травильного раствора от массовой доли соли Мора

Массовая доля компонентов раствора, %			Емкость травильного раствора, г/л
Серная кислота	Щавелевая кислота	Соль Мора	
47	2,8	0,5	59,5
47	2,8	0,75	79,0
47	2,8	1,15	84,5
47	2,8	1,50	92,0
53	1,5	1,50	96,7
47	2,8	2,20	108,0
47	2,8	3,60	121,0

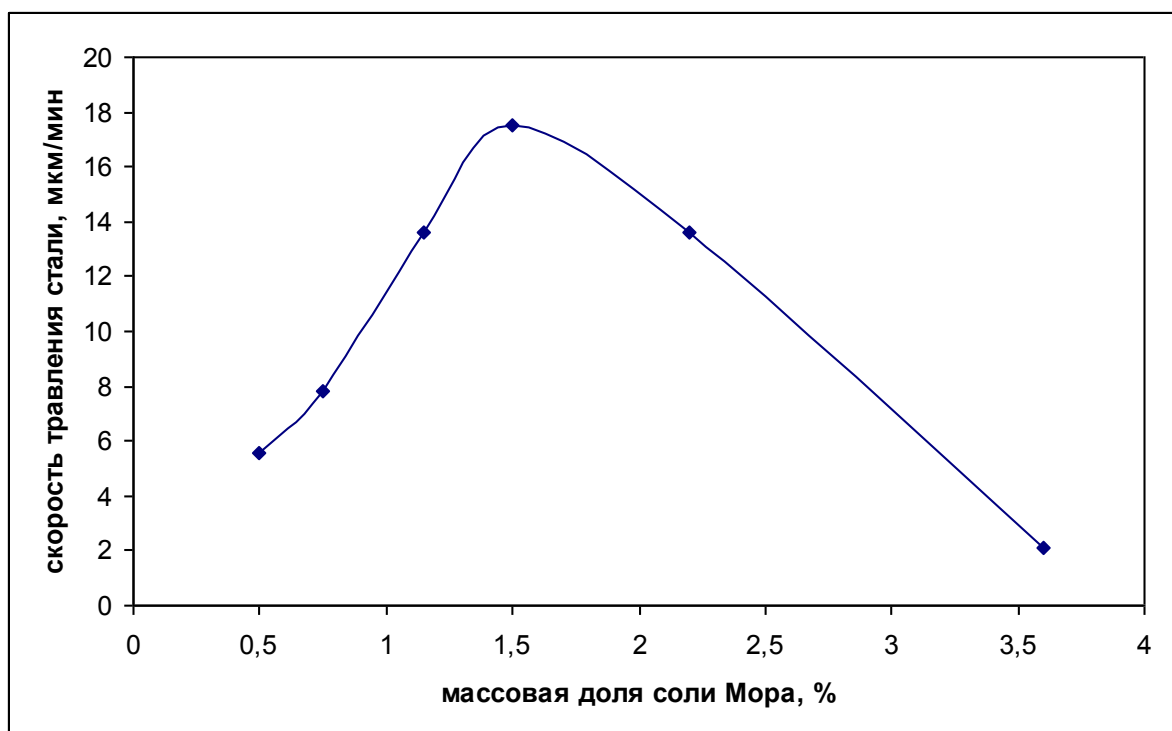


Рис. 1- Зависимость скорости травления стали от массовой доли соли Мора

Список литературы

1. Состав для травления стали: а.с. 1221255 СССР: МКИ 4С 23 F 1/28. / Степанов В.Ю., Назаров А.А., Краснянский Б.Г., Шушканова И.М.; заявл. 30.05.1983; опубл.30.03.1986.
2. Раствор для фотохимического фрезерования изделий из меди и медных сплавов: а.с. 4619615-02 СССР: МКИ 4С 23 F 1/28. / Чебунин А.Н., Киселев А.А., Смирнов В.В., Казина С.В., Степанов Е.Г., Смирнова Е.А.; заявл. 13.12.1988; опубл. 15.02.1992.
3. Смирнова Е.А. Влияние состава растворов на скорость травления нержавеющей сталей // Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – № 11. – С. 69-71.
4. Степанов Е.Г., Чебунин А.Н., Смирнова Е.А. Изучение влияния органических добавок на вязкость травильного раствора хлорида железа // Электронная техника. – 1990. – сер.7. – № 2. – С. 68-71.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.04

**А.Н. Болотов д-р техн. наук, О.О. Новикова канд. техн. наук,
В.В. Новиков канд. техн. наук**

Тверской государственный технический университет,
машиностроительный факультет,
кафедра прикладной физики,
Тверь, alnikbltov@rambler.ru

ЭФФЕКТ ПЛАСТИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СМАЗАННОЙ МАГНИТНЫМ МАСЛОМ

Изложены результаты исследования особенностей проявления адсорбционного пластифицирования стали под действием магнитных смазочных сред, в присутствии неоднородного магнитного поля. Установлено что пластифицирующее действие существенно снижает микротвердость поверхности по глубине и его значение стремится к насыщению через несколько часов.

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, поверхностные эффекты, управление трением, трение, износ.

Узлы трения, имеющие в качестве смазочного материала магнитные среды, получают все большее применение в конструкциях ответственного наукоемкого оборудования [1, 2]. При целенаправленном улучшении трибосвойств узлов трения с магнитными маслами, и создании новых композиций магнитных смазочных материалов необходимо учитывать особенности протекания физических процессов в зоне фрикционного контакта в присутствии магнитных нанодисперсных материалов, растворенных в сложных активных дисперсионных средах [3, 4].

При контакте твердых тел с адсорбционно-активными жидкими средами проявляется обнаруженный Ребиндером эффект понижения сопротивления деформации их поверхностного слоя. Этот эффект, называемый адсорбционным пластифицированием поверхности, проявляется в снижении предела текучести и коэффициента упрочнения поверхности, что, несомненно, влияет на фрикционное взаимодействие.

Целью исследования являлось изучение особенностей проявления адсорбционного пластифицирования стали под действием магнитной жидкости (масла) и при наложении неоднородного магнитного поля.

Материалы и методы. Экспериментально изучалось проявление эффекта адсорбционного пластифицирования при нанесении на поверхность стали магнитного смазочного масла с одновременным воздействием неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности. Также оценивалось пластифицирующее действие модельных сред, содержащих компоненты как у магнитной смазочной среды, но без нанодисперсного магнетита.

Деформационные свойства тонких поверхностных слоев оценивали по их микротвердости на приборе ПМТ-3 методом индентирования алмазной пирамидой Кнуппа, что позволило исследовать тонкие поверхностные слои металла глубиной менее 2 мкм. Действие адсорбционной активной среды на поверхность определялось величиной изменения микротвердости поверхности $\Delta H = H_s - H_f$, где H_s - микротвердость поверхности, измерялась сразу после нанесения исследуемой жидкости; H_f - микротвердость поверхности, измеренная при той же нагрузке на индентор, но после фиксированного времени выдержки с нанесенной на поверхность жидкостью.

Изменение микротвердости поверхности оценивали по среднему значению из десяти измерений. Время выдержки под нагрузкой для одного измерения составляло 15 с. Диапазон нагрузок изменялся от 0,5 Н до 2,0 Н. Объектом исследований были пластинки из стали У10А с микротвердостью $H_f = 9,5$ ГПа, поверхность которых полировали до $Ra = 0,12$ мкм и после обработки тщательно промывали.

Для оценки скорости формирования граничного смазочного слоя изучалось взаимодействие с поверхностью трех различных по составу магнитных масел ММ-ТЭА, ММ-ПЭС, ММ-И с поверхностью стали 20 и бронзы ОСЦ 4-4-2,5. Масло ММ-ТЭА состоит только из триэтанолamina (ТЭА) и наночастиц железа (5 об.%), масло ММ-ПЭС содержит кремнийорганическую жидкость ПЭС-5 и магнетит (5 об.%), стабилизированный олеиновой кислотой. В состав масла ММ-И входит индустриальное масло без присадок марки И-Г-А-32 (И-20А) и магнетит (8 об.%), стабилизированный олеиновой кислотой. Испытания проводились на трехпальчиковой машине трения МТП [5] при скорости скольжения 0,24 м/с и давлении 6,5 МПа. Погрешность измерения износа – 2,5%, измерения коэффициента трения – 0,5%.

Результаты исследований. Как видно из рис.1, на котором представлены результаты опытов, пластифицирующее действие хорошо выражено как по глубине, так и во времени. Наиболее сильно действие эффекта распространяется на глубину до $1 \div 1,5$ мкм, а его значение стремится к насыщению через несколько часов. Магнитное масло ММ-ПЭС непосредственно после нанесения (без магнитного поля) сильнее пластифицирует поверхность, чем модельное масло. С течением времени эффект пластифицирования усиливается и качественное различие между действием магнитного и немагнитного масла остается прежним.

В магнитном масле по сравнению с немагнитным поверхностная энергия твердого тела снижается не только за счет насыщения свободных энергетических связей адсорбированными молекулами олеиновой кислоты, но и дополнительно магнитными дисперсными частицами. В немагнитном масле адсорбционный слой формируется из молекул ПАВ, которые диффундируют к ней из объема. В магнитном масле наряду с молекулами ПАВ происходит движение однодоменных дисперсных частиц к поверхности за счет магнитного притяжения. На своей поверхности они также несут молекулы ПАВ, которые могут десорбироваться с нее и увеличить концентрацию молекул около поверхности твердого тела, потенциально способных на ней адсорбироваться. Приведенные отличия в структуре адсорбционных слоев и механизме их формирования на межфазной поверхности, магнитного или немагнитного масла, и твердой поверхностью являются причиной различий в скорости и величине снижения микротвердости этими маслами.

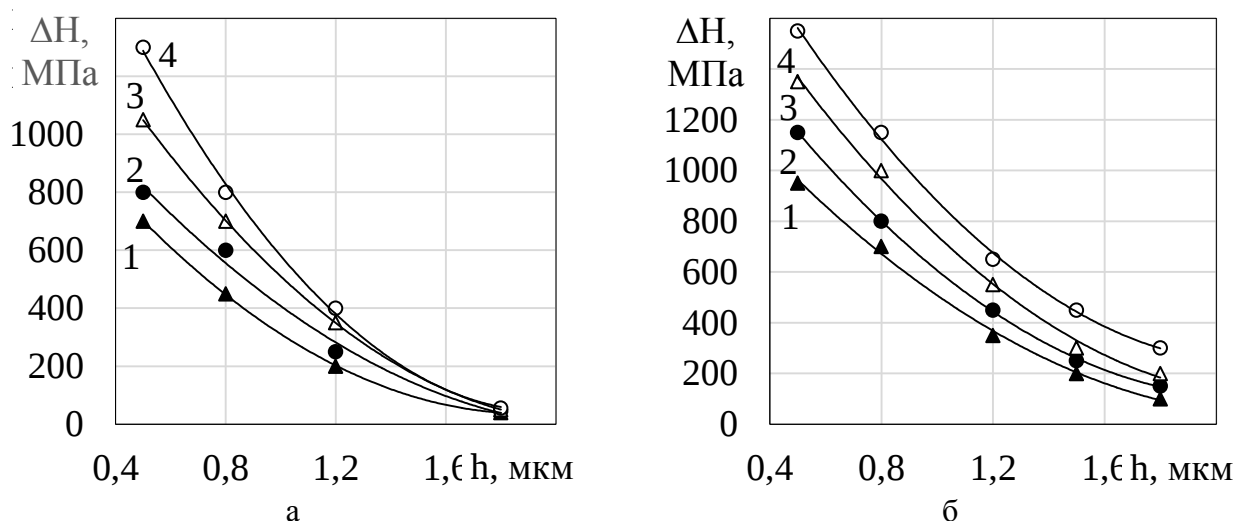


Рис. 1- Изменение микротвердости стали У10А под действием различных сред, после нанесения на поверхность: а – через 0,5 часа, б – через 4 часа. 1 – ПЭС – 5 + 5%ОК, 2 – ММ – ПЭС без поля, 3 – ММ – ПЭС магнитном поле (24 кА/м), 4 – ММ – ПЭС в магнитном поле (80 кА/м)

Наложение неоднородного магнитного поля с градиентом, направленным к поверхности стали, приводит к тому, что по мере его увеличения пластифицирующее действие магнитного масла еще более ускоряется и величина эффекта становится больше (рис.1). Внешнее магнитное поле способствует тому, чтобы частицы быстрее преодолели хаотическое тепловое движение и упорядоченно сконцентрировались около твердой поверхности. Известно, что сильнее пластифицируют поверхность вещества, имеющие химическое сродство с материалом поверхности [7]. Дисперсные частицы магнетита имеют как раз сродство с окисными пленками на стали, и это вместе с повышенной их концентрацией около поверхности способствует более сильному пластифицированию в магнитном поле, чем без него.

Таблица - Смазочные свойства магнитных масел и их дисперсионных сред

№	Смазочный материал	$I_h \cdot 10^{-9}$	f
1	Масло И-20А	4,0	0,14
2	Жидкость ПЭС-5	16,0	0,15
3	Жидкость ПЭС-5+1% олеиновой кислоты	20,0	0,13
4	Жидкость ПЭС-5+5% олеиновой кислоты	25,0	0,13
5	Жидкость ТЭА	13,2	0,13
6	ММ – ТЭА	8,2	0,13
7	ММ – ПЭС	6,2	0,10
8	ММ – И	6,8	0,10

Интенсивность линейного изнашивания I_h и коэффициент трения f всех используемых для опытов веществ приведены в таблице.

По скорости изменения микротвердости поверхности после нанесения слоя масла можно косвенно судить о скорости формирования граничного смазочного слоя при трении. Особенностью магнитных масел является то, что при воздействии на смазанный ими фрикционный контакт магнитным полем, можно этот процесс значительно ускорить. Это и является одной из причин лучших смазочных свойств у магнитного масла ММ-ПЭС, чем у модельного на основе ПЭС-5.

Заключение. Проведенная оценка влияния пластифицирования поверхностей, смазанных магнитным маслом на их фрикционное взаимодействие, позволит направленно влиять на триботехнические характеристики трибоузлов. Однако необходимо дальнейшее более детальное изучение влияния магнитного поля на изменение механических свойств магнитожидкостных пар трения, особенно с учетом другого проявления эффекта Ребиндера - эффекта адсорбционного понижения прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-48-690001).

Список литературы

1. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография. Тверь: ТвГТУ. 2013. 123 с.
2. Uhlmann E. Application of magnetic fluids in tribotechnical systems // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2002 (252). № 11. P. 336–340.
3. Ермаков С.Ф. Влияние смазочных материалов и присадок на триботехнические характеристики твердых тел. Часть 2. Активное управление трением // Трение и износ. 2012 (33). № 3. С. 275–283.
4. Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Влияние присадок на триботехнические характеристики наноструктурных смазочных магнитных масел // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 9. С. 43–47.
5. Болотов А. Н., Новикова О. О., Новиков В. В. Исследование триботехнических свойств наноструктурных магнитных смазочных масел с различными дисперсионными средами // Трение и износ. 2017 (38). № 2. С.107–113.

05.02.22

А.П. Буйносов д-р техн. наук, С.И. Лаптев

Уральский государственный университет путей сообщения,
Кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, buynosov@mail.ru, serj2212@mail.ru

СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЛОКОМОТИВОВ

В статье предложен новый способ оценки достоверности полученных результатов при проведении технической диагностики узлов подвижного состава в сервисном локомотивном депо. Выполнена верификация на основе анализа потока отказов электровозов ВЛ10 и ВЛ11.

Ключевые слова: подвижной состав, техника, локомотив, диагностика, проведение, результат, достоверность, оценка, способ.

Диаграмма состояний исследуемого объекта (подвижной состав (ПС)) может быть представлена в виде простейшего направленного графа, в котором в результате диагностического исследования узел может быть признан годным или забракован (и соответственно обозначен «Г» или «Б»). Поскольку оценка определения достоверности состояния узла при диагностике является вероятностной, возможно дальнейшее разделение результатов (см. рис. 1).



Рис. 1– Диаграмма состояний диагностируемого подвижного состава

В практическом анализе надежности обычно рассматривают зависимости вероятности отказов $P_{\text{отк}}$ от времени в виде обобщенных кривых, приведенных на рис. 2. На графике (рис. 2, а) можно выделить три периода эксплуатации: T_1 – период приработки; T_2 – период нормальной эксплуатации; T_3 – интервал накопления дефектов. На графике (рис. 2, а) можно выделить три периода эксплуатации: T_1 – период приработки; T_2 – период нормальной эксплуатации; T_3 – интервал накопления дефектов.

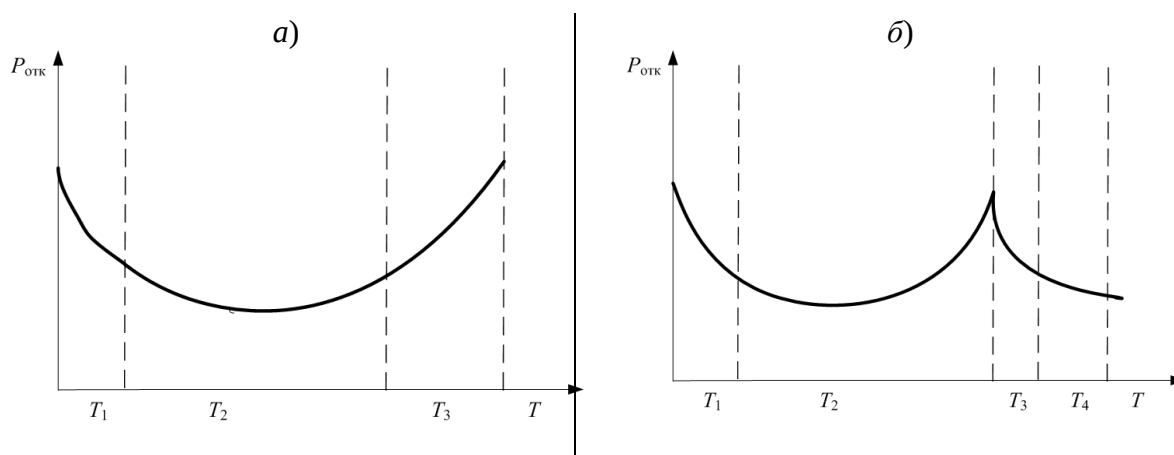


Рис. 2– Вероятность развития дефектов для: а – для неремонтируемых устройств; б – для ремонтируемых устройств

Очевидно, на первом этапе при наличии специальных средств контроля вероятность обнаружения дефектов у новых изделий (или после ремонта ПС) достаточно велика ($P(\Gamma/\Gamma)$, $P(\text{Б}/\text{Б}) \rightarrow 1$), а вероятности ошибок незначительны ($P(\Gamma/\text{Б})$, $P(\text{Б}/\Gamma) \rightarrow 0$). Это утверждение основано на том, что первоначальная обкатка сложных изделий производится на предприятиях-изготовителях (или после ремонта) квалифицированным персоналом с использованием специального оборудования [3]. На втором этапе (в период нормальной эксплуатации) вероятность отказов достаточно мала. Тем не менее, на этом этапе также необходим оперативный контроль исправности оборудования. Вовремя обнаруживаемые неисправности снижают вероятности ошибок [4]. По мере увеличения периода эксплуатации вероятность отказа увеличивается. Кроме того, появляются так называемые «зависимые неисправности», когда неисправность одного узла приводит к ухудшению работы связанных с ним элементов. Поэтому очень важно оценить границу второго периода, т. е. время окончания нормальной эксплуатации. Третий период, когда происходит интенсивное накопление неисправностей, сопряжен с риском выхода из строя подвижного состава во время эксплуатации, т. е. в пути следования. Для неремонтируемых узлов необходимо иметь «систему индикаторов»: признаков, по которым изделия следует браковать, например измерительные приборы, приборы безопасности и т. д. Вероятность обнаружения дефектов при этом достаточно высока [5]. Для ремонтируемых изделий (к ним можно отнести большинство узлов тягового подвижного состава) график изменения вероятности отказа имеет вид, приведенный на рис. 2, б. Здесь, кроме предыдущих трех периодов, добавляется четвертый – приработка после ремонта. На практике это означает, что подвижной состав после ремонта требуется обкатывать или на специальных стендах типа катковых станций, или в облегченных режимах эксплуатации (в том числе на холостом ходу). Минимально необходимое время обкатки возможно получить из практической зависимости (см. рис. 2, б).

Если известна вероятность отказов P_1 к моменту начала ремонта и задано значение пороговой вероятности P_2 равное допустимой вероятности дефекта, можно найдя соответствующую точку T_0 на графике, получить интервал времени обкатки как разницу двух моментов времени:

$$T_{\text{обк}} = T_0 - T_{\text{р}}. \quad (1)$$

Вместо значения P_2 можно задать коэффициентом ослабления вероятности отказа $K_{\text{отк}} = P_1/P_2$. По его значению вычисляется вероятность P_2 , но коэффициент $K_{\text{отк}}$ в отличие от последней, лучше нормируется (т. е. может использоваться в качестве безразмерной величины, которую целесообразно закладывать в инструкции, в том числе независимо от типа подвижного состава. Для проверки адекватности изложенных положений были проанализированы результаты по исследованию надежности подвижного состава эксплуатируемого на ряде железных дорог. Так, в депо, структурных подразделений Свердловской и Западно-Сибирской дирекций тяги проводился анализ потока отказов

локомотивов (электровозов серий ВЛ10 и ВЛ11) в зависимости от времени, прошедшего после очередного планового ремонта за 2017 и 2018 гг. Данные оформлялись в виде гистограмм, которые после этого аппроксимировались нелинейными функциями. При этом общий вид полученной кривой повторял кривую рис. 2, б. На участках $[T_1; T_2]$ кривая аппроксимировалась полиномом четвертой степени с коэффициентом согласия 0,98, а на участке $[T_3; T_4]$ наилучшей аппроксимирующей функцией была экспонента.

Даже при относительно небольшом объеме данных (около 800 зарегистрированных случаев отказов) было получено совпадение с теоретической кривой. Для коэффициента ослабления отказов $K_{отк} = 2$ установлено, что время обкатки электровозов должно составлять не менее 120 часов, что неприемлемо в сервисном локомотивном депо. Поэтому необходим достоверный послеремонтный контроль. Для количественной оценки достоверности диагностирования и расчета его показателя необходимо исследовать диаграмму состояний объекта (узла) с учетом возможных последствий при эксплуатации и ремонте. Если принять количество случаев событий как: годен (Г) – M случаев; годен, результат подтвержден (Г/Г) – K случаев; годен, результат диагностирования – «брак» (Г/Б) – Y случаев; «брак» (Б) – S случаев; «брак», результат подтвержден (Б/Б) – N случаев; «брак», результат диагностирования – «годен» (Б/Г) – V случаев и обозначить возможные события, подтверждающие установленный диагноз знаком «+», а происшедшие вопреки рекомендациям – знаком «-», то возможно рассчитать действительный показатель достоверности D_d (уровень доверия):

$$D_d = \frac{K + N}{B} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где B – число продиагностированных объектов.

На практике показатель достоверности D_{Π} вычисляют, как правило, учитывая лишь параметры N и S , то есть весьма упрощенно:

$$D_{\Pi} = \frac{N}{S} \cdot 100\%. \quad (3)$$

При количественной оценке диагностических систем по показателю достоверности, очевидно, что величина $D_d > D_{\Pi}$, т. е.:

$$\frac{D_d}{D_{\Pi}} > 1 \quad (4)$$

или

$$\frac{(K + N) \cdot S}{B \cdot N} = \frac{K \cdot Y \cdot (N \cdot Y + K \cdot N + N^2)}{N \cdot V + (N \cdot Y + K \cdot N + N^2)} > 1. \quad (5)$$

Это утверждение верно, поскольку $K \cdot Y \gg N \cdot V$. При этом расчет достоверности результатов диагностических исследований должен производиться с учетом всех событий, которые могут возникнуть в период от предыдущего до следующего диагностирования.

Прежде чем принять решение о допуске средств диагностики в эксплуатацию, необходимо провести испытания по оценке достоверности диагноза, отсутствия «ложной забраковки». До начала испытаний должна быть проведена настройка и регулировка по всем видам дефектов для поиска которых создано устройство. Настройка диагностирующего устройства может проводиться как на имитаторах неисправностей, так и на физических моделях или на реальных объектах диагностирования. При этом необходимо обеспечить условие $B/N > 2$. В связи с тем, что такая работа достаточно трудоемка, необходимо определить минимально приемлемое число случаев появления дефектов, при достаточном уровне достоверности. Это число целесообразно определять по статистическим таблицам [5]. Например, если вероятность «забраковки» годного узла и риск пропуска дефекта принять равным 0,2, а вероятность его обнаружения 0,8, то минимальное число реализаций испытания B получится равным восьми. При условии обнаружения всех без исключения дефектов (при уровне риска 0,1) $B = 11$, при задании достоверности 0,9 и уровне риска 0,1, получим $B = 22$. После получения результатов лабораторных испытаний опытный образец устройства должен быть

испытан в условиях эксплуатации. В этом случае N – число объектов содержащих дефект, V – число не обнаруженных дефектов. Основная сложность таких испытаний – установление всех объектов содержащих дефект. Для реализации этого условия необходимо проведение контроля состояния объекта другими существующими методами, в том числе и теми, когда необходимо производить разборку объекта. Возможно совмещение диагностики с плановым видом ремонта с разборкой объекта. В любом случае фактическое состояние объекта должно быть гарантированно установлено.

В условиях эксплуатации риск ошибок должен быть принят на уровне 0,05, а вероятность обнаружения дефекта не ниже 0,9. Кроме того, для уменьшения влияния случайностей нужно допустить хотя бы одну ошибку типа «ложное обнаружение дефекта». Для этих условий число объектов, определенное по статистическим таблицам [5], равно 38. В ходе такого рода испытаний необходимо вести наблюдение за работой всех V объектов, контролируя как их отказы, так и изменение контролируемых параметров во времени. Это позволит уточнить периодичность проведения диагностирования и браковочные значения контролируемых параметров.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Лаптев С.И. Организация эксплуатации, обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 41-55.
2. Буйносов А.П., Лаптев С.И., Антропов С.Н. Организация эксплуатации газотурбинных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 8. С. 10-13.
3. Буйносов А.П., Лаптев С.И. Анализ износа бандажей колесных пар электровозов промышленного транспорта НП1 // Научно-технический вестник Поволжья. – Казань, 2018. № 3. С. 25-28.
4. Наговицын В.С., Буйносов А.П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326-329.
5. Голенко Д.И. Статистические модели в управлении производством. М.: Статистика, 1973. 368 с.

05.02.13

Л.В. Быков канд. техн. наук, О.А. Пашков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
кафедра «Авиационно-космическая теплотехника»,
Москва, bykov@mai.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ЗА СПУСКАЕМЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ СЕГМЕНТАЛЬНО-КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Представлены расчетные параметры течения в отрывной зоне, образующейся вблизи поверхности обтекаемого высокоскоростным потоком сегментально-конического тела, полученные с помощью математической модели, основанной на решении уравнений газодинамики, дискретизованных по методу конечного объема. Уравнения решались на нерегулярной сетке совместно с уравнениями переноса массы для каждого компонента смеси, дифференциальным уравнением теплопроводности и уравнением модели лучистого теплообмена. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными ЦАГИ. Сделаны выводы о корректности работы использованной математической модели.

Ключевые слова: спускаемый аппарат, вычислительная газодинамика и теплообмен, турбулентность, отрывные зоны.

Введение

Известно, что при полете аппарата со сверхзвуковой или гиперзвуковой скоростью вблизи теневой части его поверхности образуются отрывные зоны, отличающиеся сложным характером течения. Воздух в этих областях имеет очень низкую плотность, увеличивается длина свободного пробега молекул, что может приводить к нарушению гипотезы сплошности среды. Кроме того течение в отрывных зонах, как правило, имеет турбулентный характер, который не описывается корректно ни одной из существующих моделей турбулентности. В данной работе авторы представили результаты моделирования течения в отрывных зонах, возникающих вблизи поверхности высокоскоростного ЛА, полученные с помощью собственной математической модели [1].

Результаты численных исследований течения в окрестностях сегментально-конического тела

Исследование процессов газодинамики и тепломассообмена было проведено на модели спускаемого аппарата сегментально-конической формы (рисунок 1).

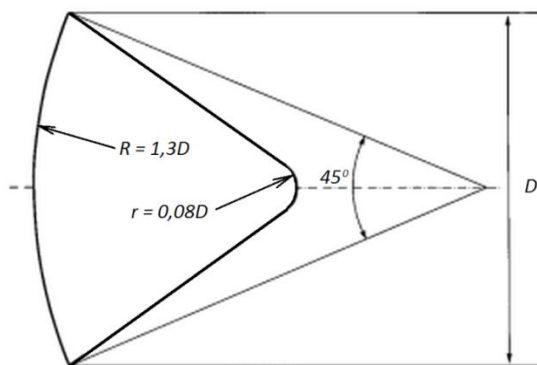


Рис. 1- Геометрия сегментально-конического спускаемого аппарата

Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными работ [2, 3]. Всего было проведено три расчета, параметры набегающего потока и температура поверхности модели в которых соответствовали условиям в экспериментах [2] и представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры набегающего потока.

Номер расчета	Рабочее тело	M_∞	p_∞ , Па	T_∞ , К	T_w , К	ρ_∞^* , кг/м ³	V_∞^* , м/с
1	азот	19,8	13,2	25,2	300,0	0,00173	2027
2	азот	19,1	4,02	31,1	300,0	0,00045	2135
3	воздух	6,0	1580	81,7	300,0	0,06750	1086

Отметим, что в работах [2, 3] авторы проводили исследования с помощью импульсной аэродинамической трубы кратковременного действия ИТ-2М ЦАГИ ($M_\infty = 19,8$ и $M_\infty = 19,1$) и с помощью ударной аэродинамической трубы кратковременного действия УТ-1М ЦАГИ ($M_\infty = 6,0$). В трубе ИТ-2М в качестве рабочего тела использовался азот, а в трубе УТ-1М – воздух.

Диаметр модели составлял $D = 2R = 0,15$ м, её лобовая поверхность представляла собой сферический сегмент с центральным углом 45° и радиусом $R_l = 1,3D$. Тыльная часть модели представляла собой слабо затупленный конус с радиусом затупления $r = 0,08D$ и углом раствора 70° . Принималось, что на поверхности модели сформировано покрытие, обладающее нулевой каталитической активностью ($\kappa_w \rightarrow 0$).

На рисунке 2 представлено распределение теплового потока по тыльной поверхности модели при обтекании азотом при $M_\infty = 19,1$. Результаты расчета №2 представлены в сравнении с экспериментальными данными [3]. На графике по оси абсцисс отложена безразмерная координата S/R . Расстояние S отсчитывается от центра лобовой поверхности и отнесено к радиусу модели $R = 0,075$ м. То есть координата $S/R = 0,0$ соответствует передней критической точке, координата $S/R = 1,026$ – острой боковой кромке модели, а координата $2,69$ – задней критической точке.

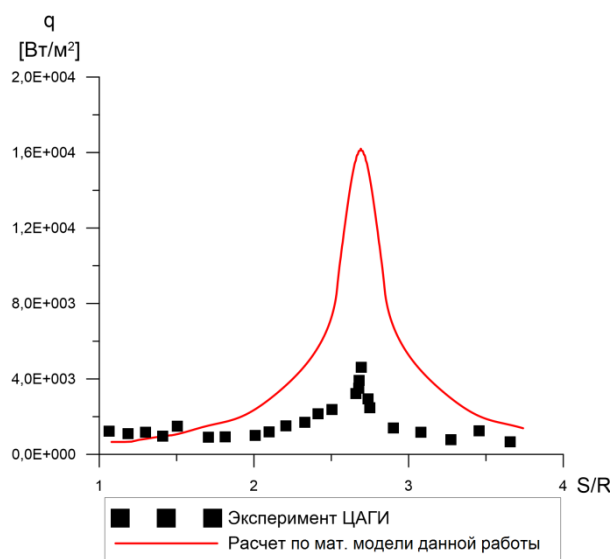


Рис. 2- Распределение теплового потока по тыльной поверхности сегментально-конического тела. Обтекание азотом при $M_\infty = 19,1$

Из рисунка 2 видно, что распределение теплового потока в донной области модели, полученное в ходе расчета, существенно отличается от распределения, полученного экспериментальным путем. Особенно существенны количественные расхождения. Во-первых, наблюдается значительное завышение расчетных значений теплового потока вблизи острой боковой кромки модели по сравнению с экспериментальными данными. Во-вторых, расчетный тепловой поток также значительно больше экспериментальных данных в окрестности задней критической точки. Кроме того пик теплового потока, полученный в ходе расчета, несколько шире полученного в эксперименте.

На рисунке 3а показано поле линий тока вблизи модели, а на рисунке 3б - распределение числа Маха на осевой линии в следе за моделью. Видно, что газ огибает без отрыва острую боковую кромку модели, но затем отрывается от поверхности обратного конуса. В результате образуется замкнутая отрывная область, в которой существует возвратное течение. Распределение числа Маха (Рис.3а) позволяет определить положение точки нулевой скорости, которая примерно соответствует горлу следа за моделью. От неё газ течет обратно к задней точке торможения, что хорошо видно на рисунках 3а. При этом максимальная скорость возвратного течения соответствует числу Маха $M = 0,8$.

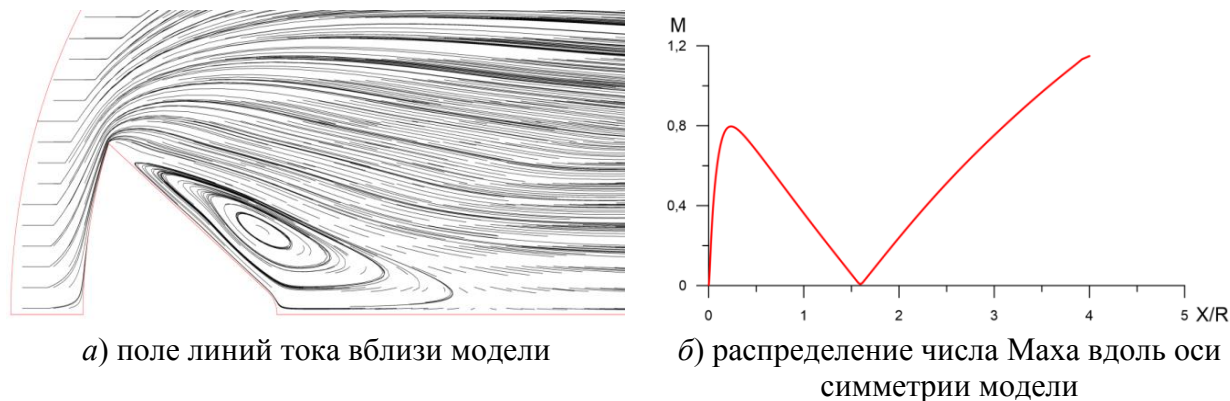


Рис. 3- Результаты обтекания модели азотом при $M_\infty = 19,1$

На рисунке 4 представлены результаты распределения теплового потока по лобовой и тыльной поверхности модели, полученные в расчете №3 при обтекании модели воздухом при $M_\infty = 6,0$. Результаты расчета сравниваются с экспериментальными данными [3].

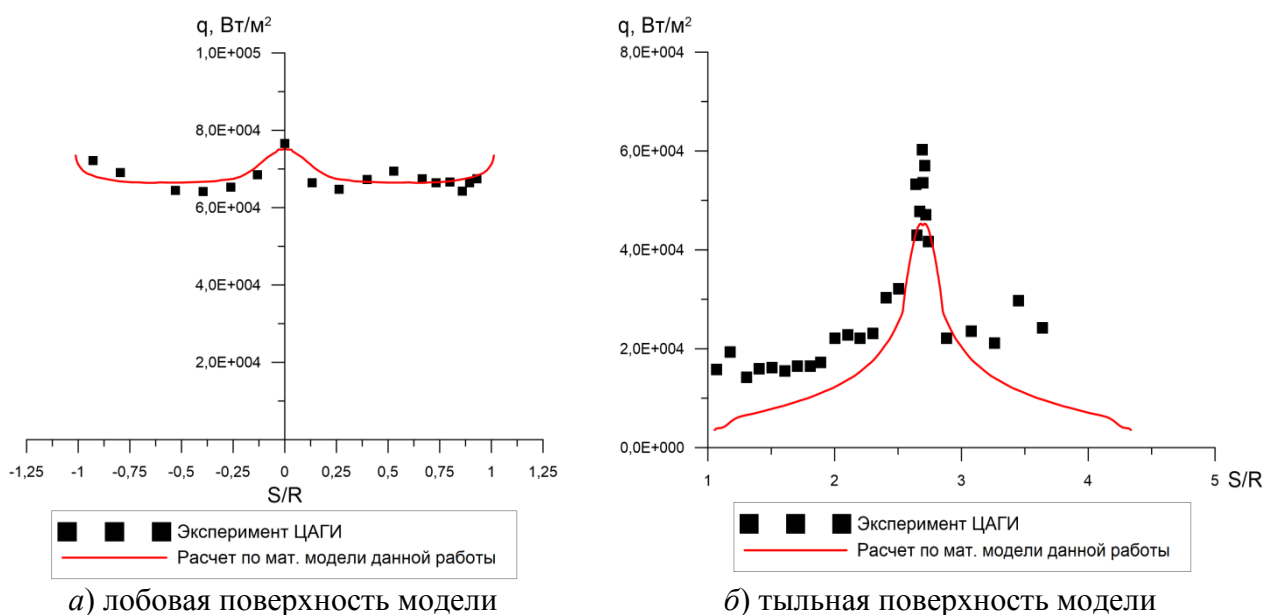


Рис. 4-. Распределение теплового потока по поверхности модели. Обтекание воздухом при $M_\infty = 6,0$

Из рисунка 4а видно, что распределение теплового потока по лобовой поверхности модели, полученное в расчете, хорошо согласуется с экспериментальным распределением. Распределение теплового потока по тыльной поверхности модели (Рис.4б), полученное в ходе расчета, удовлетворительно согласуется с экспериментальным распределением, учитывая достаточно сложный характер течения в отрывной зоне, а также нерегулярность экспериментальных данных. Отметим, что при $M_\infty = 6,0$, также как и при $M_\infty = 19,1$ в отрывной зоне за моделью была выявлена замкнутая отрывная область, в которой

присутствует возвратное течение. Натекание возвратной струи на затупление обратного конуса является причиной образования там максимума теплообмена.

Уровень теплового потока, наблюдаемый в окрестности задней точки торможения, близок к уровню теплового потока в окрестности лобовой точки. Можно указать на две причины этого явления:

- на лобовую поверхность набегают ламинарный поток, в то время как на тыльную поверхность набегают турбулентная возвратная струя, имеющая высокий уровень пульсаций;
- радиус кривизны затупления конуса в 16.25 раз меньше радиуса кривизны лобовой поверхности модели, вследствие чего градиент скорости в задней критической точке будет значительно выше, чем в лобовой критической точке при одинаковой скорости набегающего потока.

Выводы

Получены параметры потока в отрывных зонах, возникающих вблизи теневой поверхности спускаемого аппарата сегментально-конической формы.

Наблюдается удовлетворительное согласование большинства результатов, полученных с помощью использованной математической модели, и экспериментальных данных ЦАГИ.

Представленная математическая модель может быть применена для изучения параметров отрывных зон, возникающих вблизи поверхности высокоскоростных ЛА, а также для изучения особенностей структуры течения в этих зонах.

Список литературы

1. Быков Л.В., Пашков О.А. Математическая модель течения в отрывных зонах высокоскоростного летательного аппарата // Научно-технический вестник Поволжья 2018, №11. С. 114-117.
2. Borovoi V.Ya., Skuratov A. S., Surzhikov S. T. Study of convective heating of segmental-conical Martian descent vehicle in shock wind tunnel // AIAA Paper-2634. 2004.
3. Тирский Г., Сахаров В., Ковалев В. и др. Гиперзвуковая аэродинамика и тепломассообмен спускаемых космических аппаратов и планетных зондов // Физматлит Москва, 2011. - С. 546.

05.02.08

Т.Н. Иванова д-р техн. наук

Чайковский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Чайковский,
Институт механики ФГБУН «Удмуртский федеральный
исследовательский центр УрО РАН»,
Ижевск, tatnic2013@yandex.ru

ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТЬ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИ ОДНОПРОХОДНОМ И МНОГОПРОХОДНОМ ШЛИФОВАНИИ

Исследованы стойкость абразивного инструмента, скорость изменения температуры, градиенты скоростей термических процессов при однопроходном и многопроходном шлифовании. Выявлено, что для многопроходного шлифования характерно разрушение зерен под действием высоких температур и напряжений. При однопроходном шлифовании износ зерен происходит под действием микрорезания. Уменьшение температуры, возникающей в зерне, за 1 оборот шлифовального круга возможно при увеличении теплофизических параметров абразивного слоя. При многопроходном шлифовании максимальные значения температуры зерна и глубины ее распространения выше, чем при однопроходном. Увеличение скорости нагрева зерна зависит от увеличения плотности теплового потока, уменьшения роста тепловой активности зерна, обрабатываемой детали и времени нагревания. При удалении точки от поверхности зерна скорость нагревания уменьшается, и смещение максимума происходит в сторону увеличения времени.

Ключевые слова: многопроходное шлифование, однопроходное шлифование, износ зерен, стойкость абразивного инструмента, температура в зоне резания, скорость нагревания.

При сравнении стойкости абразивного инструмента при многопроходном и однопроходном шлифовании, стойкость инструмента значительно выше у последнего метода. Это связано с тем, что при однопроходном шлифовании обрабатываются канавки, пазы и другие фасонные поверхности, конструктивные особенности которых не приводят к значительным усилиям резания и высокой теплонапряженности в зоне контакта инструмента и детали. При многопроходном шлифовании абразивное зерно многократно нагревается в процессе резания и охлаждается при выходе из зоны резания [1 - 9]. Это снижает прочность удержания зерна в связке, твердость зерна, вызывает интенсификацию диффузионных и окислительных процессов, возникновение значительных температурных напряжений в самом зерне (рис. 1). При нагреве зерно в связке шлифовального круга стремится расширяться в направлении перпендикулярном к плоскости, в которой расположен вектор скорости резания, этому препятствуют нижележащие слои круга, которые испытывают сжимающие напряжения. После выхода зерна из зоны контакта, поверхностные слои круга сжимаются, но испытывая сопротивление нижних слоев, оказываются под действием растягивающих напряжений.

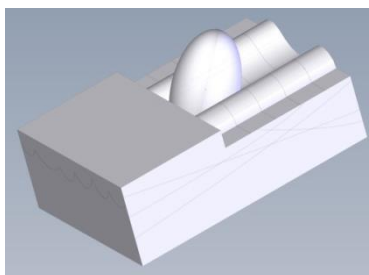


Рис. 1. Модель абразивного зерна

Температура, возникающая в зерне, за 1 оборот шлифовального круга может быть определена [1 -3]:

$$T_2(x,t) = \frac{1}{1+K} \cdot \frac{2q}{\sqrt{c_2 \lambda_2 \rho_2}} \cdot \left[\sqrt{t} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 t}} \right) - \sqrt{t-t_0} \cdot \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 (t-t_0)}} \right) - \frac{\alpha_T a_2}{2\lambda_2} \int_{t_0}^t \exp \left(\frac{\alpha_T^2}{\lambda_2^2 a_2 (t-t_0)} + \frac{\alpha}{\lambda_2} x \right) \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a_2 (t-t_0)}} + \frac{\alpha_T}{\lambda_2} \sqrt{a_2 (t-t_0)} \right) d(t-t_0) \right] \quad (1)$$

где α_T - коэффициент теплообмена, λ_2 - коэффициент теплопроводности зерна, ρ_2 - плотность зерна, a_2 - коэффициент теплопроводности абразивного зерна, x - глубина распространения температуры по зерну шлифовального круга, c_2 - коэффициент теплоемкости, t - температура в любой точке зерна при шлифовании, $t-t_0$ - охлаждение зерна, при выходе из зоны контакта, t_0 - время прекращения резания зерна, $K = \sqrt{\lambda_1 c_1 \rho_1 / (\lambda_2 c_2 \rho_2)}$ - коэффициент, характеризующий активность обрабатываемого материала детали (индекс 1) к абразивному зерну (индекс 2), q - плотность теплового потока.

Первая часть выражения (1) описывает процесс распространения тепла при резании зерна за время t , вторая часть – охлаждение зерна при выходе из зоны резания за время $t-t_0$.

Температура в зоне контакта по выражению (1) при шлифовании твердосплавных пластин Т15К6 размером 70x30x40 кругом диаметром $D_{кр} = 0,15$ мм, маркой АС6 МО4 120/100 4 с теплофизическими параметрами: материал $\lambda_1 = 27,3$ Дж/м·с·град, $a_1 = 10^{-5}$ м²/с, $c_1 \rho_1 = 1,1$ Дж/м³·град, зерно круга $\lambda_2 = 146$ Дж/м·с·град, $a_2 = 8 \cdot 10^{-5}$ м²/с, $c_2 \rho_2 = 1,5$ Дж/м³·град на режимах: для многопроходного шлифования - скорость круга $v_{кр} = 30$ м/с, глубина шлифования $t_{зл} = 2 \cdot 10^{-5}$ м, продольная подача $S_{пр} = 1,5$ м/мин; для однопроходного - $v_{кр} = 30$ м/с, $t_{зл} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $S_{пр} = 0,5$ м/мин при плотности теплового потока $q = 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² представлена графически (рис. 2).

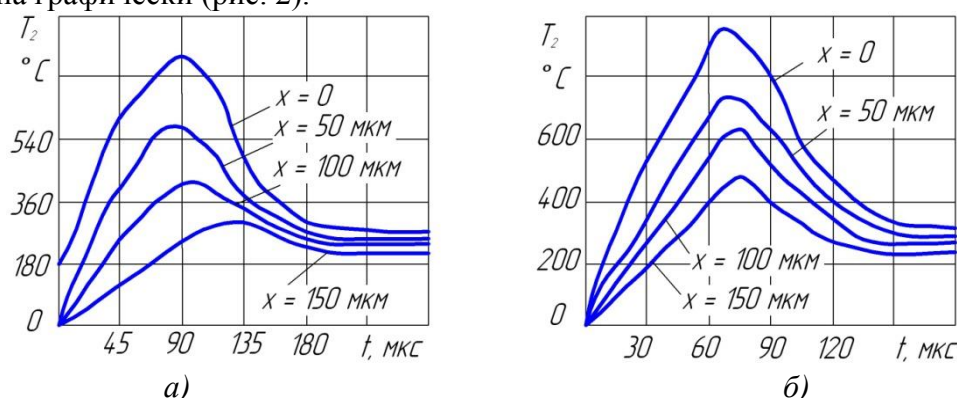


Рис. 2- Характер распределения температуры T_2 на зерне в зависимости от времени t при глубине распространения x однопроходное (а), многопроходное шлифование (б)

Анализ результатов (рис. 2) показывает, что с увеличением теплофизических параметров абразивного слоя температура в зоне резания уменьшается. При многопроходном шлифовании максимальные значения температуры и глубины ее распространения выше, чем при однопроходном. Наблюдается различие во времени действия температуры на зерно, которое ниже при однопроходном шлифовании.

При отсутствии принудительного охлаждения зерна после выхода его из зоны резания скорость изменения температуры выражается производной выражения (1) по времени:

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = \frac{q}{(1+K)\sqrt{\pi c_2 \lambda_2 \rho_2}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{t}} \exp \left(-\frac{x^2}{4a_2 t} \right) - \frac{1}{\sqrt{t-t_0}} \exp \left(-\frac{x^2}{4a_2 (t-t_0)} \right) \right] \quad (2)$$

где $T_2(x, t)$ - температура внутри зерна.

Увеличение скорости нагрева зерна (2) зависит от увеличения плотности теплового потока, уменьшения роста тепловой активности зерна, обрабатываемой детали и времени

нагрева. При удалении точки от поверхности зерна скорость нагрева уменьшается, и смещение максимума происходит в сторону увеличения времени.

После выхода зерна из зоны резания начинается процесс охлаждения зерна и перераспределение тепла. Для охлаждения характерна высокая скорость перераспределения температуры и значительное снижение ее при удалении зерна от зоны резания. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

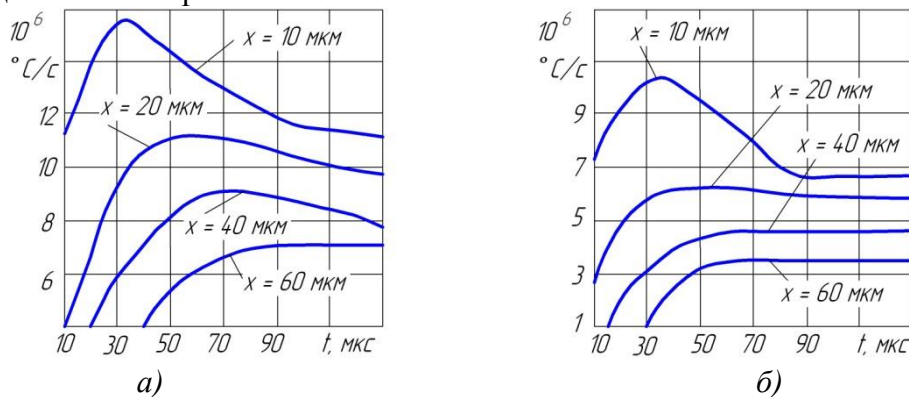


Рис. 3- Зависимость распределения скоростей термических процессов: многопроходное шлифование (а); однопроходное шлифование (б)

Производная выражения (2) по глубине распространения тепла x позволяет установить градиенты скоростей термических процессов

$$\frac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial t \partial x} = \frac{q \cdot x}{(1+K)2a_2\sqrt{\pi c_2 \lambda_2 \rho_2}} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{(t-t_0)^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2(t-t_0)}\right) - \frac{1}{\sqrt{t^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{4a_2 t}\right) \right] \quad (3)$$

Расчет по выражению (5) представлен графически (рис. 4).

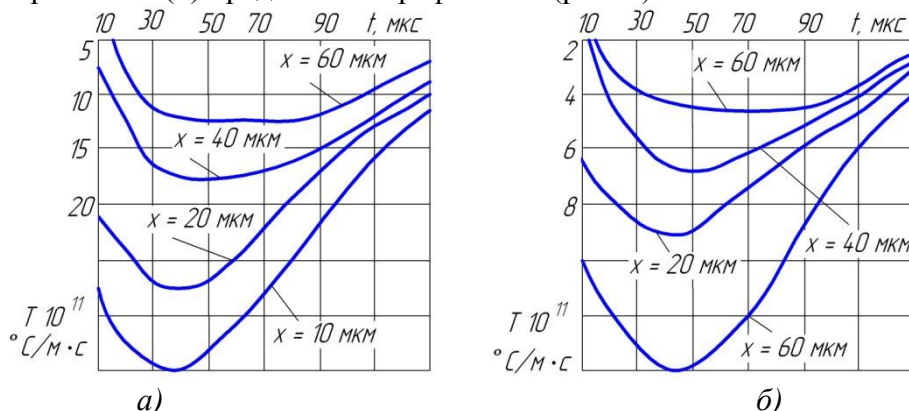


Рис. 4- Градиенты скоростей термических процессов: многопроходное шлифование (а); однопроходное шлифование (б)

Из сравнения графических зависимостей (рис. 3, 4) видно, что скорости нагрева одной и той же точки, например, при глубине $x = 40$ мкм равны для многопроходного шлифования $9 \cdot 10^6$ °C/с, при однопроходном $4 \cdot 10^6$ °C/с и достигаются за одинаковое время. При этом градиенты скоростей соответственно $17 \cdot 10^{11}$ °C/м·с и $7 \cdot 10^{11}$ °C/м·с. Однопроходное шлифование обеспечивает большую глубину прогрева зерна, меньшие скорости нагрева и градиенты скоростей. Это уменьшает вероятность аллотропных изменений в зернах и возникновения «тепловых» ударов зерен – растрескивания из-за больших перепадов температур. При многопроходном шлифовании из-за высокой теплонапряженности процесса зерна покрываются сеткой разветвленных микротрещин, создающих ячеистую структуру рабочей поверхности круга. При однопроходном шлифовании зерна не имеют резко выраженной сетки трещин, наблюдается формирование небольших контактных площадок, на которых видна сетка параллельных царапин, расположенных в направлении движения зерен круга. Износ зерен происходит поэтапно: вскрытие, абразивный износ микрорезания, разрушение под действием температуры. Для многопроходного шлифования характерно

разрушение зерен под действием высоких температур и напряжений. При однократном шлифовании износ зерен происходит под действием микрорезания. Наличие такого характера износа свидетельствует о том, что зерна выступают над связкой, прочно удерживаются в ней и менее нагружены, что позволяет интенсифицировать процесс за счет увеличения глубины резания. При увеличении скорости резания свыше 30 м/с круг при однократном шлифовании начнет работать в режиме затупления.

Анализ методов однократного и многократного шлифования на основе теплонапряженности абразивного зерна, показал, что при одинаковой производительности глубина врезания абразивных зерен при однократном шлифовании ниже, что обеспечивает более высокую размерную стойкость инструмента. При изучении теплового режима зерен получены закономерности температуры и скорости термических процессов, проведено сравнение методов шлифования, получена оценка стойкости зерен. Так, наибольшая температура развивается на вершине и прилегающей к ней части зерна и может достигать температуры аллотропных изменений. При смещении вершины зерна из зоны контакта наблюдаются изменения температурного поля и градиента скорости, они меняют направление. Этот участок становится наиболее склонным к излому и сколу по зерну.

Метод однократного шлифования обеспечивает наиболее благоприятный режим работы зерна. Анализ режима работы зерна на основе рассмотренных исследований показал, что температура на зерне зависит от теплофизических параметров обрабатываемого материала и шлифовального круга, режимов шлифования. Установлено, что интенсификация процесса однократного шлифования возможна за счет увеличения глубины шлифования с сохранением стойкости инструмента.

Список литературы

1. *Иванова Т.Н.* Конструкторско-технологические методы снижения теплонапряженности при шлифовании // Инженерно-физический журнал 2018 г. ноябрь–декабрь том 91, № 6, с. 1485 - 1490
2. Research on operation mode of abrasive grain during grinding T N Ivanova, V B Dement'ev , O V Nikitina / MEACS 2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 327 (2018) 042045 doi:10.1088/1757-899X/327/4/042045
3. *Свитковский Ф.Ю.* Научные основы технологии глубинного шлифования деталей из труднообрабатываемых материалов. Ижевск: Ин-т технол. наук и проблем реструкт. в пром., 2003.
4. *Волков Д.И., Полетаев В.А.* Теоретическая модель напряженного состояния поверхностного слоя деталей при глубинном шлифовании. Вестн. Рыбинской гос. авиац. технол. академии им. П. А. Соловьева. 2009. № 1. С. 52–63.
5. *Носенко В.А., Авилов А.В.* Исследование глубинного шлифования стали 30ХГСН2. Изв. Волгоградского гос. техн. ун-та. 2004. № 9. С. 29–31.
6. *Zakharov O.V., Balaev A.F. and Kochetkov A.V..* Modeling Optimal Path of Touch Sensor of Coordinate Measuring Machine Based on Traveling Salesman Problem Solution. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 206, Pp. 1458-1463.
7. *Tyuhta A.V., Vasilenko Y.V., Kozlov A.M.* Ways to Enhance Environmental Flat Grinding by Improving the Technology of the Coolant Supply // *Procedia Engineering* 150 (2016) 1073 – 1080 doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.217
8. *Aleksandr Kozlov, Evgenij Kiryuschenko and Andrej Kirichek* Technological system self-tuning when milling 01033 / MATEC Web of Conferences Volume 129 (2017) // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) - Sevastopol, Russia, September 11-15, 2017 - S. Bratan, S. Gorbatyuk, S. Leonov and S. Roshchupkin (Eds.) Published online: 07 November 2017 DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201712901033>
9. *Козлов А.А., Козлов А.М., Василенко Ю.В.* Моделирование обработанной поверхности при шлифовании некруговым торцовым абразивным инструментом / Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. 2016. Т. 16. № 3. С. 54-62.

05.02.08

Н.В. Козулько, К.В. Семиниченко

Донской государственный технический университет,
факультет «Технология машиностроения»,
кафедра «Технология машиностроения»,
Ростов-на-Дону, n.kozulko@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)

В работе представлены результаты исследования процесса окончательной абразивной обработки деталей из ПКМ с применением гибкого шлифовального инструмента. Цель исследования заключается в повышении эффективности процесса подготовки поверхностей деталей из ПКМ к склеиванию и повышение качества обработки путем замены ручного труда на механизированный. Описаны параметры поверхности, влияющие на формирование качественного клеевого соединения.

Ключевые слова: абразивная обработка, композиционные материалы, зернистость абразива, лепестковый круг, шлифовальная шкурка, микропрофиль поверхности.

Из (ПКМ) изготавливают детали авиационной, космической и автомобильной техники. На предприятии ПАО «Роствертол» из ПКМ изготавливаются детали лопастей рулевых и несущих винтов вертолетов, корпусные детали фюзеляжа. Детали из ПКМ используются в различных агрегатах, машинах и системах и для их сборки используют довольно распространенную операцию – «склеивание». Поверхность отформованной детали из ПКМ представляет собой верхний слой отвержденного связующего с различными неровностями и продуктами полимеризации. Такие соединения и вещества придают поверхности антиадгезионные свойства. Шероховатость поверхности под склеивание должна иметь некоторое оптимальное значение, обеспечивающее при заданных технологических условиях максимальную прочность. Для удаления антиадгезионного слоя и создания оптимальной шероховатости поверхности детали подвергаются ручному шлифованию с применением шлифовальной шкурки – зашкуриванию. В современном сборочном производстве обработка поверхностей деталей из ПКМ под операцию склеивание производится ручным зашкуриванием и имеет высокую трудоемкость. Это связано, в первую очередь с низким уровнем автоматизации и механизации данной операции. Появление неравномерности зашкуривания, наличия чрезмерного сошкуривания и зон недошлифованности приводит к браку, который выявляется уже после проведения клеевых работ. В зависимости от количества дефектов изделие бракуется или подвергается ремонту по отдельной специальной технологии. Это приводит к ухудшению качества продукции и повышению затрат на её изготовление. Обзор работ в области обработки деталей из ПКМ и влияния микропрофиля поверхности на качество соединения показал, что операция по подготовке поверхностей под склеивание деталей из ПКМ исследована недостаточно. Отсутствуют значения параметров шероховатости эталонных поверхностей, изготовленных и утвержденных в ПАО «Роствертол». Для формирования необходимого микропрофиля поверхности необходим режущий инструмент, который бы обеспечивал требуемые параметры шероховатости, но при этом линейные размеры детали изменялись бы в поле допуска на размер, и подходил бы для механизации рассматриваемого процесса.

Итак, рассмотрим задачу снижения трудоемкости и доли ручного труда, при одновременном повышении качества обработанных поверхностей и обеспечении стабильного микропрофиля поверхностей деталей. Работы по изучению соответствующих технологических возможностей и процессов проводились на базе авиационного

промышленного предприятия ПАО «Роствертол» г. Ростов-на-Дону, на котором изготавливаются изделия из полимеров для авиационной техники.

В процессе эксперимента для механизации были использованы различные абразивные инструменты на гибкой основе. По результатам практической работы был выбран гибкий лепестковый круг (ГЛК) (рисунок 1).

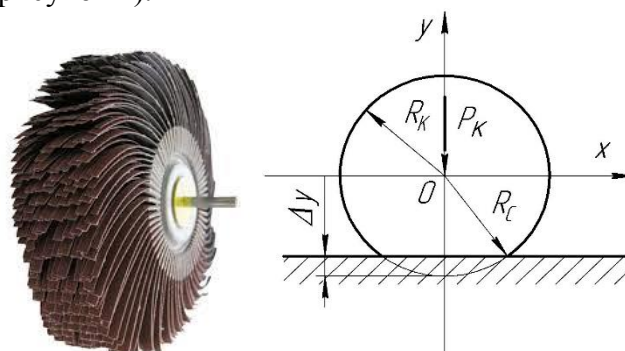


Рис. 1– Гибкий лепестковый круг фирмы Klingspor и схема контакта круга с заготовкой во время обработки (R_K – радиус круга, R_c – рабочий радиус круга, Δy – деформация лепестков круга, P_K – сила прижима)

Теоретические исследования. Результатом теоретических исследований стало создание математической модели формирования профиля шероховатости поверхности деталей из ПКМ после механической обработки их ГЛК. Зависимость для нахождения шероховатости поверхности, обработанной лепестковыми кругами имеет вид:

$$Ra = 0,09 \sqrt{100 \frac{t_c \cdot v_s \cdot l_\phi \cdot L_{ед}}{60 \cdot v_K \cdot L_K \cdot n_0}} = 0,116 \sqrt{\frac{t_c \cdot v_s \cdot l_\phi^3 \cdot L_{ед}}{v_K \cdot L_K}} \quad (1)$$

где t_c – толщина слоя материала, снимаемого за один проход, мм; l_ϕ – фактическое расстояние между контактными зернами, мм; L_K – суммарная протяженность лепестков, мм; v_s – скорость подачи, мм/мин; v_K – скорость круга, м/с.

Данная зависимость получена на основе зависимости предложенной профессором Королевым А.В. для описания рабочего рельефа абразивных кругов функцией распределения вершин абразивных зерен в процессе работы лепесткового круга [1]:

$$z_i = 0.6z_0 \left(\frac{h_i}{H_0} \right)^k, \quad 0 \leq h_i \leq H_0 \quad (2)$$

где z_i – число зерен на уровне от наиболее выступающих вершин зерен; z_0 – номинальное количество зерен на единице поверхности шлифовального круга; H_0 – разномысотность активных зерен; k – показатель распределения вершин зерен.

А также, для определения средней величины глубины царапины a_z , при обработке лепестковым кругом существует формула, представленная в книге А.И. Гдалевича «Финишная обработка лепестковыми кругами» [2]:

$$a_z = 100 \frac{t_c \cdot v_s \cdot l_\phi}{60 \cdot v_K \cdot L_K} \quad (3)$$

где t_c – толщина слоя материала, снимаемого за один проход, мм; l_ϕ – фактическое расстояние между контактными зернами, мм; L_K – суммарная протяженность лепестков, мм; v_s – скорость подачи, мм/мин; v_K – скорость круга, м/с.

При этом номинальное количество абразивных зерен на единицу поверхности связки шлифовальной шкурки n_0 определили, учитывая допущение, что при изготовлении шкурки зерна с диаметром D_3 располагаются равномерно и расстояния между их центрами

$$l_\phi = 1,2D_3 \text{ (мм)} \quad (4)$$

$$n_0 = \left(\frac{1}{1,2 \cdot D_3} \right)^2 = \frac{0,69}{D_3^2} \quad (5)$$

Не все зёрна участвуют в резании [3], тогда это обстоятельство учитывается выражением:

$$n_p = n_0 K_p; \quad (6)$$

При размере абразивного зерна $\bar{X} = 10,6 N_3$, где N_3 – зернистость материала, примем

диаметр зерна $D_3 = \bar{X}$, получим

$$n_p = \frac{0,69}{D_3^2} \cdot K_p = \frac{0,69}{(10,6 \cdot N_3)^2} \cdot K_p = 0,006 \frac{K_p}{N_3^2} \quad (7)$$

где K_p – коэффициент, учитывающий количество режущих зерен.

Экспериментальные исследования. Для финишной обработки были изготовлены образцы из ПКМ, которые представляют собой сегмент обшивки лопасти вертолета размером (80×200) мм. В качестве инструмента был выбран ГЛК фирмы *Klingspor* (рис. 1). Каждый лепесток рассечен на 10 равных сегментов (ламелей). Лепестки завернуты в одном направлении [4]. Данная модель имеет размер зерна по стандарту FERA (Европейская Федерация Абразивных Производителей) [5]: 120, 180, 240.

Для подбора оптимальных режимов обработки кругом были обработаны образцы из ПКМ, при диапазоне частоты вращения (450–1400) об/мин, скорости подачи (100–800) мм/мин. Учитывая конструкцию и эластичность круга, обработку производили при трех значениях рабочего радиуса R_c — 55 мм, 60 мм, 65 мм. Рабочий радиус R_c (рисунок 1) зависит от силы прижима круга к заготовке, жесткости круга и формы обрабатываемой поверхности.

Для подтверждения качества обработки необходимо сравнить полученные результаты с критериями качественного клеевого соединения. Для этого исследовали поверхности образцов до механической обработки, эталонной поверхности образцов и после обработки ГЛК, проведён сравнительный анализ (таблица 1). По результатам визуального контроля все образцы имеют однородную матовую поверхность. Для оценки качества клеевых соединений были изготовлены контрольные образцы клеевых соединений и проведено их испытание на прочность.

Выводы. Образцы с величиной шероховатости стеклопластиковых образцов, соответствующей значениям 1,89–2,46 мкм по R_a , показали максимальную прочность соединения.

Таблица 1 – Сравнение параметров прочности клеевых соединений

Наименование образца	Эталонные образцы			Образцы, обработанные ГЛК <i>Klingspor</i>		
	R_a , мкм	Прочность клеевого соединения		R_a , мкм	Прочность клеевого соединения	
		На сдвиг, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	На отрыв, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$		На сдвиг, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$	На отрыв, $\frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$
Обшивка ЛРВ	<u>1,8</u> 1,77	121	4,4	<u>2,46</u> 2,34	182	6,3
ПОС ЛРВ	<u>1,42</u> 1,31	118	4,3	<u>2,23</u> 2,01	184	6,6
Лонжерон ЛРВ	<u>1,54</u> 1,32	116	4,3	<u>2,25</u> 1,89	183	6,5

Результатом данных исследований стала инженерная методика расчета и подбора конструктивно-геометрических характеристик шлифовального круга и технологических параметров обработки. Ниже и в таблице 2 приведены основы предложенной методики:

1. Для подбора параметров обработки необходимо знать требуемую шероховатость поверхности под склеивание. Это значение берётся из КД или, при ее отсутствии на чертеже, из Производственных инструкций на клеевые композиции.

2. Вся поверхность детали под склеивание подвергается предварительной механической обработке! Несмотря на отсутствие глянца, и видимых дефектов. Это даёт равномерность обработки и гарантированно рекомендуемую шероховатость поверхности под склеивание.

3. Выбор инструмента и режимов обработки производится по представленной таблице 2: в зависимости от требуемой шероховатости подбирается зернистость гибкого лепесткового круга.

Таблица 2 Рекомендуемые режима резания при окончательной абразивной обработке деталей из ПКМ под склеивание

Требуемая шероховатость, мкм	Рекомендуемая зернистость ГЛК по FERA	R _c , мм	S, $\frac{\text{мм}}{\text{мин}}$	n, $\frac{\text{об}}{\text{мин}}$
4,5 – 5,0	P40	55	200 - 350	1400 - 1600
4,2 – 4,5	P80	55	200 - 350	1400 - 1600
3,7 – 4,2	P100	55	200 - 350	1400 - 1600
3,0 – 3,7	P120	50	200 – 400	1100 -1400
2,6– 3,0	P150	50	200 – 400	1100 -1400
1,6 – 2,5	P180	50	200 – 400	1100 -1400
1,2 – 1,6	P220	48	200-350	1100-1200
1,0 – 1,2	P240	48	350-500	1100-1200
0,6 – 1,0	P320	46	350-500	1100-1200

Применение методики механизации технологического процесса окончательной абразивной обработки деталей из ПКМ под «склеивание» прошло промышленные испытания в РВПК ПАО «Роствертол», что подтверждается наличием акта промышленных испытаний. По результатам работы получены следующие выводы:

1. Доказана возможность механизации операции по подготовке поверхности деталей из ПКМ под склеивание.
2. Разработанная технология позволила повысить качество обработанной поверхности и сократить основное технологическое время в 2,5 раза.
3. Получена зависимость изменения параметров шероховатости поверхности от режимов резания и рабочего радиуса круга R_c к обрабатываемой поверхности. Теоретические зависимости адекватны, что подтверждено их проверкой по критерию Фишера.
4. Прочность клеевых соединений, поверхностей, обработанных механическим способом, превышает прочность клеевых соединений серийной продукции на 30-40%, что подтверждено результатами промышленных испытаний.
5. Разработана инженерная методика расчета конструктивно-геометрических параметров лепесткового круга и проектирования технологического процесса окончательной абразивной обработки деталей из ПКМ под склеивание.

Проведенная работа имеет большую практическую значимость, и результаты могут быть использованы в проектировании технологических процессов окончательной абразивной обработки деталей из ПКМ с целью подготовки их к дальнейшему склеиванию с металлическими и неметаллическими деталями. Исследования показали, что на формирование микропрофиля поверхности влияют такие факторы, как конструкция инструмента, зернистость шлифовального материала, режимы обработки. Предложенный способ механической обработки существенно сокращает основное время операции по подготовке поверхности под склеивание, что приводит в росту технико-экономических показателей.

Список литературы

1. Королёв А.В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке.-Саратов: Изд-во Саратов.ун-та,1975г. – 191с.
2. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дис. докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995 г.
3. Гдалевич А. И. Финишная обработка лепестковыми кругами / А. И. Гдалевич. — Москва: Машиностроение, 1990г. – 112 с.
4. Козулько Н.В. Механизация абразивной обработки деталей из полимерных композитных материалов под операцию «склеивание»/ Н.В. Козулько// Вестник ДГТУ 18(2) – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. – с. 179-189.
5. Информационные системы / Federation of European Producerc of Abrasives. — Режим доступа: <https://www.fepa-abrasives.com/> (дата обращения: 15.01.19).

05.02.22

В.С. Наговицын д-р техн. наук, А.П. Буйносов д-р техн. наук, С.Н. Антропов

Уральский государственный университет путей сообщения,
Кафедра «Электрическая тяга»,
Екатеринбург, vsnagovitsyn@yandex.ru, byinosov@mail.ru, se-antr@mail.ru

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА С УЧЕТОМ МИНИМУМА ЗАТРАТ ПРИ УСЛОВИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ

В статье рассматривается выбор наилучшей технологии восстановления работоспособности узлов с точки зрения минимума затрат на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава при условии обеспечения требуемого уровня надежности, т. е. обеспечение требуемого уровня надежности и сокращение затрат на поддержание работоспособности железнодорожного подвижного состава.

Ключевые слова: *подвижной состав, узел, надежность, работоспособность, восстановление, затраты, учет, обеспечение, уровень, минимум, технология, условие, выбор.*

Путем проведения мониторинга и диагностики электропоездов появляется возможность иметь объективную информацию о состоянии железнодорожного подвижного состава (ПС) и заблаговременно провести технические мероприятия по повышению безотказности и надежности ПС в целом. Таким образом, обеспечивается снижение вероятности непараметрических отказов узлов ПС и, как следствие, расходов на устранение их последствий, т. е. $S_{\text{посл}} \Rightarrow 0$ [1]. Возможны и другие виды затрат для обеспечения требуемого уровня безотказной работы, например, проведение модернизации, капитального ремонта – принцип предлагаемого подхода при этом не меняется. В зависимости от количества учитываемых мер и затрат лишь добавляются новые, учитываемые при расчете факторы, соответствующие тому или иному методу поддержания или восстановления работоспособности узлов ПС [2].

Составляя полную матрицу исходных элементов, характеризующих затраты и вероятность повышения безотказной работы по каждой из выбираемых технологий обеспечения годности электропоезда, можно найти необходимую комбинаторику, при которой затраты будут минимальны при гарантированном уровне надежности на заданный период эксплуатации ПС. Для составления матрицы и принятия решения используют статистические данные [3]: допустимые уровни (пределы изменения) безотказного функционирования единицы ПС за определенный период работы t («начало–конец» эксплуатации), $P(t)$ (или $\Delta P(t, \Delta t)$; количество отказов оборудования и причины, определяющие общий уровень надежности ПС, включая закон распределения отказов и затрат на восстановление в зависимости от наработки; технологические методы и средства, использование которых позволяет поддерживать и (или) восстанавливать годность ПС.

По рассматриваемым методам и средствам должны быть представлены данные об эффективности повышения надежности в заданном периоде эксплуатации конкретного типа ПС. При этом должна учитываться доля приведенных (относительных) первоначальных затрат на приобретение и освоение технических средств, а также амортизационные и другие обязательные отчисления [4].

Эти статистический материал может быть задан заказчиком, взят из опыта эксплуатации рассматриваемого объекта или его прототипа, нормативных документов, а также результатов их исследований или компьютерного моделирования. Поскольку предлагаемая методология основана на проведении процедуры парного сравнения и последовательного сопоставления, поэтому можно ожидать, что отрицательные последствия использования параметров с широкой амплитудой колебаний их величин будут минимизированы. Для повышения валидности могут быть использованы другие результаты расчетов, сведения и методы,

например, эвристика по полученным результатам технического диагностирования о необходимости проведения технического обслуживания и текущего ремонта [5, 6].

Обобщенная матрица для вероятностно-стоимостной оценки системы текущего ремонта и технического обслуживания (ТриТО) ПС при использовании Марковской модели представляет двумерную табл. 1, выполненную на основе трех групп исходных данных, указанных и обоснованных в [1].

Таблица 1

Матрица для вероятностно-стоимостной оценки организации ТриТО

ΔP_1	ΔP_2	ΔP_3	...	ΔP_i
A	S_{A1}	S_{A2}	...	S_{Ai}
B	S_{B1}	S_{B2}	...	S_{Bi}
C	S_{C1}	S_{C2}	...	S_{Ci}
...	...	...	...	...
N	S_{N1}	S_{N2}	...	S_{Ni}
...	...	...	...	...

Здесь A, B, C, ..., N – варианты комплектов технологических процессов и технического оборудования, входящих в системы мониторинга и диагностики, ТриТО, которые могут быть использованы для поддержания или восстановления работоспособности ПС (узла); ΔP_i – ожидаемое повышение уровня безотказности ПС в результате применения i -го комплекта технологических процессов и необходимого оборудования; S_{Ni} – затраты на приобретение оборудования (технологии) N_i для обеспечения роста ΔP_i .

Решение этой матрицы сводится к поиску такой комбинаторики, при которой общие затраты $\sum S_{\text{сист}}(t)$ для заданной суммы $\Delta P(t, \Delta t)$ будут сведены к минимуму. В затраты также могут быть включены также первоначальные расходы, связанные с приобретением, запуском, наладкой и испытанием (вводом в работу) технического оборудования для мониторинга, диагностирования и восстановления годности ПС в виде некоторой доли, отнесенной к тому или иному рассматриваемому жизненному циклу [3]. Кроме того, могут быть также учтены денежные затраты на приобретение более надежного ПС (узла), у которого темп снижения вероятности безотказной работы в эксплуатации будет значительно снижен.

Необходимо показать, как можно использовать методику оценки организации системы обеспечения работоспособности для компонента (например, узла) ПС [4]. Пусть задано, что за время эксплуатации у конкретного узла ПС за произвольно выбранный период времени Δt , при начальной наработке t , вероятность безотказной работы ПС уменьшается на $\Delta P(t, \Delta t)$. Если в этот период не предпринять предупредительных мер, то уровень безопасности выйдет за пределы допустимого. Поэтому, для снижения риска критической ситуации, необходимо выбрать такую систему поддержания работоспособности узла ПС, которая бы смогла бы своевременно выявлять и исключать из эксплуатации дефектные (или находящиеся в преддефектном состоянии) узлы.

Для расчета рассмотрим следующие основные варианты технологии технического обслуживания и ремонта узла ПС: контроль состояния в пути следования ПС при стоянках (визуальный осмотр, прослушивание, выполнение измерений при помощи бортовых устройств), А; мониторинг состояния с помощью расположенных на пути устройств по характеру и уровню допустимых параметров, определяющих техническое состояние узла (например, вибрации, ударов, температуры), В; неразрушающий безразборный контроль ПС в пункте технического обслуживания, С; разборка и полное освидетельствование технического состояния узла ПС с последующим восстановлением работоспособности (частичным или полным), D; средний, капитальный ремонт или модернизация, обеспечивающая полное восстановление работоспособности узла, Е.

Очевидно, что предложенные методы обеспечивают различную степень восстановления работоспособности узла и потребуют неодинаковых капитальных затрат. В табл. 2 приведены исходные данные для анализа вероятности отказа узла ПС.

Таблица 2

Исходные данные для анализа отказа узла ПС

Технологические средства (операция) по поддержанию заданного уровня безотказности	Ожидаемое повышение надежности (при однократном применении)	Затраты однократного применения	Количество применений в заданный период эксплуатации	Общее повышение надежности для заданного периода эксплуатации	Сумма затрат, приходящаяся на заданный период эксплуатации
A	0,01	0,05	100	1,00	50,0
B	0,25	0,10	25,0	1,00	2,50
C	0,50	5,00	1,00	0,50	5,00
D	0,90	50,0	0,25	0,25	12,5
E	1,00	1000	0,10	0,10	1000

Примечания: 1) заданный период эксплуатации, в течение которого должен обеспечиваться необходимый уровень безотказности узла (с учетом допустимых изменений – снижения от первоначального) как правило, сравнительно небольшой, 90–100 календарных дней эксплуатации; 2) периодичность ремонтов составляет 2–3 года и 10–12 лет, при которых возможно 100 % восстановление ресурса и безотказности узла.

Из этого примера видно, что технологии В и С должны рассматриваться как более выгодные с точки зрения снижения капитальных затрат (при условии обеспечения требуемого уровня надежности).

Таким образом, применение вероятностно-стоимостной оценки позволяет с помощью доступных данных проводить необходимые расчеты и оперативно решать задачи материально-технического обеспечения с минимальными затратами на нормативное функционирование подвижного состава.

Необходимой частью развития и внедрения методологии станет включение в качестве обязательных в контракты, технические условия на поставку и стандарты показателей, характеризующих безотказность не только транспортной единицы (вероятность безотказной работы в заданный период), но и показателей, характеризующих эффективность каждого средства, технологии, предлагаемого к внедрению для поддержания работоспособного состояния ПС, а также затрат для обеспечения этого мероприятия.

Такой подход позволит взвешенно подходить к выбору, закупке и применению технических средств, что, в свою очередь, будет стимулировать промышленность создавать современные средства и технологии, обладающие высокой эффективностью выявления неисправного оборудования и восстановления его работоспособности.

Список литературы

1. Буйносов А.П., Наговицын В.С., Марулин С.Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110-113.
2. Буйносов А.П., Наговицын В.С. Диагностика низковольтных цепей электровоза // Железнодорожный транспорт. 1996. № 9. С. 36-38.
3. Наговицын В.С., Буйносов А.П. Структурная классификация технических средств диагностики тягового подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 6. С. 326-329.
4. Буйносов А.П., Марулин С.Л. Система гребнесмазывателей «твердого» типа для магистральных электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 4. С. 36-38.
5. Буйносов А.П., Наговицын В.С. Новый гребнесмазыватель на основе графитосодержащего материала // Железнодорожный транспорт. 1996. № 2. С. 39-41.
6. Буйносов А.П. Выбор оптимального остаточного проката бандажей колесных пар магистральных электровозов // Омский научный вестник. Серия Приборы, машины и технологии, 2012. № 3 (113). С. 113-116.

05.02.00

А.Л. Яблонев д-р техн. наук, А.М. Гусева

Тверской государственный технический университет,
кафедры «Гидравлика, теплотехника и гидропривод» и «Торфяные машины и
оборудование»,
Тверь, alvovich@mail.ru; guseva_ann@mail.ru

О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ КУСКОВОГО ТОРФА, ПОЛУЧАЕМОГО В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ ШНЕКОВЫМ ПРЕССОМ

В работе представлены результаты экспериментов по определению плотности и прочности кускового торфа, произведенного в ходе формования шнековым прессом. Выполнен корреляционный анализ данных. Выявлена тесная связь между ними. Получены аппроксимирующие выражения, связывающие плотность и прочность кускового торфа.

Ключевые слова: кусковой торф, шнековый пресс, плотность, прочность на изгиб, коэффициент корреляции.

Добыча кускового торфа призвана ликвидировать дефицит твердого топлива в районах, где нет газа на основе использования местных источников сырья [1, 2]. Поскольку в настоящее время в России ведутся работы над проектированием различных модификаций машин для добычи кускового торфа [3, 4], представляется актуальным исследование, целью которого является изыскание путей снижения энергоемкости формования торфа без потери куском прочностных характеристик с разработкой новых методов контроля прочности продукта для оперативного изменения параметров технологического процесса добычи.

С целью разрешения вышепоставленного вопроса был проведен лабораторный эксперимент по формованию комплексного верхового торфа степенью разложения $R = 25\text{--}30\%$ при среднем содержании влаги $w = 83,44\%$ [5]. Шнековый пресс, имеющий возможность 5-ти ступенчатого изменения скорости вращения шнека, комплектовался тремя мундштуками внутренним диаметром 52, 60 и 92 мм и двумя шнеками с шагом витков $S = 50$ и 110 мм. После формования на различных режимах, куски торфа были подвергнуты сушке в мягком режиме на протяжении 25 суток до достижения среднего содержания влаги $w = 23,12\%$. Затем, объемно-весовым методом определена плотность кусков (рис. 1).

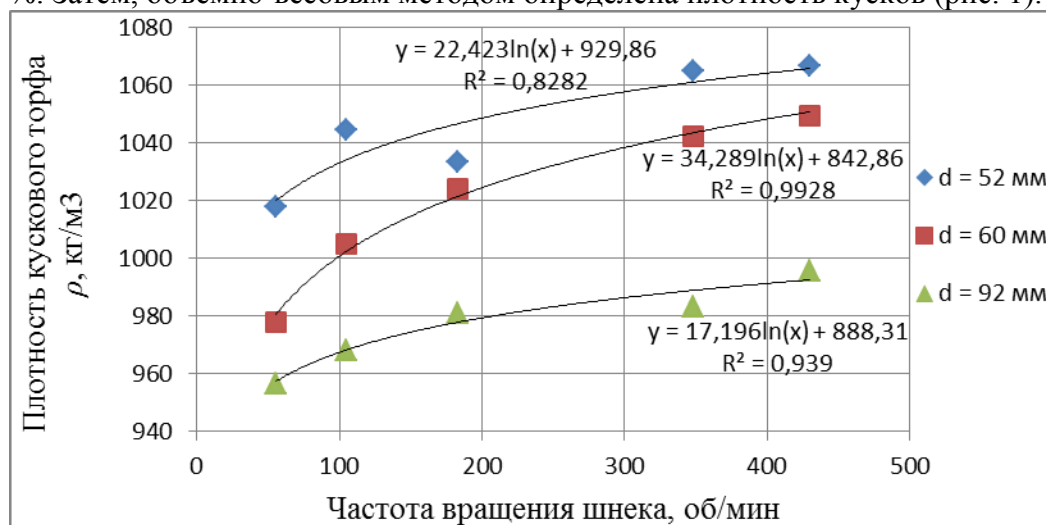


Рис. 1– Зависимость плотности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 50$ мм и диаметра формующего мундштука

Далее, на специально разработанном и изготовленном механическом стенде была определена прочность кусков на изгиб.

Учитывая факт, что напор создается шнеком еще в напорной части трубы и продолжается в мундштуке, испытывая противодействие, для описания степени уплотнения торфа в иных условиях и использования метода геометрического подобия, предлагается ввести понятие «коэффициент напора» k_n , который представляет собой отношение площадей живых сечений напорной трубы и мундштука:

$$k_n = \frac{D^2 - d_{\text{вн}}^2}{d^2} \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр напорной трубы; $d_{\text{вн}}$ – наружный диаметр трубы, являющейся основой для спирали шнека; d – диаметр мундштука.

В исследовании применялся шнековый пресс с параметрами $D = 102$ мм, $d_{\text{вн}} = 49$ мм. В этом случае коэффициенты напора k_n составили для мундштуков диаметром 52, 60 и 92 мм, соответственно 2,96, 2,22 и 0,95. Полученная зависимость прочности куска на изгиб от скорости вращения шнека представлена на рис. 2.

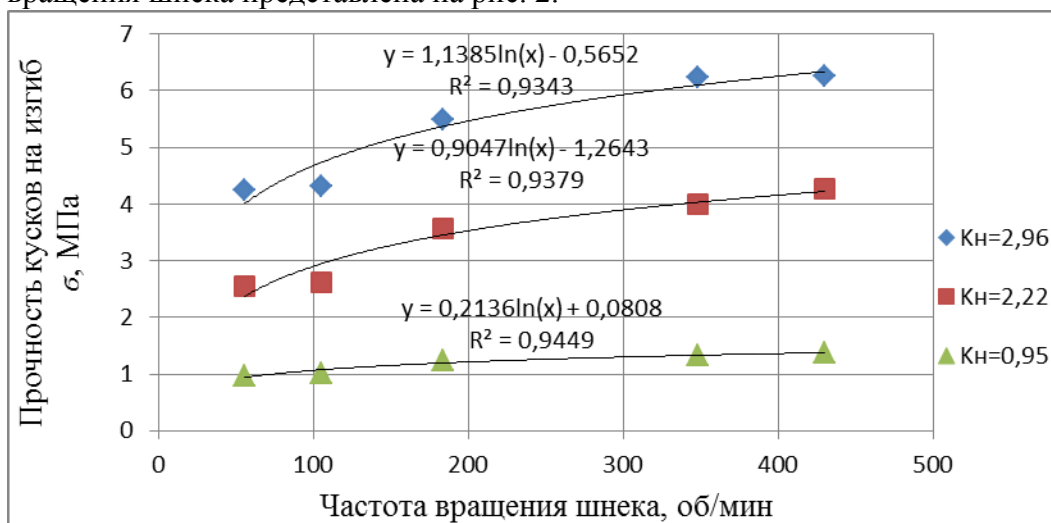


Рис. 2– Зависимость прочности кускового торфа от частоты вращения шнека с шагом витков $S = 50$ мм при различных коэффициентах напора

Схожесть форм кривых, полученных на рис. 1 и 2 позволяет сделать предположение о тесной связи прочности на изгиб и плотности кускового торфа. Для проверки этого предположения был произведен корреляционный анализ [6] с расчетом коэффициентов корреляции:

$$r_{\sigma\rho} = \frac{\sum(\rho - \bar{\rho})(\sigma - \bar{\sigma})}{\sqrt{\sum(\rho - \bar{\rho})^2 \sum(\sigma - \bar{\sigma})^2}}, \quad (2)$$

где ρ и σ – точечные значения плотности и прочности на изгиб; $\bar{\rho}$ и $\bar{\sigma}$ – их средние значения в объеме выборки из $n = 5$ серий опытов.

Ошибка коэффициента корреляции при числе опытов $n < 100$:

$$m_r = \sqrt{\frac{(1 - r_{\sigma\rho}^2)}{f}}, \quad (3)$$

где $f = n - 2$ – число степеней свободы.

Коэффициент корреляции является значимым в 1-м приближении, если

$$t_r = \frac{|r_{\sigma\rho}|}{m_r} > 3. \quad (4)$$

Все расчеты сведены в таблицу.

Таблица – Расчет коэффициентов корреляции плотности и прочности на изгиб кускового торфа

ρ , кг/м ³	σ , МПа	$\rho - \bar{\rho}$	$\sigma - \bar{\sigma}$	$(\rho - \bar{\rho})^2$	$(\sigma - \bar{\sigma})^2$	$(\rho - \bar{\rho}) \times (\sigma - \bar{\sigma})$
$d = 52$ мм; $k_H = 2,96$						
1017,96	4,2354	-27,61	-1,0745	762,3121	1,1546	29,6669
1044,48	4,3186	-1,09	-0,9913	1,1881	0,9827	1,0805
1033,67	5,4848	-11,9	0,1749	141,61	0,0306	-2,0813
1065,17	6,2443	19,60	0,9344	384,16	0,8731	18,3142
1066,59	6,2666	21,02	0,9567	441,8404	0,9153	20,1098
$\sum \rho =$ =5225,87; $\bar{\rho} =$ =1045,57	$\sum \sigma =$ =26,5497 $\bar{\sigma} =$ =5,3099			$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ =1731,1106	$\sum (\sigma - \bar{\sigma})^2 =$ =3,9563	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times (\sigma - \bar{\sigma}) =$ =67,0901
$r_{\sigma\rho} = \frac{67,0901}{\sqrt{1731,1106 \cdot 3,9563}} = 0,811$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,811^2)}{5-2}} = 0,3378$; $t_r = \frac{ 0,811 }{0,3378} = 2,4$; $r_{кр} = 0,88$						
$d = 60$ мм; $k_H = 2,22$						
978,02	2,5526	-41,79	-0,8516	1746,4041	0,7252	35,5884
1004,92	2,6197	-14,89	-0,7845	221,7121	0,6154	11,6812
1024,24	3,5670	4,43	0,1628	19,6249	0,0265	0,7212
1042,42	4,0073	22,61	0,6031	511,2121	0,3637	13,6361
1049,44	4,2746	29,63	0,8704	877,9369	0,7576	25,7900
$\sum \rho =$ =5099,04; $\bar{\rho} =$ =1019,81	$\sum \sigma =$ =17,0212 $\bar{\sigma} =$ =3,4042			$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ =3376,8901	$\sum (\sigma - \bar{\sigma})^2 =$ =2,4884	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times (\sigma - \bar{\sigma}) =$ =87,4169
$r_{\sigma\rho} = \frac{87,4169}{\sqrt{3376,8901 \cdot 2,4884}} = 0,954$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,954^2)}{5-2}} = 0,1731$; $t_r = \frac{ 0,954 }{0,1731} = 5,511$; $r_{кр} = 0,88$						
$d = 92$ мм; $k_H = 0,95$						
956,75	0,9723	-20,3	-0,2105	412,09	0,0443	4,2732
968,22	1,0035	-8,83	-0,1793	77,9689	0,0321	1,5832
981,23	1,2319	4,18	0,0491	17,4724	0,0024	0,2052
983,23	1,3342	6,18	0,1514	38,1924	0,0229	0,9357
995,82	1,3721	18,77	0,1893	352,3129	0,0358	3,5532
$\sum \rho =$ =4885,25; $\bar{\rho} =$ =977,05	$\sum \sigma =$ =5,914; $\bar{\sigma} =$ =1,1828			$\sum (\rho - \bar{\rho})^2 =$ =898,0366	$\sum (\sigma - \bar{\sigma})^2 =$ =0,1375	$\sum (\rho - \bar{\rho}) \times (\sigma - \bar{\sigma}) =$ =10,5496
$r_{\sigma\rho} = \frac{10,5496}{\sqrt{898,0366 \cdot 0,1375}} = 0,949$; $m_r = \sqrt{\frac{(1-0,949^2)}{5-2}} = 0,182$; $t_r = \frac{ 0,949 }{0,182} = 5,214$; $r_{кр} = 0,88$						

Более строгое заключение о значимости коэффициента корреляции получено путем его сравнения с критическим $r_{кр}$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = 3$ ($r_{кр} = 0,88$) [6]. Рассчитанные коэффициенты корреляции говорят о весьма тесной связи между плотностью и прочностью на изгиб кускового торфа, позволяющей аппроксимировать их взаимные зависимости прямыми линиями (рис. 3).

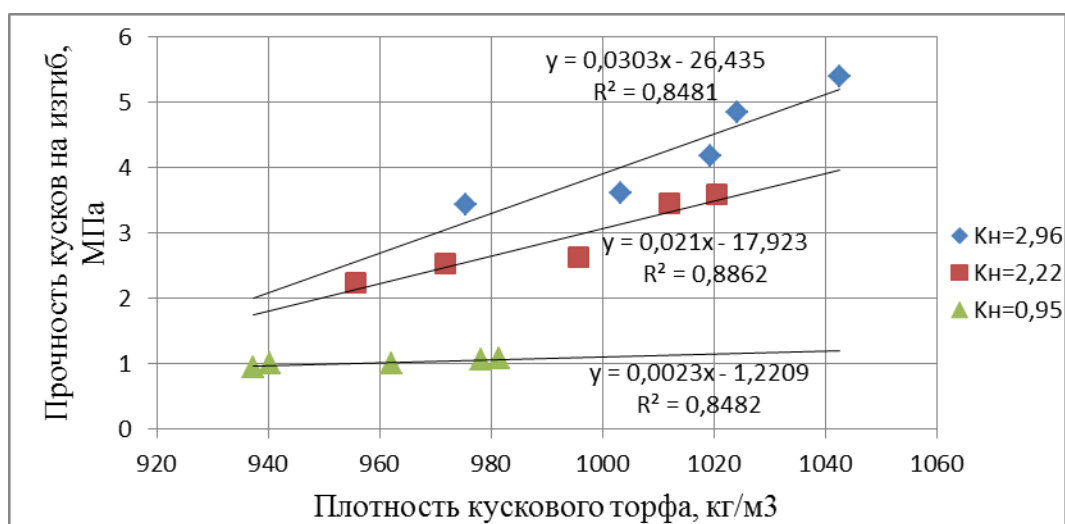


Рис. 3- Зависимость прочности на изгиб от плотности кускового торфа при различных коэффициентах напора и шаге витков шнека $S = 50$ мм

Таким образом, проведенные эксперименты и их статистическая обработка показали, что связь плотности и прочности кускового торфа на изгиб изменяется от сильной до практически функциональной. Поэтому, зная один из параметров и воспользовавшись вышеприведенными математическими моделями, можно с высокой вероятностью на уровне значимости $\alpha = 0,05$ определить другой параметр, что является весьма полезным и актуальным при ограниченности времени.

Список литературы

1. Misnikov O. Basic Technologies and Equipment Used for Peat Deposits Development in Foreign Countries // E3S Web of Conferences «III-d International Innovative Mining Symposium». Vol. 41. 2018. P. 01046. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101046
2. Мисников О.С., Беляков В.А., Шамбер О.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ. Добыча кускового торфа и сапропеля. Тверь: ТГТУ, 2008. 160 с.
3. Горячев В.И., Михеев И.И., Яблонев А.Л., Фомин К.В. Выбор пресса для обезвоживания торфа в технологии фракционирования торфяного сырья гидроразрывом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2018. № S38. С. 22–30. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-38-22-30.
4. Яблонев А.Л. Проектирование торфодобывающих предприятий. Тверь: ТвГТУ, 2016. 168 с.
5. Яблонев А.Л., Гусева А.М., Жуков Н.М. Добыча и использование кускового торфяного топлива для арктических условий // Труды Инсторфа. 2018. № 17(70). С. 46–49.
6. Богатов Б.А., Копенкин В.Д. Математические методы в торфяном производстве. М.: Недра, 1991. 240 с.

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

05.11.00

Н.А. Абышев канд. техн. наук, А.В. Ключников

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина,
Снежинск, a.klyuchnikov@bk.ru

**К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕНДА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЦИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД
АСТАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА**

Рассмотрена методика оценки метрологических характеристик стенда, предназначенного для контроля массо-центровочных и массо-инерционных характеристик летательных аппаратов в заданных диапазонах измерений параметров. Оценка выполняется по результатам контроля эталонных параметров массо-инерционной асимметрии, моделируемых с помощью специализированного рабочего эталона, представляющего собой массо-габаритный макет летательного аппарата, и контрольных грузов.

Ключевые слова: *летательный аппарат, контрольно-измерительный стенд, астатический маятник, массо-инерционные характеристики, эталон, погрешность измерений.*

Экспериментальный контроль массо-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ), таких как координаты центра масс, масса и моменты инерции, как правило, является обязательной операцией на заключительном этапе общей сборки летательного аппарата (ЛА). Контроль МЦИХ (за исключением контроля массы, для чего обычно используют стандартные весы) обычно выполняется с использованием нестандартных контрольно-измерительных стендов, учитывающих конструктивные особенности контролируемых аппаратов [1–3]. Очевидно, что точность определения МЦИХ, в первую очередь, определяется метрологическими характеристиками стендов. Критерием оценки точности функционирования контрольно-измерительных стендов, используемых для экспериментального определения МЦИХ, как правило, является соответствие их характеристик точности заданным нормативам в требуемых диапазонах измерений. Поскольку задача разработки комплексного способа проверки (контроля) качества функционирования контрольно-измерительных стендов, применяемых для контроля МЦИХ ЛА, не нашла отражения в технической литературе [1, 2] и других источниках, это делает её решение актуальным для конструкторов-разработчиков при проектировании стендов. Основной трудностью при оценке качества функционирования стенда зачастую становится отсутствие эталонов и средств измерений, сопоставимых по точности и диапазонам контролируемых характеристик.

Для определения всего комплекса указанных МЦИХ с одной установки ЛА на измерительном устройстве спроектирован и изготовлен опытный образец универсального контрольно-измерительного стенда, реализующий метод качающейся платформы [4–6]. По сравнению с методикой измерений, требующей использования нескольких (двух-трёх) стендов, это позволяет значительно сократить затраты времени на выполнение экспериментальных работ, что особенно важно, например, в условиях серийного производства. Стенд обладает грузоподъёмностью до 1600 кг, наличие специализированной технологической оснастки снижает уязвимость стенда к изменению габаритных размеров и

формы корпуса ЛА, наличию оперения и выступающих за пределы корпуса элементов конструкции. В процессе контроля объект контроля всегда располагается на стенде горизонтально, что практически снимает требования к высоте производственных помещений, в которых могут проводиться работы. Применение схемы астатического маятника (т.е. когда центр масс колеблющейся механической системы, образованной качающейся платформой и установленным на платформе объектом контроля, лежит выше оси качания) при проектировании стенда позволило увеличить его чувствительность.

Технологическая оснастка, располагающаяся на качающейся платформе стенда, включает позиционер с двумя ложементами для закрепления в них объекта контроля по его базовым поверхностям и позволяет переводить контролируемый объект в заданные методикой измерений пространственно-угловые положения [4]. Простота конструкции механической установки делает несложным её масштабирование и соответствующее (значительное) изменение грузоподъёмности.

Определение моментов инерции, а также поперечных координат центра масс контролируемого ЛА производится по результатам измерений периодов колебаний платформы стенда относительно шести пространственно распределённых осей. Продольную координату центра масс определяют с использованием принципа статического уравновешивания. Измерения периодов колебаний выполняют бесконтактным способом с помощью оптоволоконного фотодатчика (ФД) шторочного типа с прорезью, закреплённого на оси качания платформы. Обработку экспериментальных данных и расчёт искомых значений МЦИХ проводят на персональном компьютере, входящем в состав измерительно-вычислительной системы стенда [4, 7].

В [5, 6] отмечается, что для проведения работ по тестированию нормируемых метрологических характеристик стенд оснащён специализированным рабочим эталоном. Рабочий эталон, МЦИХ которого известны с высокой точностью, представляет собой габаритно-массовый макет (имитатор) контролируемого ЛА, и выполнен в виде двух металлических дисков, имитирующих посадочные поверхности ЛА, соединённых металлическим валом, и дополненных двумя металлическими грузами, предназначенными для обеспечения требуемых значений МЦИХ и прикреплёнными к противоположным концам вала.

В процессе контроля характеристик точности стенда по методике контроля МЦИХ ЛА определяют МЦИХ эталона, устанавливаемого на стенде в заданных пространственно-угловых положениях, и сравнивают их с известными номинальными значениями МЦИХ эталона. По результатам сравнения судят о погрешностях измерений. Однако, поскольку каждый рабочий эталон предназначен для имитации МЦИХ ЛА одного конкретного типа и обладает единственным набором собственных МЦИХ, это не позволяет исследовать метрологические характеристики и достоверно (на основании экспериментальных данных) подтверждать качество функционирования стенда в заданных диапазонах измерений контролируемых характеристик. В то же время, изготовление некоторого набора различных эталонов для каждого типа контролируемых на стенде ЛА, обладающих заданными значениями МЦИХ и базовыми посадочными поверхностями, является сложной технической и (учитывая необходимость метрологической аттестации, хранения, периодической поверки и т.д.) весьма дорогостоящей задачей. Поэтому погрешности измерений, экспериментально определённые рассмотренным выше способом, распространяют на весь диапазон измерений контролируемых параметров.

Очевидно, что разработка простого, надёжного и информативного способа контроля метрологических характеристик стенда в заданных диапазонах измерений является важной задачей. Решением поставленной задачи представляется применение метода моделирования и измерений параметров массо-инерционной асимметрии – смещения центра масс с геометрической оси эталона и угла отклонения продольной главной центральной оси инерции эталона относительно его геометрической оси, – предложенного для контроля характеристик точности унифицированного стенда и рассмотренного в работе [8].

Моделирование указанных параметров в заданных диапазонах измерений может быть выполнено с использованием имеющегося (единственного для каждого типа ЛА) рабочего эталона и контрольных грузов, масса которых известна с высокой точностью, прикрепляемых к торцам эталона на известных расстояниях как от центра масс, так и от геометрической оси эталона [3].

В процессе контроля, помимо номинальных значений, также в 3–5 точках, равномерно расположенных по каждому контролируемому диапазону, измеряют смоделированные значения параметров массо-инерционной асимметрии. Значения моделируемых параметров рассчитывают по законам статики [5, 9]. Измерения выполняют в соответствии с методикой контроля МЦИХ ЛА, а значения параметров массо-инерционной асимметрии рассчитывают по специальным методикам по результатам определения МЦИХ. По результатам сравнения измеренных значений с соответствующими номинальными и смоделированными значениями параметров массо-инерционной асимметрии определяют погрешности измерений и судят о качестве функционирования стенда в контролируемых диапазонах измерений [8, 9].

Предложенный способ информативен и надёжен, позволяет тестировать характеристики точности испытательного стенда в заданных диапазонах измерений параметров с определенной периодичностью и, следовательно, объективно оценивать качество функционирования стенда в течение всего срока его эксплуатации. Способ экспериментально опробован на стенде, спроектированном и изготовленном для контроля МЦИХ ЛА методом астатического маятника. Подтверждена информативность, эффективность и надёжность способа.

Список литературы

1. Левит М.Е., Рыженков В.М. Балансировка деталей и узлов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
2. Гернет М.М., Ратобыльский В.Ф. Определение моментов инерции. – М.: Машиностроение, 1969. – 247 с.
3. Ильиных В.В., Ключников А.В., Лысых А.В., Михайлов Е.Ф., Тимошенко А.Г. Технология обеспечения качества при изготовлении высокоскоростных неуправляемых летающих моделей // Вестник СибГАУ, 2013. – №3 (49). – С. 191–196.
4. Абышев Н.А., Васильев М.А., Ключников А.В., Патокина Н.Е. Технический облик и методическое обеспечение стенда для контроля МЦИХ летательных аппаратов // Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – №3. – С. 18–21.
5. Васильев М.А., Ключников А.В., Коньков М.Н., Терехова С.А., Патокина Н.Е., Цыгуева Л.Д. Опытный образец стенда определения МЦИХ крупногабаритных БПЛА // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Научные чтения по авиации, посвящённые памяти Н.Е. Жуковского» (Москва, 13–14 апреля 2017 г.). – М.: Издательский дом Академии имени Н.Е. Жуковского, 2017. – С. 140–145.
6. Абышев Н.А., Васильев М.А., Криковцов Д.А., Ключников А.В. Стенд для комплексного определения массо-геометрических характеристик деталей методом качающейся платформы // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество» (Пенза, 25–30 мая 2015 г.): в 2-х томах. – Пенза: ПГУ, 2015. – Т. 1. – С. 320–321.
7. Абышев Н.А., Ключников А.В., Терехова С.А. Алгоритм функционирования компьютерной программы маятникового стенда, предназначенного для определения МЦИХ летательных аппаратов // Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – №10. – С. 58–60.
8. Ключников А.В. Проблемы оценки качества функционирования унифицированного стенда для контроля МЦИХ деталей и пути их решения // Труды международного симпозиума «Надёжность и качество» (Пенза, 23–31 мая 2011 г.): в 2-х томах. – Пенза: ПГУ, 2011. – Т. 2. – С. 44–46.
9. Патент РФ №2445592, МПК G01M 1/10. Способ проверки качества функционирования стенда для определения массо-центровочных и массо-инерционных характеристик твёрдого тела вращения / Ключников А.В. Заявл. 30.06.2010. Оpubл. 20.03.2012.

05.11.15

**М.Е. Калинкина, А.С. Козлов, Р.Я. Лабковская канд. техн. наук,
О.И. Пирожникова канд. техн. наук, В.Л. Ткалич д-р техн. наук, Н.А. Шмаков**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, mariia_kalinkina@mail.ru, zz.kozlov@gmail.com, labkovskaya@mail.ifmo.ru,
cheezecake@mail.ru, vera_leonidovna_tkalich@mail.ru, irreversible6@mail.ru

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Статья посвящена разработке математической модели тензорезистивного чувствительного элемента интеллектуального датчика для измерения давления. В работе рассмотрен имитационный метод моделирования по двум факторам воздействия (температуре и давлению). Полученные алгоритмы и программное обеспечение с использованием MATLAB дали возможность говорить о корректности и адекватности проведённого математического моделирования.

Ключевые слова: математическая модель, чувствительный элемент, датчик давления, тензорезистор, микроэлектромеханические системы.

В настоящее время существенно возросла актуальность проблемы создания микроэлектромеханических датчиков давления (ДД) и соответственно необходимость в разработке математических моделей их важнейшей составляющей части, а именно, тензопреобразовательного чувствительного элемента (ЧЭ). С этой целью требуется осуществлять разработку как алгоритмического, так и программного обеспечения. Необходимо уделять внимание его отладке и проверке адекватности полученных математических моделей путем испытания на специализированных экспериментальных установках [1]. С этой точки зрения, в целях минимизации материальных и временных затрат, целесообразно обратиться к имитационному моделированию для исследования поведения электрического сигнала ЧЭ ДД.

На мировом рынке микроэлектромеханических систем (МЭМС) широко представлен новый вид микроэлектромеханических структур, а именно интеллектуальных датчиков для измерения давления, в которых роль ЧЭ играют тензорезистивные преобразователи, формируемые на сапфировой подложке (КНС-структуры). Эти структуры могут работать в агрессивных средах и обладают хорошей рентабельностью. Однако КНС-структуры имеют такой существенный недостаток, как нестабильность градуировочной характеристики и большую величину гистерезиса от факторов воздействия давления и температуры [2]. Это связано с неоднородностью структуры слоистой конструкции. Следовательно, при осуществлении математического моделирования на КНС-структуре необходим учет температурного фактора появления погрешностей измерения [3].

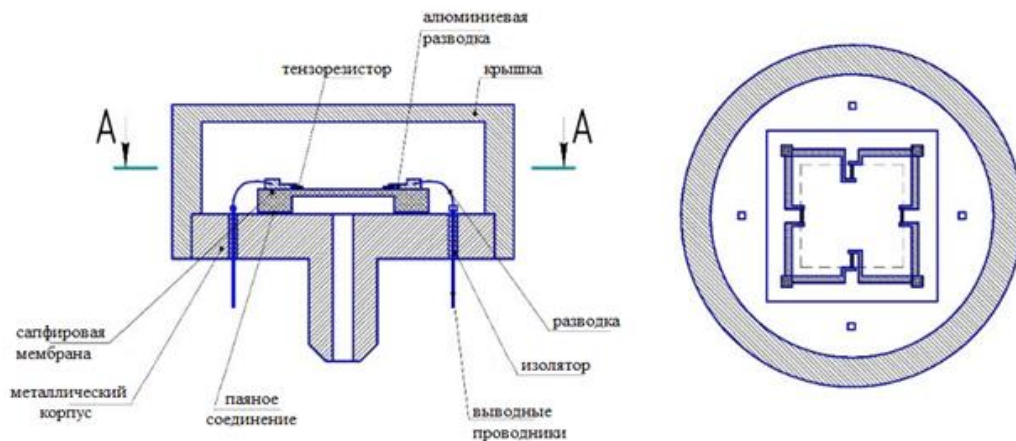


Рис. 1- Датчик давления

На рис. 1 показан ДД на основе КНС-структуры, содержащий металлический корпус из сплава титана, установленный в него тензопреобразователь давления, состоящий из упругого элемента в виде сапфировой мембраны, на которой расположены тензорезисторы из поликристаллического кремния и алюминиевая разводка. Сапфировая мембрана соединена с корпусом методом пайки [4].

На рисунке 2 показана конструкция чувствительного элемента.

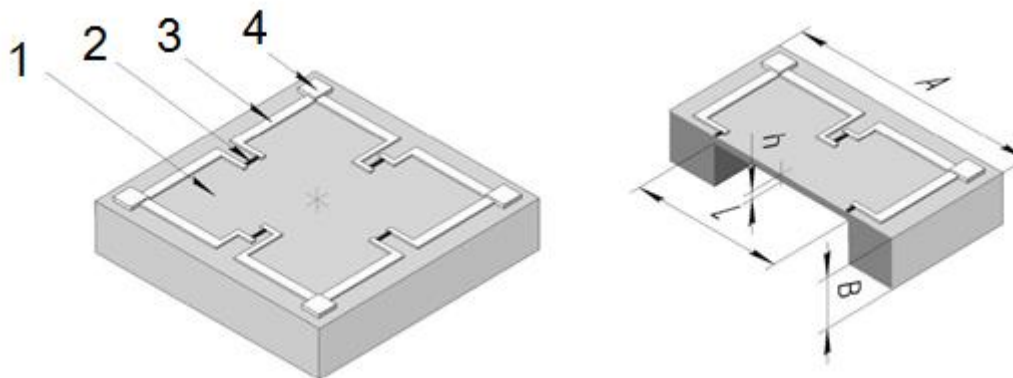


Рис. 2- Конструкция чувствительного элемента датчика давления.

1 – мембрана; 2 – тензорезисторы; 3 – алюминиевая разводка; 4 – контактные площадки.

Таким образом, конструкция ДД на основе КНС, имеет повышенные эксплуатационные параметры. Корпус ДД выполнен из сплава титана, мембрана ДД из сапфира для повышения устойчивости ДД к агрессивным веществам.

Необходимым условием корректности математического моделирования является синхронизация имитационного сигнала от двух воздействующих на ЧЭ факторов, а именно давления и температуры. Для разработки математической модели, функция преобразования тензорезистивного ЧЭ с малой погрешностью необходимо создавать градуировочную характеристику имитационного ЧЭ с точностью в десяток раз больше заданной и полученной экспериментальным путем [5].

Построение градуировочной поверхности можно провести с использованием полинома вида:

$$U_p = C + D_1 P + D_2 P^2, \quad (1)$$

где коэффициенты C , D_1 , D_2 - функции температурного воздействия.

$$C = \beta_{00} + \beta_{01} \cdot T + \beta_{02} \cdot T^2;$$

$$D_1 = \beta_{10} + \beta_{11} \cdot T + \beta_{12} \cdot T^2; \quad (2)$$

$$D_2 = \beta_{20} + \beta_{21} \cdot T + \beta_{22} \cdot T^2.$$

Объединяя (1) в (2) и получим:

$$U_p = \beta_{00} + \beta_{01} \cdot T + \beta_{02} \cdot T^2 + \beta_{10} + \beta_{11} \cdot T + \beta_{12} \cdot T^2 + \beta_{20} + \beta_{21} \cdot T + \beta_{22} \cdot T^2. \quad (3)$$

Преобразуя ряд параметров

$$X_1 = T, X_2 = T^2, X_3 = P, X_4 = TP, X_5 = T^2P, X_6 = P^2, X_7 = TP^2, X_8 = T^2P^2,$$

получим выражение:

$$U_p = \beta_{00} + \beta_{01} \cdot X_1 + \beta_{02} \cdot X_2 + \beta_{10} \cdot X_3 + \beta_{11} \cdot X_4 + \beta_{12} \cdot X_5 + \beta_{20} \cdot X_6 + \beta_{21} \cdot X_7 + \beta_{22} \cdot X_8. \quad (4)$$

К этому полиному применим метод наименьших квадратов [].

Для нахождения коэффициентов β требуется решить систему:

$$\begin{cases} m \cdot \beta_{00} + \beta_{01} \cdot \sum_i X_{1i} + \beta_{02} \cdot \sum_i X_{2i} + \dots + \beta_{22} \cdot \sum_i X_{8i} = \sum_i U_{Pi}, \\ \beta_{00} \cdot \sum_i X_{1i} + \beta_{01} \cdot \sum_i X_{1i}^2 + \beta_{02} \cdot \sum_i X_{1i}^2 \cdot X_{2i} + \dots + \beta_{22} \cdot \sum_i X_{1i} \cdot X_{8i} = \sum_i X_{1i} \cdot U_{Pi}, \\ \beta_{00} \cdot \sum_i X_{2i} + \beta_{01} \cdot \sum_i X_{1i} \cdot X_{2i} + \beta_{02} \cdot \sum_i X_{2i}^2 + \dots + \beta_{22} \cdot \sum_i X_{2i} \cdot X_{8i} = \sum_i X_{2i} \cdot U_{Pi}, \\ \dots \\ \beta_{00} \cdot \sum_i X_{8i} + \beta_{01} \cdot \sum_i X_{1i} \cdot X_{8i} + \beta_{02} \cdot \sum_i X_{2i} \cdot X_{8i} + \dots + \beta_{22} \cdot \sum_i X_{8i}^2 = \sum_i X_{8i} \cdot U_{Pi}. \end{cases} \quad (5)$$

Корректным является использование линейной зависимости

$$U_T = \gamma_0 + \gamma_1 \cdot T. \quad (6)$$

Соответственно, для нахождения коэффициентов γ требуется решить систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \gamma_0 + \gamma_1 \cdot T_i = U_{Ti} \\ \gamma_0 + \gamma_1 \cdot T_{i+1} = U_{T_{i+1}} \end{cases}, \quad (7)$$

При построении математической модели ЧЭ алгоритм программы предусматривает ввод данных, являющихся результатом испытаний ЧЭ, на основании которых осуществляется расчет коэффициентов математической модели для каждого имитационного канала ЧЭ. По этим коэффициентам определяются выходные значения напряжения в каждом имитационном канале. Далее после определения коэффициентов осуществляется непосредственно режим имитации с выбором функции измеряемого давления и температуры, а также шаг изменения функции. В результате полученные расчётные данные напряжений поступают на вход генератора аналогового сигнала в виде массива данных.

Программное обеспечение написано в среде MATLAB. Программа также позволяет осуществить расчет величины относительной ошибки при построении градуировочного функции для двух каналов (давления и температуры).

Результатом работы является построение графиков относительной погрешности, градуировочной кривой для канала температур и относительной погрешности расчета напряжения температуры.

В соответствии с анализом результатов математического моделирования функции преобразования ЧЭ интеллектуального датчика для измерения давления видно, что максимальная величина относительной погрешности полностью удовлетворяет поставленным задачам (погрешность не превышает 0.1%).

Список литературы

1. Ткалич В.Л., Макеева А.В., Обороина Е.Е. Физические основы нанoeлектроники - Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с.
2. Баринев И.А. Полупроводниковые тензочувствительные элементы датчиков давлений. - М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. - 188
3. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Y., Pirozhnikova O.I., Tklich V.L. Analysis and design of pressure sensors for micromechanical integrated pressure sensors//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IET - 2018, Vol. 450, No. 3, pp. 032004
4. Tklich V.L., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Kalinkina M.E., Kozlov A.S. Analysis of errors in micromechanical devices//14th International scientific- technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2018): Proceedings, IET - 2018, Vol. 1, No. 6, pp. 272-276
5. Ибрагимов Н.Х. Практический курс дифференциальных уравнений и математического моделирования. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. - 332 с.

05.11.15

**М.Е. Калинин, А.Г. Коробейников д-р техн. наук, Д.И. Медведков,
О.И. Пирожникова канд. техн. наук, В.Л. Ткалич д-р техн. наук, Н.А. Шмаков**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
факультет безопасности информационных технологий,
Санкт-Петербург, mariia_kalinkina@mail.ru, korobeynikov_a_g@mail.ru, m_dima22@mail.ru,
cheezecake@mail.ru, vera_leonidovna_tkalich@mail.ru, irreversible6@mail.ru

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Объектом исследования и разработки являются мембранные и балочные плоские тонкостенные чувствительные элементы микроакселерометров, микрогироскопов и интегральных датчиков давления. На основе всестороннего анализа существующих численных методов расчета оболочечных и тонкостенных элементов осуществлена разработка новых алгоритмов и модифицированных методик расчета чувствительных элементов микромеханических приборов. Для этого сформирована библиотека конечных элементов для мембранных и балочных чувствительных элементов микромеханических приборов.

Ключевые слова: чувствительный элемент, система автоматизированного проектирования, микромеханический прибор.

Современное производство устройств автоматики с широким ассортиментом преобразователей и различных видов датчиков характеризуется все большим ростом процессов автоматизации, что обеспечивает увеличение производительности труда. Развитие автоматизации ведет к повышению эффективности технических систем, в состав которых включены вычислительные и управляющие устройства [1].

Существующие разработки электроизмерительной техники позволяют осуществлять преобразования измеряемой величины с требуемой степенью точности. Однако при низком качестве чувствительных элементов (ЧЭ) микроэлектромеханических систем (МЭМС), входящих в состав измерительных устройств, невозможно добиться высокой точности самого измерительного устройства в целом. Например, хотя ЧЭ датчиков давления (ДД) являются достаточно простыми элементами и их рабочие характеристики, на сегодняшний день, не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям с точки зрения точности, чувствительности и других метрологических характеристик [2]. Современный рост требований к первичным преобразователям и измерительным устройствам делает актуальным решение задачи повышения качества ЧЭ МЭМС не только в процессе их изготовления, но при их моделировании и расчете.

В настоящее время существует большое число различных методик расчета ЧЭ, но нет ни одного простого и в тоже время универсального и эффективного метода. В связи с этим в данной работе наибольшее внимание уделено созданию альтернативных методов расчета ЧЭ, которые могли бы одновременно опираться как на аналитические методы классической механики, теории упругости и сопротивления материалов, так и на численные методы с целью использования их преимуществ и компенсации слабых сторон.

Актуальной на сегодняшний день является разработка современных бесконтактных компьютеризированных методик исследования элементной базы (ЭБ) измерительной техники для определения напряженно-деформированных состояний. Это необходимо для обеспечения надежного прогнозирования качества ЭБ измерительной техники в ходе выполнения функционального контроля. Методика должна быть применима также и для операционного выходного контроля ЭБ измерительной техники.

Разработка систем автоматизированного проектирования (САПР), конструирования и технологической подготовки производства ЧЭ МЭМС является, бесспорно, актуальной задачей, для решения которой необходимо использовать как сами численные методы, так и современные программные комплексы на их базе [3].

При решении задач создания САПР ЭБ МЭМС необходимо осуществить математическое моделирование процессов деформации в твердом теле, а также провести анализ статических и динамических характеристик их ЧЭ, используя возможности современных программных комплексов, например, программного комплекса ANSYS [4].

С этой целью наиболее применим метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий автоматизировать процесс проектирования упругой ЭБ. Выбор программного комплекса ANSYS обусловлен широким спектром возможностей МКЭ, позволяющим проводить как простой линейный стационарный анализ, так и осуществлять нелинейный анализ переходных процессов.

Необходимо учитывать тот факт, что точность получаемых решений напрямую зависит как от погрешностей принятого способа дискретизации структуры, так и от накапливаемой погрешности округления чисел в процессе счета.

Для выбранной аппроксимации поля перемещений получаем уравнение:

$$\{u\} = [N(x_1, x_2)]\{U\}, (1)$$

и поля деформаций имеет выражение:

$$\{\epsilon\} = \{B(x_1, x_2)\}\{U\}, (2)$$

с учетом матрицы жесткости $[D(x_1, x_2)]$ и векторе столбце внешних нагрузок $\{q(x_1, x_2)\}$ матрицу жесткости конечного элемента $[K]$ и вектор обобщенных узловых нагрузок $[Q]$ можно представить формулами:

$$[K] = \iint_S [B]^T [D] [B] dS (3)$$

$$[Q] = \iint_S [N]^T \{q\} dS (4)$$

Далее при анализе различных типов конечных элементов можно учитывать только специфику аппроксимации полей перемещений и геометрии элемента.

Тогда вектор обобщенных узловых перемещений будет содержать три компонента вектора перемещений U_1, U_2, U_3 и два компонента угла поворота θ_1, θ_2 , т.е. $\{U\}^T = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ \theta_1 \ \theta_2]$.

В силу ограниченности ресурсов работа производилась в режиме упрощенного GUI интерфейса, базирующаяся на использовании программного продукта КОМПАС 3-D V15. Во время моделирования было произведено разбиение модели сеткой конечных элементов. Базовым конечным элементом является элемент SOLID95 с 20 узлами и 6 гранями. Разбиение осуществлялось на элементы гексагональной формы с максимальным размером, не более 2,5 мм. При описании контактных пар поверхностей с учетом нелинейности приоритет отдавался конечным элементам CONTA174 и TARGE170. Для представления контактных пар разбиение проводилось автоматически. При анализе переходных процессов, а также при проведении гармонического и модального анализов использовались конечные элементы типа MASS21 для имитации процессов нагружения ЧЭ. В качестве граничных условий в МКЭ выбираются ограничения на перемещения мембранных и балочных ЧЭ, нагрузка и свойства материалов. При использовании МКЭ дискретные уравнения движения имеют вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, (4)$$

где $\{u\}$ – вектор узловых перемещений; $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}$ – векторы ускорений и скоростей точек тела, $[M], [C], [K]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых сил.

В ходе моделирования с учетом ограничений к модели прикладывались переменные нагрузки, задаваемые за счет табличного массива, учитывающего зависимость нагрузки от времени. При расчете частот и форм собственных колебаний в проекте использован модальный анализ, предполагающий, что система линейна. Учет нелинейности не

производился. Внешние силы и демпфирование обнулялись. Ввиду геометрической сложности модели и достаточно частой сетки конечных элементов для поставленных задач было решено использовать вычисление блочным методом Ланцоша с нормированием по матрице масс с точностью до шестого знака после запятой.

Для оценки влияния присоединенной массы на частоты собственных колебаний представляется возможным проводить модальный анализ предварительно напряженной модели.

В качестве граничных условий в МКЭ выбираются ограничения на перемещения ЧЭ, нагрузку и свойства материалов. При использовании МКЭ дискретные уравнения движения имеют вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + K\{u\} = \{0\}. \quad (5)$$

Решения, полученные при модальном анализе уточнялись с помощью гармонического анализа и анализа переходных процессов, которые применимы только к линейным моделям.

Модальный анализ дает возможность экономить время на гармонический анализ и сузить диапазон поиска частот собственных колебаний.

Динамический анализ требует несоизмеримо больше временных ресурсов. В результате динамического анализа можно получить АЧХ и ФЧХ, которые позволяют оценить устойчивость [5]. Результаты динамического расчета были сопоставлены с экспериментальными данными. Для этого использовались циклограммы нагружения ЧЭ.

Таким образом, проведенный анализ статических и динамических характеристик ЧЭ МЭМС и осуществленное моделирование с использованием МКЭ и специализированного программного комплекса позволяет успешно реализовывать и использовать САПР ЧЭ МЭМС, базируется на разработанной авторами статьи библиотеке КЭ для ЧЭ микромеханических приборов.

Список литературы

1. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Tkalic V.L., Shmakov N.A. Development of computer-aided design system of elastic sensitive elements of automatic metering devices // Journal of Physics: Conference Series - 2018, Vol. 1015, pp. 052018
2. Kozlov A.S., Shmakov N.A., Tkalic V.L., Labkovskaia R.I., Kalinkina M.E., Pirozhnikova O.I. Development library of finite elements for computer-aided design system of reed sensors . Journal of Physics: Conference Series - 2018, Vol. 1015, pp. 032080
3. Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л. Библиотека конечных элементов в приложении к тонкостенным оболочкам вращения. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. No. 8. С. 708-711.
4. Сертик И.Н.. Метод конечных элементов в решении задач механики несущих систем. Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2015. – 200 с.
5. Абдулаев С.О.. Система автоматизированного проектирования приборов микроэлектроники (САПР микроэлектроники). – М.: Дагестанский научный центр РАН, 2011. – 232 с.

05.11.15

**М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников д-р техн. наук, Д.И. Медведков,
О.И. Пирожникова канд. техн. наук, В.Л. Ткалич д-р техн. наук, Н.А. Шмаков**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
факультет безопасности информационных технологий,
Санкт-Петербург, mariia_kalinkina@mail.ru, korobeynikov_a_g@mail.ru, m_dima22@mail.ru,
cheezecake@mail.ru, vera_leonidovna_tkalich@mail.ru, irreversible6@mail.ru

РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Объектом исследования и разработки являются мембранные и балочные плоские тонкостенные чувствительные элементы микроакселерометров, микрогироскопов и интегральных датчиков давления. На основе всестороннего анализа существующих численных методов расчета оболочечных и тонкостенных элементов осуществлена разработка новых алгоритмов и модифицированных методик расчета чувствительных элементов микромеханических приборов. Для этого сформирована библиотека конечных элементов для мембранных и балочных чувствительных элементов микромеханических приборов.

Ключевые слова: чувствительный элемент, система автоматизированного проектирования, микромеханический прибор.

Современное производство устройств автоматики с широким ассортиментом преобразователей и различных видов датчиков характеризуется все большим ростом процессов автоматизации, что обеспечивает увеличение производительности труда. Развитие автоматизации ведет к повышению эффективности технических систем, в состав которых включены вычислительные и управляющие устройства [1].

Существующие разработки электроизмерительной техники позволяют осуществлять преобразования измеряемой величины с требуемой степенью точности. Однако при низком качестве чувствительных элементов (ЧЭ) микроэлектромеханических систем (МЭМС), входящих в состав измерительных устройств, невозможно добиться высокой точности самого измерительного устройства в целом. Например, хотя ЧЭ датчиков давления (ДД) являются достаточно простыми элементами и их рабочие характеристики, на сегодняшний день, не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям с точки зрения точности, чувствительности и других метрологических характеристик [2]. Современный рост требований к первичным преобразователям и измерительным устройствам делает актуальным решение задачи повышения качества ЧЭ МЭМС не только в процессе их изготовления, но при их моделировании и расчете.

В настоящее время существует большое число различных методик расчета ЧЭ, но нет ни одного простого и в тоже время универсального и эффективного метода. В связи с этим в данной работе наибольшее внимание уделено созданию альтернативных методов расчета ЧЭ, которые могли бы одновременно опираться как на аналитические методы классической механики, теории упругости и сопротивления материалов, так и на численные методы с целью использования их преимуществ и компенсации слабых сторон.

Актуальной на сегодняшний день является разработка современных бесконтактных компьютеризированных методик исследования элементной базы (ЭБ) измерительной техники для определения напряженно-деформированных состояний. Это необходимо для обеспечения надежного прогнозирования качества ЭБ измерительной техники в ходе выполнения функционального контроля. Методика должна быть применима также и для операционного выходного контроля ЭБ измерительной техники.

Разработка систем автоматизированного проектирования (САПР), конструирования и технологической подготовки производства ЧЭ МЭМС является, бесспорно, актуальной задачей, для решения которой необходимо использовать как сами численные методы, так и современные программные комплексы на их базе [3].

При решении задач создания САПР ЭБ МЭМС необходимо осуществить математическое моделирование процессов деформации в твердом теле, а также провести анализ статических и динамических характеристик их ЧЭ, используя возможности современных программных комплексов, например, программного комплекса ANSYS [4].

С этой целью наиболее применим метод конечных элементов (МКЭ), позволяющий автоматизировать процесс проектирования упругой ЭБ. Выбор программного комплекса ANSYS обусловлен широким спектром возможностей МКЭ, позволяющим проводить как простой линейный стационарный анализ, так и осуществлять нелинейный анализ переходных процессов.

Необходимо учитывать тот факт, что точность получаемых решений напрямую зависит как от погрешностей принятого способа дискретизации структуры, так и от накапливаемой погрешности округления чисел в процессе счета.

Для выбранной аппроксимации поля перемещений получаем уравнение:

$$\{u\} = [N(x_1, x_2)]\{U\}, (1)$$

и поля деформаций имеет выражение:

$$\{\epsilon\} = \{B(x_1, x_2)\}\{U\}, (2)$$

с учетом матрицы жесткости $[D(x_1, x_2)]$ и векторе столбце внешних нагрузок $\{q(x_1, x_2)\}$ матрицу жесткости конечного элемента $[K]$ и вектор обобщенных узловых нагрузок $[Q]$ можно представить формулами:

$$[K] = \iint_S [B]^T [D] [B] dS (3)$$

$$[Q] = \iint_S [N]^T \{q\} dS (4)$$

Далее при анализе различных типов конечных элементов можно учитывать только специфику аппроксимации полей перемещений и геометрии элемента.

Тогда вектор обобщенных узловых перемещений будет содержать три компонента вектора перемещений U_1, U_2, U_3 и два компонента угла поворота θ_1, θ_2 , т.е. $\{U\}^T = [U_1 \ U_2 \ U_3 \ \theta_1 \ \theta_2]$.

В силу ограниченности ресурсов работа производилась в режиме упрощенного GUI интерфейса, базирующаяся на использовании программного продукта КОМПАС 3-D V15. Во время моделирования было произведено разбиение модели сеткой конечных элементов. Базовым конечным элементом является элемент SOLID95 с 20 узлами и 6 гранями. Разбиение осуществлялось на элементы гексагональной формы с максимальным размером, не более 2,5 мм. При описании контактных пар поверхностей с учетом нелинейности приоритет отдавался конечным элементам CONTA174 и TARGE170. Для представления контактных пар разбиение проводилось автоматически. При анализе переходных процессов, а также при проведении гармонического и модального анализов использовались конечные элементы типа MASS21 для имитации процессов нагружения ЧЭ. В качестве граничных условий в МКЭ выбираются ограничения на перемещения мембранных и балочных ЧЭ, нагрузка и свойства материалов. При использовании МКЭ дискретные уравнения движения имеют вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, (4)$$

где $\{u\}$ – вектор узловых перемещений; $\{\ddot{u}\}, \{\dot{u}\}$ – векторы ускорений и скоростей точек тела, $[M], [C], [K]$ – матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых сил.

В ходе моделирования с учетом ограничений к модели прикладывались переменные нагрузки, задаваемые за счет табличного массива, учитывающего зависимость нагрузки от времени. При расчете частот и форм собственных колебаний в проекте использован модальный анализ, предполагающий, что система линейна. Учет нелинейности не

производился. Внешние силы и демпфирование обнулялись. Ввиду геометрической сложности модели и достаточно частой сетки конечных элементов для поставленных задач было решено использовать вычисление блочным методом Ланцоша с нормированием по матрице масс с точностью до шестого знака после запятой.

Для оценки влияния присоединенной массы на частоты собственных колебаний представляется возможным проводить модальный анализ предварительно напряженной модели.

В качестве граничных условий в МКЭ выбираются ограничения на перемещения ЧЭ, нагрузку и свойства материалов. При использовании МКЭ дискретные уравнения движения имеют вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + K\{u\} = \{0\}. \quad (5)$$

Решения, полученные при модальном анализе уточнялись с помощью гармонического анализа и анализа переходных процессов, которые применимы только к линейным моделям.

Модальный анализ дает возможность экономить время на гармонический анализ и сузить диапазон поиска частот собственных колебаний.

Динамический анализ требует несоизмеримо больше временных ресурсов. В результате динамического анализа можно получить АЧХ и ФЧХ, которые позволяют оценить устойчивость [5]. Результаты динамического расчета были сопоставлены с экспериментальными данными. Для этого использовались циклограммы нагружения ЧЭ.

Таким образом, проведенный анализ статических и динамических характеристик ЧЭ МЭМС и осуществленное моделирование с использованием МКЭ и специализированного программного комплекса позволяет успешно реализовывать и использовать САПР ЧЭ МЭМС, базируется на разработанной авторами статьи библиотеке КЭ для ЧЭ микромеханических приборов.

Список литературы

1. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Tkalic V.L., Shmakov N.A. Development of computer-aided design system of elastic sensitive elements of automatic metering devices // Journal of Physics: Conference Series - 2018, Vol. 1015, pp. 052018
2. Kozlov A.S., Shmakov N.A., Tkalic V.L., Labkovskaia R.I., Kalinkina M.E., Pirozhnikova O.I. Development library of finite elements for computer-aided design system of reed sensors . Journal of Physics: Conference Series - 2018, Vol. 1015, pp. 032080
3. Козлов А.С., Лабковская Р.Я., Ткалич В.Л. Библиотека конечных элементов в приложении к тонкостенным оболочкам вращения. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59. No. 8. С. 708-711.
4. Сертик И.Н.. Метод конечных элементов в решении задач механики несущих систем. Учебное пособие. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2015. – 200 с.
5. Абдулаев С.О.. Система автоматизированного проектирования приборов микроэлектроники (САПР микроэлектроники). – М.: Дагестанский научный центр РАН, 2011. – 232 с.

05.11.15

**М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников д-р техн. наук, Н.Ю. Коновалов,
О.И. Пирожникова канд. техн. наук, В.Л. Ткалич д-р техн. наук, Н.А. Шмаков**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
Санкт-Петербург, Mariia_Kalinkina@mail.ru, korobeynikov_a_g@mail.ru,
nikolakonov7@gmail.com, cheezecake@mail.ru, vera_leonidovna_tkalich@mail.ru,
irreversible6@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Проведён анализ влияния электростатических воздействий на смещение чувствительного элемента микромеханических приборов с учетом различных температурных воздействий окружающей среды. Получены выражения для установления зависимости между параметрами движения, в частности измеряемым ускорением в микромеханических акселерометрах, величиной отклонения чувствительного элемента и емкости между обкладкой конденсатора и подложкой (также играющей роль обкладки конденсатора). Предложен метод, который в свою очередь, увеличивает точность измерения микроприборов.

Ключевые слова: микромеханические приборы, чувствительный элемент, акселерометр, гироскоп, метод конечных элементов.

В процессе решения задач моделирования динамики чувствительного элемента (ЧЭ) микромеханического прибора (ММП) в статье используются современные численные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ), что позволяет осуществить корректное описание влияния электростатических и температурных воздействий на отклонение и деформирование ЧЭ ММА маятникового типа и двухмассовых микромеханических гироскопов с противоположным перемещением в режиме движения и в режиме чувствительности. Проблема состоит в наличии независимых упругих подвесов для каждой инерционной массы и, как следствие, сложность получения равенства их собственных частот и синхронности противофазных колебаний, что существенно влияет на точность измерения.

Первоначально осуществим рассмотрение устройства измерения проекции вектора линейного ускорения на ось в ММА маятникового типа (рис. 1)

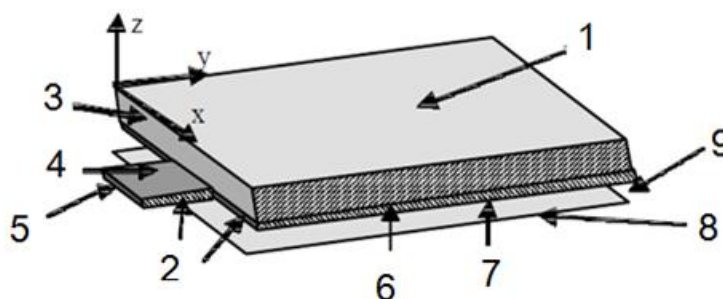


Рис. 1- Микромеханический акселерометр емкостного типа в декартовой системе координат. 1 – ЧЭ, 2 – слой 1, 3 – слой 2, 4 – перемычка, 5 – граница 1, 6 – граница 2, 7 – граница 3, 8 – подложка (обкладка конденсатора), 9 – зазор между обкладками конденсатора.

В качестве ЧЭ ММА емкостного маятникового типа, используется пластина, соединённая через упругий подвес с внешней рамкой. При воздействии ускорения пластинка смещается в соответствии с направлением воздействующего ускорения. Анализируя конечное положение

пластины, возможно, осуществить нахождение положения ЧЭ [1]. Для задачи нахождения положения пластинки с учетом наличия стеклянной подложки получается два тонких слоя играющих роль обкладок (7 и 8) конденсатора переменной емкости. Действие электростатического взаимодействия между обкладками 7 и 8, приводит к определению конечного смещения ЧЭ ММА. С учетом температурного воздействия в ЧЭ ММА как в сложной структуре появятся локальные неравномерные температурные деформации, что ведет в итоге к изменению смещения ЧЭ ММА и вносит погрешность в измерения.

Далее рассмотрим погрешности связанные с общим недостатком двухмассовых ММГ [2], вызванные сложностью получения равенства их собственных частот и синхронности противофазных колебаний каждой инерционной массы (рис. 2)

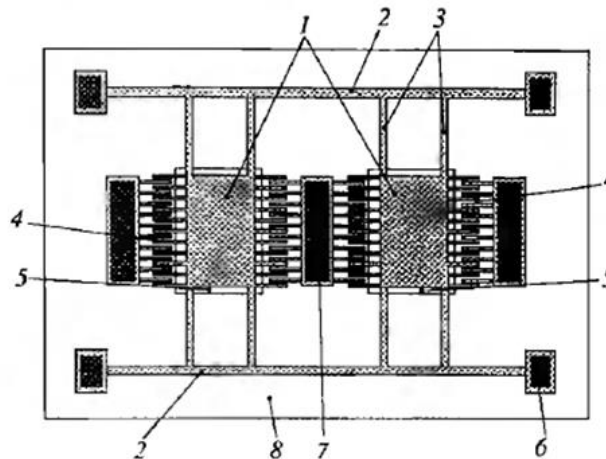


Рис. 2- Принципиальная схема микромеханического гироскопа. 1 – инерционная масса; 2 – базовый элемент конструкции подвеса; 3 – упругие элементы подвеса; 4, 7 – электростатические гребенчатые приводы; 5 – электроды измерителей перемещений; 6 – анкер; 8 – подложка.

Для ММА проводился анализ влияния коэффициента температурного расширения в слоях ММА (линейный коэффициент температурного расширения (ЛКТР) в слое 2 составил $\alpha_2 \approx 3,53 \div 3,58 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при общей толщине слоя 2 $\approx 350 \div 355 \text{ мкм}$). Зазор между обкладками конденсатора порядка 55-56 мкм.

Исследуя конструкцию ММА, целесообразно анализировать ЧЭ как двухслойную пластинку, подчиняющуюся соотношениям теории тонкостенных пластин и оболочек, с привлечением общих методов решения связанных задач, применяемых в механике упругодеформированного твердого тела и в задачах электростатики [3].

При этом математическая постановка задачи разделяется на два этапа с учетом взаимосвязи через граничные условия. На первом этапе осуществляется моделирование упругого деформирования элемента 4 (перемычка) и элемента 1 (ЧЭ), занимающих в пространстве область объема V . На втором этапе моделируется электростатическое воздействие в области V_0 -элемент 10 (зазор между обкладками).

С учетом теории малых деформаций элемент 1 и элемент 4 представляются уравнением:

$$\sigma_{ij} + \rho F_i = 0, \quad \vec{r}(x, y, z) \in V, \quad (1)$$

где ρ - плотность; σ_{ij} - величина деформации; F – силы электростатического взаимодействия.

Считая, что отклонение ЧЭ вызвано измеряемым ускорением a_z (проекция $\vec{a}$ на ось чувствительности прибора OZ), получим:

$$F_x = F_y = 0, \quad F_z = a_z \quad (2)$$

При этом геометрические и физические соотношения будут иметь соответственно вид:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad r \in V \text{ и } \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{mm} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - \alpha_k \delta_{ij} \Delta T, \quad k=1,2; \quad (3)$$

где α_k – ЛКТР; λ, μ - постоянные Ламе.

На границе Γ_3 и Γ_4 создается разность потенциалов

$$\varphi|_{\Gamma_3} = \varphi_0, \quad \varphi|_{\Gamma_4} = -\varphi_0, \quad (4)$$

где $2\varphi_0$ – разность потенциалов между ЧЭ и подложкой в конденсаторе.

Соответственно, в работе проведено совместное решение задачи теории упругости твердого деформируемого тела и электростатической задачи. Тогда влияние кулоновских электростатических сил, с учётом действия распределённой поверхностной нагрузки $f(\vec{r})$ может представляться выражением:

$$f(\vec{r}) = q \vec{E} \cdot \vec{n}, \vec{r} \in \Gamma_3'. \quad (5)$$

где $\vec{n}$ вектор-нормаль к поверхности подвижной обкладки, $\vec{E}$ – вектор напряженности, Γ_3' – граница, связанная с ЧЭ.

Для решения связанной задачи выбран, МКЭ, реализованный в прикладном программном пакете ANSYS. Компенсации изменение зазора между подвижными и неподвижными электродами, возможно, добиться с помощью дифференциального емкостного датчика перемещений, создающего дополнительный выходной сигнал, пропорциональный зазору между инерциальным телом и измерительными электродами. Этот дополнительный сигнал может быть использован для повышения точности микромеханического прибора [4]. Однако надо иметь в виду, что при использовании принципа компенсации могут изменяться и коэффициенты передачи силовых электродов. Решить проблему возможно при использовании дифференциального емкостного датчика перемещений на выходе, создающем дополнительный сигнал, пропорциональный изменению зазора и блока компенсации в обратной связи, что обеспечит независимость масштабного коэффициента датчика от зазора.

Возвращаясь к двухмассовым ММГ, надо отметить еще одну причину возникновения погрешности измерения, а именно то, что в этих конструкциях возможно коробление пластин, что снижает точность измерения. Но самая главная погрешность возникает вследствие электростатического залипания пластин инерциальных масс [2]. Оно возникает при плоскопараллельном перемещении подвижных и неподвижных электродов друг относительно друга при крайне малых величинах зазора (от 1 до 3 мкм) между ними. Возможный путь борьбы с данным недостатком – это увеличение жесткости подвеса.

Корректность и адекватность полученных в работе решений задач моделирования процессов влияния электростатических и температурных воздействий на деформирование ЧЭ ММП путем решения связанных задач, базирующихся на теории тонкостенных пластин и оболочек, а также механике упругодеформируемых твердых тел, МКЭ, подтверждена серией вычислительных экспериментов и полученным патентом на полезную модель РФ № 181216. Было показано снижение погрешности от влияния электростатического и температурного факторов и повышение точности измерений современных отечественных конкурентоспособных микромеханических приборов, в частности, ММА и ММГ.

Список литературы

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
2. Tkalic V.L., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Kalinkina M.E., Kozlov A.S. Analysis of errors in micromechanical devices//14th International scientific- technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2018): Proceedings, IET - 2018, Vol. 1, No. 6, pp. 272-276
3. Кечиев Л.Н., Пожидаев Е.Д., Защита электронных средств от воздействия статического электричества. – М.: Группа ИДТ, 2008. – 352 с.
4. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 314 с.

05.11.15

**М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников д-р техн. наук, Р.Я. Лабковская канд. техн. наук,
О.И. Пирожникова канд. техн. наук, В.Л. Ткалич д-р техн. наук, Н.А. Шмаков**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
факультет безопасности информационных технологий,
Санкт-Петербург, Mariia_Kalinkina@mail.ru, korobeynikov_a_g@mail.ru,
labkovskaya@mail.ifmo.ru, cheezecake@mail.ru, vera_leonidovna_tkalich@mail.ru,
irreversible6@mail.ru

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ С ТЕРМОСТАБИЛЬНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

В работе проведён анализ дестабилизирующих факторов от ряда температурных, вибрационных и ударных нагрузок и выявлено, что основной причиной появления неравномерности в процессе изменения сопротивления являются диффузные флуктуации в тонкопленочной гетероструктуре чувствительного элемента под воздействием нестационарных тепловых потоков. Рассмотрены возможные пути снижения температурной погрешности как за счёт правильного подбора материала сплавов тензорезисторов так и путем разработки новых модифицированных схем и технологий изготовления термостабильных тонкопленочных тензорезисторов.

Ключевые слова: микромеханические приборы, датчики давления, чувствительный элемент, температурная погрешность.

В настоящее время важнейшим элементом конструкций ракетно-космической техники, содержащим информацию о результатах контроля и измерения давления, являются интегральные тензометрические датчики давления (ДД). ДД помимо, воздействия главного контролируемого и измеряемого параметра, а именно, давления, испытывают целый ряд воздействий со стороны дестабилизирующих факторов, в частности, температурных, вибрационных и ударных нагрузок. Эти, негативные факторы приводят к искажению истинной контролируемой измеряемой информации вплоть до выхода показателей за пределы, оговоренные в технических условиях [1]. Также, для получения корректного значения главного измеряемого параметра необходимо осуществлять учет «паразитных» искажений результирующей контролируемой величины давления, причины возникновения которых, в свою очередь, связаны с особенностями структуры кристаллической ячейки кремневого материала, наличием асимметрии размеров ДД, наличием градиента легирования кристалла или слоистости его структуры, в частности, присутствием слоя SiO₂ (двуокиси кремния), а также локальными термонапряжениями, связанными с выделением тепла в процессе электропитания ДД. Поэтому данные о местах локализации механических напряжений и их эволюции являются актуальной информацией при оценке надежности, линейности характеристики преобразования и величины обратного тока р-п перехода [2].

Метрологические отказы ДД связаны с уходом измерительной величины за пределы, оговоренные в технических условиях. При проведении анализа отказавших ДД было выявлено, что в большинстве случаев нестабильность мостовой измерительной схемы обусловлена разницей интенсивности изменения величины сопротивления тензорезисторов, испытывающих в ходе работы механические нагрузки сжатия и растяжения, что приводит к нарушению равновесия тензомостовой схемы [4]. Выявлено, что основной причиной появления неравномерности в процессе изменения сопротивления являются диффузные изменения в тонкопленочной гетероструктуре чувствительного элемента (ЧЭ), связанные с действием нестационарных тепловых потоков и наличием термомеханических напряжений,

возникающих в ходе осаждения тонких пленок и при эксплуатации ДД. Поэтому флуктуации температурного поля влияют на появление температурного дрейфа нуля. Эта аддитивная погрешность может составлять до трети от номинального значения, что говорит о том, что термочувствительный ЧЭ является важнейшим элементом ДД с точки зрения стабильности его характеристик и точности показаний [5].

В настоящее время современные микротехнологии позволяют осуществлять минимизацию влияния воздействующих факторов и производить ЧЭ, удовлетворяющие временной стабильности в требуемых пределах (0,01-0,03% в год). Столь высокие требования к стабильности обусловлены низкой чувствительностью сплавов (коэффициент чувствительности тензорезистивных сплавов k находится в пределах от 1,7 до 2,2), применяемых при формировании тонкопленочных тензорезисторов для интегральных ДД.

На рис. 1 приведена структурная схема интегрального тензорезистивного ДД для измерений давления электрическими методами. Давление p с помощью кремниевого мембранного ЧЭ преобразуется в величину относительной деформации ε_i мембранного ЧЭ, которая, в свою очередь, оказывает влияние на тензомост и вызывает относительное изменение сопротивления тензорезисторов $\Delta R/R$, которое далее через измерительную цепь преобразуется в выходное напряжение $U_{\text{вых}}$.



Рис. 1– Структурная схема интегрального тензорезистивного ДД

Изменение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ведет, в свою очередь, к изменению начального выходного напряжения U_0 . При этом искажение информации о данном параметре растет с увеличением числа последующих преобразований. Таким образом, коэффициент усиления вторичных преобразователей получается значительным, что ведет к негативным последствиям даже при незначительных изменениях сопротивлений тензорезисторов.

Для стабилизации сопротивления тензорезисторов на поверхности тензорезистивного слоя формируют защитную пленку из нитрида кремния толщиной в несколько десятков нанометров. Структурная схема такого тензорезистора приведена на рис. 2. Чувствительность данного тензорезистора рассчитывается как относительное изменение величины сопротивления при изменении величины падения напряжения ΔU_0 на контактных площадках. Использование тензорезисторов на основе карбида кремния позволяет повысить, почти на порядок, чувствительность других сплавов. При этом полученные линейная зависимость начального выходного сигнала U_0 от давления p и зависимость изменения начального выходного сигнала U_0 от изменения температуры показали при нагревании и охлаждении высокую стабильность выходного сигнала.

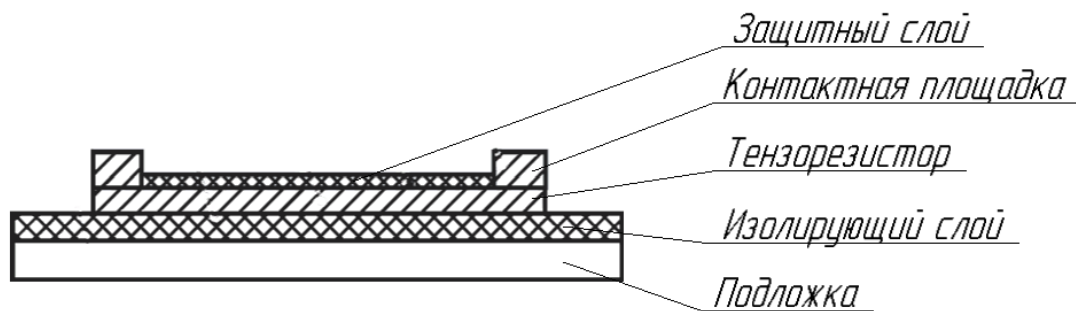


Рис. 2– Структурная схема термостабильных тонкопленочных тензорезисторов

С учетом перспективности малогабаритных ДД, преобразующих изменение давления в электрический сигнал, интерес представляет разработка интегральных ЧЭ преобразователя давления с температурным датчиком, который сформирован в кремниевой мембране, имеющей утолщенную, утоненную части и жесткий центр. Преимущество такого интегрального ЧЭ заключается в возможности измерения параметра температуры непосредственно в объеме ЧЭ, что позволяет осуществить компенсацию влияния температуры на выходной сигнал за счет внешней схемы термокомпенсации. На рис. 3 приведена структурная схема р-п переходов такого ЧЭ.

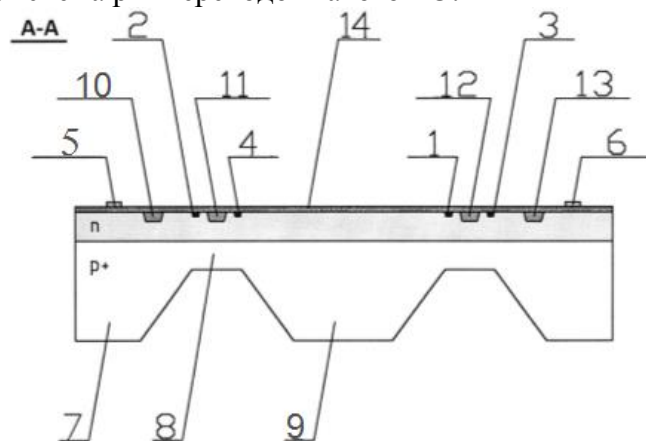


Рис. 3– Структурная схема р-п переходов ЧЭ интегрального ДД (1-4– четыре тензорезистора; 5,6 – Al шины; 7 – утолщенная часть мембраны; 8 – утоненная часть мембраны; 9 – жесткий центр мембраны; 10-13– токоведущие области; 14 – слой изоляции из диоксида кремния)

Таким образом, в работе проведен анализ принципов работы и основных причин нестабильности выходного сигнала интегральных ДД. Указаны возможные пути стабилизации выходного напряжения и уменьшения коэффициента усиления при увеличении числа последующих преобразователей.

Список литературы

1. Волохов И.В. Исследование свойств высокочувствительных термостабильных тонкопленочных тензорезисторов для интегральных датчиков давления // И.В. Волохов, С.А. Гурин, И.Р. Вергазов. – М.: Измерительная техника. – 2016. – № 1. – С. 55-60.
2. Tkalic V.L., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Kalinkina M.E., Kozlov A.S. Analysis of errors in micromechanical devices//14th International scientific- technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE-2018): Proceedings, IET - 2018, Vol. 1, No. 6, pp. 272-276
3. Kalinkina M.E., Kozlov A.S., Labkovskaya R.Y., Pirozhnikova O.I., Tkalic V.L. Analysis and design of pressure sensors for micromechanical integrated pressure sensors//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IET - 2018, Vol. 450, No. 3, pp. 032004
4. Баринов И.А. Полупроводниковые тензочувствительные элементы датчиков давлений. – М.: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. – 188 с.

05.11.00

**С.С. Капитонов канд. техн. наук, С.Ю. Прытков канд. техн. наук,
С.Ю. Григорович, А.В. Капитонова, С.А. Медведев, Н.П. Слугина**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет
им. Н. П. Огарёва,
кафедра электроники и наноэлектроники,
Саранск, kapss88@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье проведено исследование изменения спектра излучения и цветовой температуры партии светодиодных светильников, выпускаемых отечественными предприятиями, в различных электрических режимах их эксплуатации. Представлены результаты измерения спектра излучения и цветовой температуры светильников в процессе их эксплуатации на протяжении двух тысяч часов в номинальном режиме работ, в режиме токовой перегрузки и в режимах с различными значениями коэффициента пульсации питающего тока. Сделаны выводы о влиянии электрического режима работы светодиодного светильника на спектр его излучения и величину цветовой температуры. Результаты исследования будут полезны как производителям светодиодной техники, так и её потребителям.

Ключевые слова: светодиодный светильник, электрический режим эксплуатации, питающий ток, спектр излучения, цветовой температура.

С 1 сентября 2017 года вступил в действие стандарт Ассоциации производителей светодиодов и систем на их основе СТО.69159079-01-2017 «Светильники светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам» [1]. Согласно стандарту одним из нормируемых колориметрических параметров осветительного прибора является цветовая температура, которая рассчитывается на основе известного спектра излучения. Допуск на величину цветовой температуры должен составлять не более ± 300 К от номинального значения, заявляемого производителем. Представляет интерес рассмотреть вопрос вариации величины цветовой температуры светодиодных светильников в процессе их эксплуатации. В статье проведено исследование изменения спектра излучения и цветовой температуры партии светодиодных светильников Cap Linear – 08, выпускаемых предприятием ООО «НЕПЕС РУС» (г. Саранск), и ДПО52-20-002, которые производятся на предприятии ОАО «АСТЗ» (г. Ардатов), в различных электрических режимах их эксплуатации [2, 3].

Для измерения применялась установка фотоколориметрическая измерительная (свидетельство об утверждении типа средств измерений RU.E.37.003.A NG 64752). Установка предназначена для измерения светового потока; коррелированной цветовой температуры; координат цветности в системах XYZ (1931), uv (1960), u'v' (1976).

Для исследования выбраны следующие режимы работы светильников [4]:

1) номинальный режим работы, когда величина тока, протекающего через светодиоды светильника, равна номинальному значению 350 мА (Cap Linear – 08) и 260 мА (ДПО52-20-002), заявленному производителем, а значение коэффициента пульсации тока не превышает 1%;

2) режим токовой перегрузки, когда величина тока, протекающего через светодиоды, превышает номинальное значение и составляет 390 мА (Cap Linear – 08) и 350 мА (ДПО52-20-002), а значение коэффициента пульсации тока не превышает 1%;

3) режим, в котором величина тока, протекающего через светодиоды светильника, равна номинальному значению, а значение коэффициента пульсации тока составляет 10%;

4) режим, в котором величина тока, протекающего через светодиоды светильника, равна номинальному значению, а значение коэффициента пульсации тока составляет 40%.

В соответствии с паспортными данными величина цветовой температуры светильника Cap Linear – 08 составляет 3000 К, потребляемая мощность равна 24 Вт. Данные светильники реализованы на основе светодиодов с удалённым люминофором. На рис. 1 представлены результаты измерения значений цветовой температуры светильников в начале наблюдения и через две тысячи часов их эксплуатации.

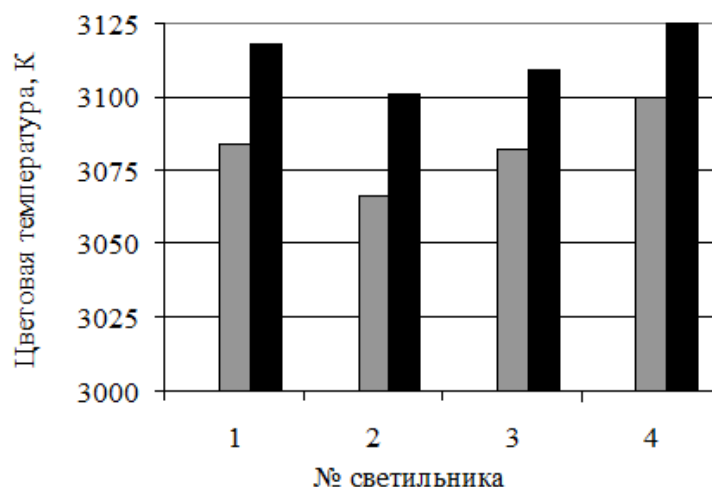


Рис. 1– Значения цветовой температуры светильников Cap Linear – 08 в начале наблюдения (серым цветом) и через две тысячи часов их эксплуатации (чёрным цветом)

Из рис. 1 заметно, что в процессе эксплуатации светильников Cap Linear – 08 на протяжении двух тысяч часов в различных электрических режимах их эксплуатации максимальное увеличение значения цветовой температуры в 35 К наблюдается в режиме токовой перегрузки (светильник №2).

На рис. 2 изображены спектры излучения испытуемых светильников в различных электрических режимах их эксплуатации в начале наблюдения и после двух тысяч часов эксплуатации.

Из рис. 2 видно, что в процессе эксплуатации светильников в течение двух тысяч часов максимальное уменьшение спектральной плотности энергетического потока, соответствующей длине волны 600 нм, составило 3 мВт/нм (светильник №2). С данным изменением спектра излучения светильников связано увеличение величин цветовой температуры испытуемых светильников (рис. 1).

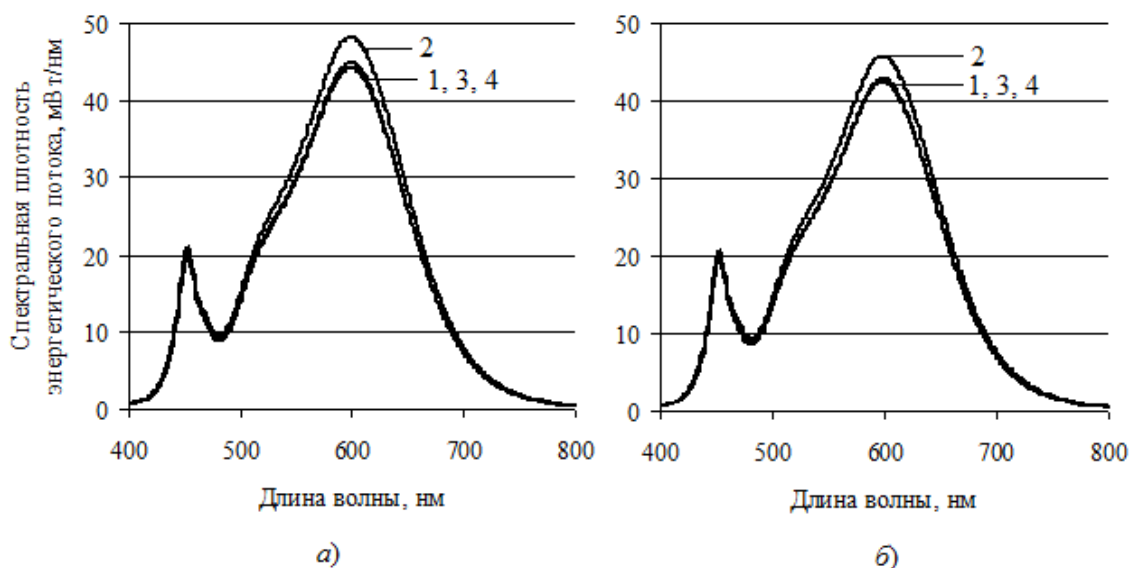


Рис. 2 – Спектры излучения светильников Cap Linear – 08 в различных электрических режимах их эксплуатации в начале наблюдения (а) и после двух тысяч часов эксплуатации (б)

На рис. 3 представлены результаты измерения значений цветовой температуры светильников ДПО52-20-002 в начале наблюдения и через две тысячи часов их эксплуатации.

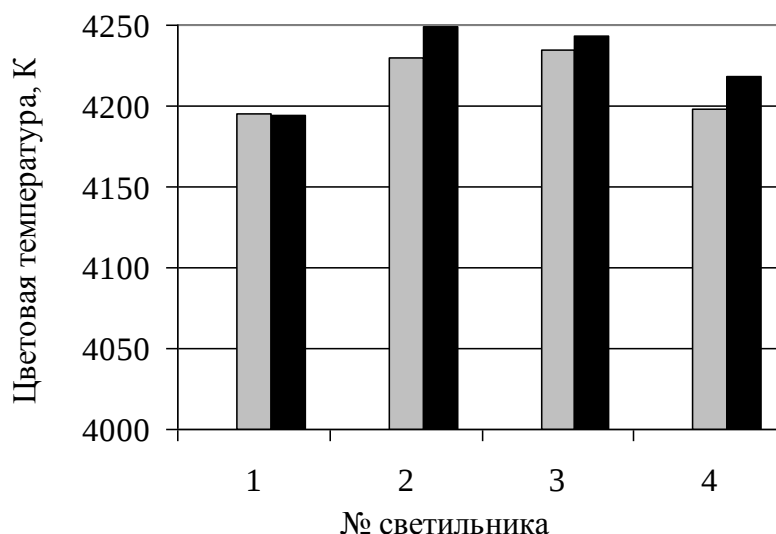


Рис. 3– Значения цветовой температуры светильников ДПО52-20-002 в начале наблюдения (серым цветом) и через две тысячи часов их эксплуатации (чёрным цветом)

На рис. 3 можно заметить, что в процессе эксплуатации светильников ДПО52-20-002 на протяжении двух тысяч часов в различных электрических режимах их эксплуатации максимальное увеличение значения цветовой температуры в 20 К наблюдается в режиме токовой перегрузки (светильник №2) и в режиме, когда значение коэффициента пульсации тока составляет 40% (светильник №4).

На рис. 4 представлены спектры светильников ДПО52-20-002 в вышеописанных электрических режимах их эксплуатации в начале наблюдения и после двух тысяч часов эксплуатации.

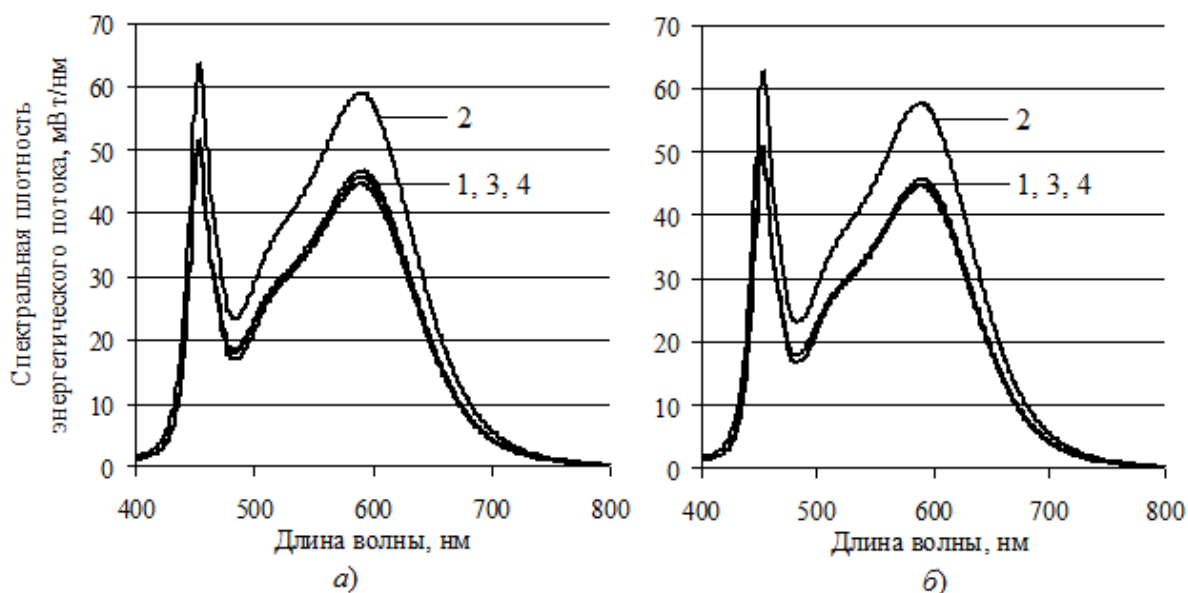


Рис. 4– Спектры излучения светильников ДПО52-20-002 в различных электрических режимах их эксплуатации в начале наблюдения (а) и после двух тысяч часов эксплуатации (б)

На основе информации, представленной на рис. 4, можно сделать вывод о том, что в процессе эксплуатации светильников в течение двух тысяч часов произошло несущественное уменьшение спектральной плотности энергетического потока, соответствующей длине волны 600 нм. Максимальное изменение спектральной плотности энергетического потока

зафиксировано у светильника №2 и составило 2 мВт/нм. Снижение спектральной плотности энергетического потока в области длин волн, соответствующих спектральному максимуму 600 нм, привело к повышению значений цветовой температуры светильников (рис. 3).

Результаты проведённого исследования показали, что в процессе эксплуатации происходит изменение спектра излучения светодиодных светильников и значений их цветовой температуры. В ходе наблюдения за светильниками на протяжении двух тысяч часов работы было выявлено уменьшение спектральной плотности энергетического потока в области спектрального максимума, соответствующего длине волны 600 нм, что привело к повышению величины цветовой температуры. Наибольшие изменения зафиксированы у светильников, работающих в режиме токовой перегрузки. Таким образом, за время проведения испытания у исследуемых светильников не был превышен допуск на величину цветовой температуры ± 300 К, установленный стандартом [1]. Однако, наблюдается тенденция изменения величины цветовой температуры в процессе эксплуатации светильников, что подтверждает необходимость проведения дальнейшего исследования в течение заявленного производителем срока эксплуатации приборов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00347.

Список литературы

1. СТО.69159079-01-2017 «Светильники светодиодные. Требования к техническим и эксплуатационным параметрам».
2. Беспалов Н.Н. Исследование процессов в светильнике со светодиодами при вариации температурного коэффициента напряжения отдельных светодиодов / Н. Н. Беспалов, С. С. Капитонов, А. В. Капитонова // Светотехника, 2016. № 2. С. 4–6.
3. Беспалов Н.Н. Оборудование для испытаний управляющих устройств для светильников со светодиодами и ЭПРА для люминесцентных ламп / Н. Н. Беспалов, М. В. Ильин, С. С. Капитонов // Светотехника, 2017. № 4. С. 42–46.
4. Капитонов С.С. Исследование электрических и тепловых режимов работы светодиодов в светильнике / С. С. Капитонов, А. В. Капитонова // Светотехника, 2018. № 1. С. 77-78.

05.11.01

Ю.И. Шакиров, Р.Г. Садыков, А.А. Хафизов, Р.И. Валиев

Набережночелнинский институт (филиал)
Казанского (Приволжского) федерального университета,
отделение информационных технологий и энергетических систем,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Набережные Челны, Sadykovrenat1982@mail.ru

РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Работа посвящена анализу схемных решений систем электроснабжения действующих нефтепромыслов. Результаты анализа режимов электропотребления показали, что с ростом электрических нагрузок нефтепромыслов отклонения напряжения в узлах нагрузки выходят за нормально допустимые пределы, что вызывает необходимость совершенствования управления режимами напряжения электрических сетей. Установлены закономерности, позволяющие сделать выводы, способствующие эффективности регулирования напряжения в системах электроснабжения нефтепромыслов.

Ключевые слова: *система электроснабжения, потери электроэнергии, надежность, подстанция.*

Введение

Объекты нефтегазовых промыслов являются крупными потребителями энергии, на долю которых приходится до 50% общего объема потребления электроэнергии в отрасли. Особенностью систем электроснабжения нефтегазовых промыслов является рассредоточенность приемников электроэнергии на достаточно больших площадях [1,2].

Вместе с большой энергоемкостью потребителей, это определяет особенности схемных решений электроснабжения, наличие многоуровневой трансформации энергии, значительный уровень потерь электроэнергии в системе электроснабжения.

В большей степени снижению потерь электроэнергии будет способствовать выбор рациональных режимов систем электроснабжения в целом, которые могут существенно сократить потери электроэнергии в электрических сетях [3,4].

Целью работы является повышение энергетической эффективности электроустановок механизированной добычи нефти с погружными насосами и систем электроснабжения нефтепромыслов за счет совершенствования управления режимами напряжения электрических сетей.

В результате анализа схемных решений систем электроснабжения действующих нефтепромыслов предложены типовые схемы, результаты анализа режимов электропотребления которых, показали, что с ростом электрических нагрузок нефтепромыслов отклонения напряжения в узлах нагрузки выходят за нормально допустимые пределы, что вызывает необходимость совершенствования управления режимами напряжения электрических сетей [5].

Составили схему электроснабжения подстанции для расчёта надёжности (рис.1).

При нашем методе расчётов основными показателями надёжности элементов системы электроснабжения являются:

- средний параметр потока отказов элемента $\omega_a (1/\text{год})$;
- средняя частота отключения элемента для профилактического ремонта $\omega_p (1/\text{год})$;
- среднее время восстановления элемента – Т (год);
- средняя продолжительность нахождения элемента в профилактическом ремонте – $\tau_p(\text{год})$;

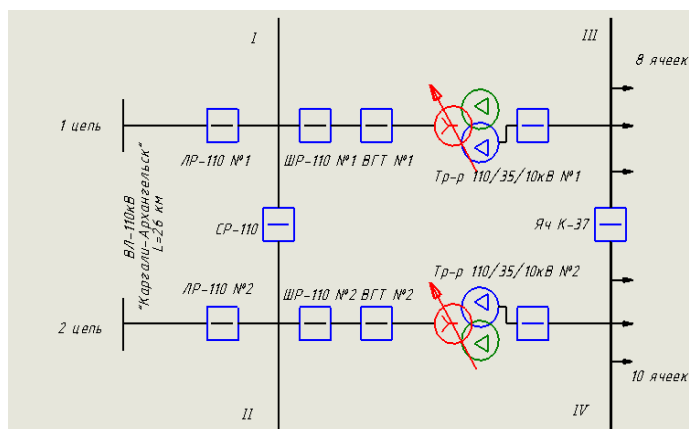


Рис. 1- Схема электроснабжения подстанции для расчёта надёжности

При расчётах надёжности, выполняемых для действующих предприятий, рекомендуется использовать показатели надёжности, определяемые путём сбора и обработки информации об отказах систем электроснабжения (СЭС) данного предприятия. Для предприятий, у которых такая информация отсутствует или собрана за небольшой период соблюдения, возможно использование усреднённых показателей надёжности по предприятиям этой отрасли промышленности [6].

При расчёте нашей системы использовали следующие обозначения:

m – число отходящих присоединений секций;

$T_{руч}$ – средняя длительность неавтоматических (ручных оперативных переключений для подачи напряжения от резервного источника питания.

В соответствии со схемой электроснабжения (рис.1) составляется блок-схема расчёта надёжности (рис.2). Произвели свёртывание блок-схемы (рис.3)

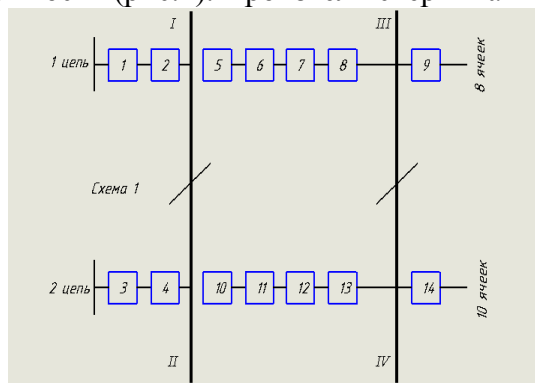


Рис. 2- Блок-схема подстанции для расчёта надёжности

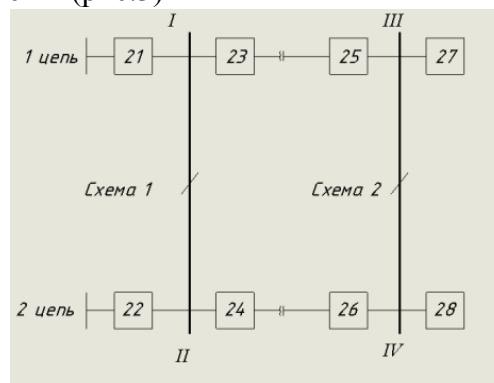


Рис. 3- Расчётная схема подстанции для расчёта надёжности

Элементы 2 (4) не включены в ремонтируемые группы, так как профилактическое обслуживание разъединителей проводится совместно с ремонтом воздушных линий.

Определили числовые показатели надёжности 1-го расчётного участка, включающего шины ГПП (схема 1 на рис. 3). Этому участку соответствует ТРС с двумя секциями шин и взаимным ручным резервированием. Определили показатели полных отключений, индивидуальные показатели частичных отключений.

Произвели 2-й этап свёртывания блок-схемы путём объединения последовательных элементов на схеме 2 (рис.3). Как и на схеме 1, питающие линии состоят из однотипных элементов с равными числовыми характеристиками надёжности. Показатели аварийных отключений элементов 25 и 26 определяются с учётом того, что источник питания характеризуется индивидуальными показателями надёжности шин ГПП.

Элемент 5 (9) - разъединитель 110 кВ в ремонтируемые группы не включен, так как его профилактическое обслуживание проводится одновременно с ремонтом ВЛ-110 кВ.

Определили показатели надёжности 2-го расчётного участка (схема 2 рис.3). Этому участку соответствует ТРС с двумя секциями шин и взаимным неавтоматическим резервированием.

Оценили также вероятность безотказной работы в течение года P_0 и средний коэффициент простоя $K_{\text{пр}}$. Все полученные при расчётах показатели собрали в сводную таблицу 1.

Попытались улучшить показатели надёжности сети, сделать это можно путём замены наиболее слабых элементов (имеющих наибольший параметр потока отказов ω_a) [7]. Самой реальной и малозатратной модернизацией является замена ячейки К-37 на установку АВР, которая обеспечивает беспростойное переключение шин III и IV. После условной установки АВР рассчитаем надёжность сети заново таким же методом. Результаты расчёта приведены в таблице 2.

Таблица 1 - Показатели надёжности электроснабжения подстанции до установки АВР

Разновидности нарушения электроснабжения	Числовой показатель надёжности			
	Средняя частота отказов (1/год)	Среднее время восстановления (час)	Вероятность безотказной работы за год	Коэффициент простоя
Отключения секции III при сохранении питания секции IV	0,441	2,689	0,643	$0,135 \cdot 10^{-3}$
Отключения секции IV при сохранении питания секции III	0,443	2,691	0,642	$0,136 \cdot 10^{-3}$
Отключение одной из секций (III или IV) при сохранении питания другой	0,884	2,690	0,413	$0,271 \cdot 10^{-3}$
Отключения секции III вне зависимости от сохранения питания секции IV	0,447	1,904	0,640	$0,097 \cdot 10^{-3}$
Отключения секции IV вне зависимости от сохранения питания секции III	0,447	1,904	0,640	$0,097 \cdot 10^{-3}$
Отключения III или IV секций одновременно	0,00368	5,589	0,996	$0,002 \cdot 10^{-3}$
Любое нарушение ЭС (отключение секций III или IV или обеих вместе)	0,888	3,046	0,411	$0,309 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Показатели надёжности электроснабжения подстанции после установки АВР

Разновидности нарушения электроснабжения	Числовой показатель надёжности			
	Средняя частота отказов (1/год)	Среднее время восстановления (час)	Вероятность безотказной работы за год	Коэффициент простоя
Отключения секции III при сохранении питания секции IV	0,139	1,927	0,870	$0,306 \cdot 10^{-4}$
Отключения секции IV при сохранении питания секции III	0,141	1,840	0,868	$0,296 \cdot 10^{-4}$
Отключение одной из секций (III или IV) при сохранении питания другой	0,280	1,840	0,756	$0,588 \cdot 10^{-4}$

Отключения секции III вне зависимости от сохранения питания секции IV	0,155	2,015	0,856	$0,357 \cdot 10^{-4}$
Отключения секции IV вне зависимости от сохранения питания секции III	0,157	2,015	0,855	$0,361 \cdot 10^{-4}$
Отключения III или IV секций одновременно	0,016	3,211	0,984	$0,059 \cdot 10^{-4}$
Любое нарушение ЭС (отключение секций III или IV или обеих вместе)	0,296	1,927	0,744	$0,651 \cdot 10^{-4}$

Выбирали самый наихудший вариант, т.е. любое нарушение ЭС (отключение секций III или IV или обеих вместе. Рассчитываем разницу в среднем времени восстановления:

$$\Delta T = T - T_{\text{авр}} = 3,046 - 1,927 = 1,119 \text{ час};$$

Срок окупаемости установки АВР составляет в среднем 3 года – очень хороший показатель даже при самых скромных расчётах.

Вывод

Установлены закономерности, позволяющие сделать выводы, способствующие эффективности регулирования напряжения в системах электроснабжения нефтепромыслов:

- при системном регулировании напряжения в распределительной сети 35 кВ нефтепромыслов при наличии трансформаторов 35/6 кВ с переключением без возбуждения (ПБВ) целесообразно ограничиться поддержанием максимально допустимого напряжения на шинах РУ-6, то есть реализовать закон постоянного независимого от нагрузки напряжения;
- допустимые значения потерь энергии в электрических сетях нефтепромыслов не должен превышать 11% от потребления энергии, а рациональный диапазон баланса переменных и постоянных потерь должен составлять 0,75 - 1,25;
- повышенное в допустимых пределах напряжение на шинах 6 кВ ПС приводит к увеличению времени динамической устойчивости промышленных электротехнических систем.

Список литературы

1. Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Сабиров А.А., Каиштанов В.С., Пекин С.С. Скважинные насосные установки для добычи нефти. М.: ГУП Изд-во «Нефть и газ», 2002. - 824 с.
2. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 2000. - 487 с.
3. Карташов И.И., Тульский В.Н., Шаманов Р.Г. и др. Управление качеством электроэнергии/ под ред. Ю.В. Шарова. М.: М.: Издательский дом МЭИ, 2006. -320 с.
4. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов/ Ю.С. Железко. М.: ЭНАС.-456 с.
5. Меньшов Б.Г., Доброжанов В.И., Ершов М.С. Теоретические основы управления электропотреблением промышленных предприятий. М.: Издательство «Нефть и газ», 1995. -264 с.
6. Лыкин А.В. Электрические системы и сети. М.: Логос, 2008. - 254 с.
7. Ершов М.С., Егоров А.В., Трифонов А.А. Некоторые итоги исследования устойчивости промышленных электротехнических систем. Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2009, №3 (256).

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ (05.13.00)

05.13.00

А.В. Алабин, М.А. Свищева

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
институт гидротехнического и энергетического строительства,
кафедра строительства объектов тепловой и атомной энергетики,
Москва, AlabinAV@mgsu.ru, m.a.svishcheva@gmail.com

ПРЕИМУЩЕСТВА СОЗДАНИЯ ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ, МОДЕРНИЗАЦИИ И ДЕМОНТАЖА ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM ТЕХНОЛОГИЙ

В данной работе были проанализированы проекты реконструкции и модернизации строительных объектов, при создании которых применялись современные технологии информационного моделирования, с соответствующей оценкой эффективности применяемых технологий. Описаны преимущества использования современных информационных технологий проектирования строительных объектов. Основной задачей при реконструкции определена подготовка достоверной информации о строительном объекте реконструкции в короткие сроки. Рассмотрены различные методы получения информации об объекте реконструкции или модернизации. Сделан вывод о необходимости интеграции модулей подготовки информации о текущем состоянии строительного объекта при использовании информационных систем для разработки проектов реконструкции или модернизации.

Ключевые слова: *BIM, информационная модель здания, реконструкция, модернизация, системы автоматизированного проектирования.*

Проект реконструкции или модернизации зданий и сооружений является трудоемким процессом, связанным со множеством ограничений и специфических данному виду работ требований. Проведение работ по реконструкции, считается экономически целесообразным, если предполагаемые затраты на переустройство не будут превосходить 65% от стоимости нового здания [1]. Наиболее актуальной проблемой для данного вида проекта является получение достоверной информации о состоянии объекта реконструкции на момент начала проектной стадии работ. Согласно статистике, полученной исходя из опыта строительных компаний, реализация работ по строительному объекту с использованием информационной модели позволяет сэкономить около 50-70% времени на этапе проектирования и на 80-90% снизить вероятность возникновения ошибок на этапе строительства/реконструкции, так как программное обеспечение контролирует появление коллизий в модели [2].

Исходя из вышеуказанного, посредством внедрения информационной модели реконструируемого здания за счет экономии времени и уменьшения вероятности ошибки снижаются материальные затраты на проектном этапе и этапе строительных работ, что повышает рентабельность проведения реконструкции выбранного объекта.

На сегодняшний день наиболее инновационным способом создания строительного проекта является технология BIM-моделирования (Building Information Model). Информационная BIM-модель здания – это набор графической и текстовой информации о проектируемом или уже существующем строительном объекте, управляемая при помощи компьютерной программы [3]. Как и для любой модели здесь применимо понятие детализации, которое зависит от многих факторов, но главным образом от сложности конструктивной части строительного объекта, целей будущей эксплуатации сооружения и требований заказчика.

На каждой стадии проектирования строительного объекта с помощью BIM технологии мы имеем информационную базу данных, которая отражает объем обработанной на данный момент информации о здании. Изначально технология BIM возникла и применялась в проектной сфере, однако, благодаря большому потенциалу она перешагнула через установленные для нее рамки и получила широкое применение при создании строительных и инженерных объектов. Таким образом, информационное BIM-моделирование зданий обладает более широким инструментарием, чем просто расчет конструкций и удобная 3D-визуализация [4].

Современный подход к проектированию, возведению и оснащению подразумевает использование максимальных возможностей информационных систем не только на этапе проектирования, но и на протяжении всего жизненного цикла здания.

Использование BIM технологий, конечно, существенно упрощает задачу по реконструкции строительных объектов, однако стоит учитывать тот факт, что из-за новизны данного метода существует не так много объектов, чей жизненный цикл вплотную подошел к стадии реконструкции. Соответственно, в подавляющем большинстве случаев исходная информация о существующем объекте представлена в виде классической проектной и рабочей документации на бумажном или электронном носителе. Зачастую такая информация является неполной и в таком случае для создания проекта реконструкции производится сбор недостающей информации.

Существуют несколько способов сбора необходимой информации об объекте реконструкции. Самый распространённый – это проведение архитектурных обмеров.

В виду ограниченности, трудоемкости и высокой длительности ручного обмера здания были созданы автоматизированные технологии, которые позволяют осуществить процесс съемки сооружения многократно быстрее и точнее.

Рассмотрим наиболее зарекомендовавшие себя на данный момент методы создания модели реконструируемого здания или сооружения.

Метод фотограмметрии.

Технология трехмерной фотограмметрии осуществляется за счет многократной фотосъемки интересующего объекта и программного обеспечения для обработки результатов после проведения съемки.

Для каждой снятой фотографии в базу данных вносится информация о: высоте, угле поворота камеры, а также данные долготы и широты. Координаты каждой точки съемки вычисляются методом триангуляции, то есть от каждой i -ой точки съемки к следующей автоматически проводится линия зрения, а их пересечение дает искомое значение (рис. 1) [5].

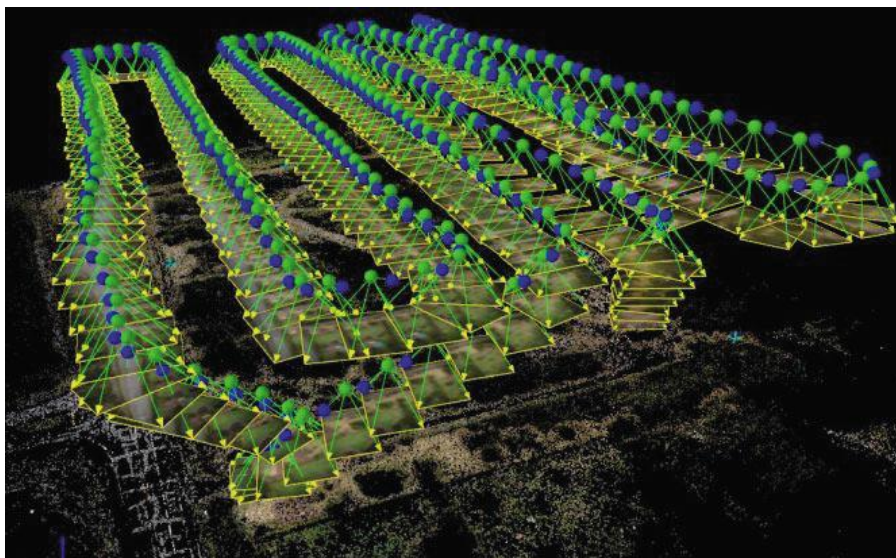


Рис. 1- Определение координат ключевых точек по методу триангуляции

При постобработке программное обеспечение находит общие точки на многих фотографиях, то есть каждому пикселю на одной фотографии определяется цветовое соответствие на всем множестве смежных фотографий. При нахождении совпадений более, чем на трех фотографиях, программа производит ее построение в пространстве модели. Соответственно, чем больше совпадений определяет программное обеспечение, тем точнее будет построение итоговой модели.

Перейдем непосредственно к программному обеспечению, наиболее часто используемому для создания цифровых моделей по методу фотограмметрии. Для проведения съемок отдельных сооружений, как снаружи, так и изнутри на рынке хорошо зарекомендовали себя такие программы, как Pix4Dmapper (разработанная в Швейцарии) и ContexCapture (продукт французской фирмы Acute3D, затем поглощённой компанией Bentley Systems). ContexCapture позволяет непосредственно в одной программе генерировать не только объемное облако точек, а трехмерный массив, обладает со свойствами геометрической модели. На отечественном рынке наиболее ярким представителем является PhotoScan от Agisoft, однако по сравнению с зарубежными аналогами данная программа отстает по уровню функционального обеспечения и производительности программы [5].

Отдельно следует выделить, что при проведении реконструкции и модернизации оборудования или инженерных сетей непосредственно на открытой строительной площадке с существующей застройкой существует способ съемки при помощи квадрокоптера, качественного съемочного оборудования на его базе и программного обеспечения для обработки результатов после проведения съемки. Данный способ наиболее эффективен для съемки больших открытых площадей, так как позволяет получить целостную картину объекта (рис. 2).

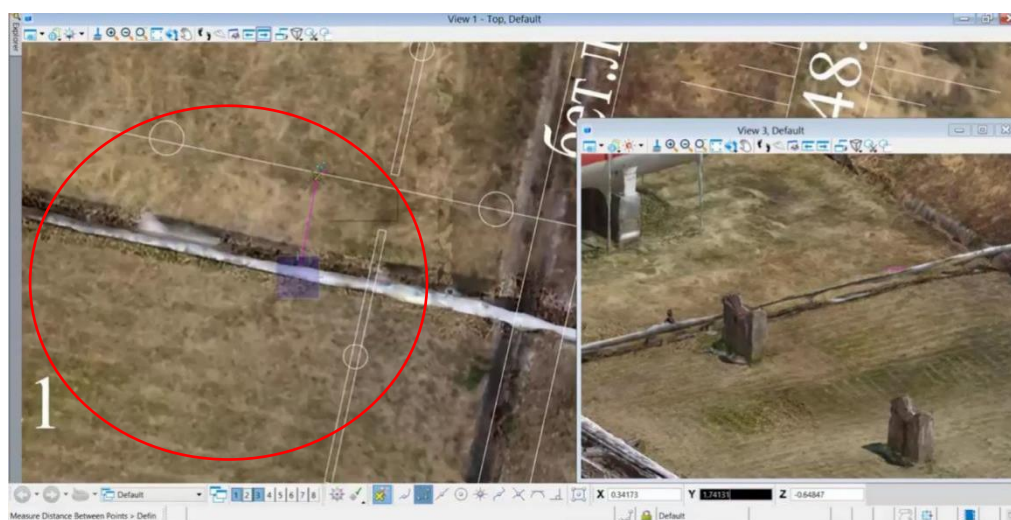


Рис. 2- Пример несоответствия положения оси проложенного трубопровода с проектным

При создании проекта реконструкции или модернизации BIM-модель используется не только для наглядного отображения текущего состояния объекта, но также и для создания гибридных моделей [6]. Для этого в модель существующего здания или сооружения добавляют модели запланированных по проекту объектов. Для такого рода работ используют программное обеспечение Bentley Open Plant или аналогичное ему. Таким образом можно выполнить автоматизированный поиск коллизий и даже смоделировать процесс демонтажа старого оборудования и монтажа нового (рис. 3) [7].

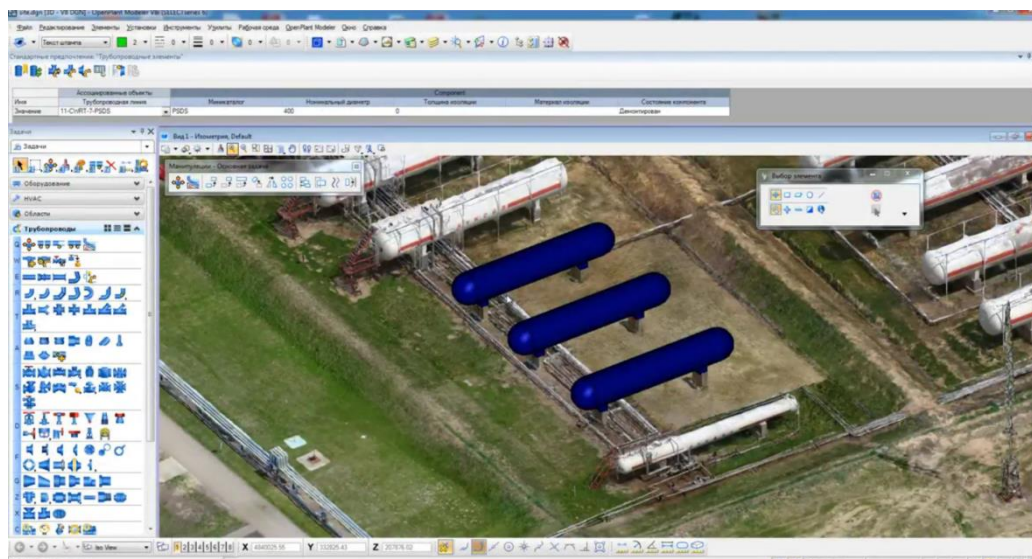


Рис. 3- Гибридная модель в программе Bentley Open Plant. Вид в натуру

Метод лазерного сканирования

Вторым наиболее распространенным способом является метод лазерного сканирования. Наиболее часто он применяется для съемки внутреннего пространства здания или сооружения, однако его возможности полностью пригодны для проведения измерений наружной части строительных объектов.

Метод лазерного сканирования осуществляется за счет соответствующего оборудования с последующим созданием облака отснятых точек. После съемки полученные данные проходят процесс консолидации, регистрации, экспорта и, в конечном итоге, преобразования в информационную модель. Для работы с облаком точек применяется то же программное обеспечение, что и в случае использования метода фотограмметрии.

Достоинством данного метода съемки является его мобильность и возможность съемки в местах недоступных для ручного измерения. Уровень итоговой детализации зависит от качества оборудования и его настроек, которые определяют не только конечное число отснятых точек, но и их плотность и цветность [8], [9].

Зачастую, для создания проекта реконструкции модель здания или сооружения, полученную при съемке, наделяют свойствами BIM-модели только на некоторых участках, оставляя неизменяемые части в виде облака точек (рис. 4). За счет этого можно сократить срок проектной стадии, но все еще с высокой точностью определить наличие коллизии при осуществлении будущих монтажно-демонтажных работ, так как современное программное обеспечение различает столкновение не только с целостно смоделированными объектами, но и с каждой отдельно снятой точкой всего массива облака [7].



Рис. 4- Облако точек реконструируемого участка и его гибридная модель

Проанализировав современные тенденции создания проектов по реконструкции и модернизации объектов строительства, можно сделать следующие выводы:

1) технология BIM моделирования, а также совмещение автоматической съемки существующих зданий и сооружений и постобработки модели в BIM ПО значительно сокращают сроки подготовки выпуска и согласования документации, за счет создания единой информационной среды разработки и обмена информацией;

2) возрастает производительность труда в результате автоматизации проектирования и большей части вычислительных процессов;

3) точность исходных измерений и процесс поиска коллизий в имитационной модели здания позволяют выявить и исправить возможные ошибки на стадии подготовки проектной документации.

Также данная технология помимо выполнения прямых задач, необходимых для создания проекта реконструкции зданий или сооружений, обладает рядом дополнительных возможностей, позволяющих развивать технологию имитационной модели, что позволит экономически оправдать реконструкцию технически сложных и уникальных зданий и сооружений. Стоит, однако, выделить и закономерную пропорциональность между архитектурной и конструктивной сложностью реконструируемого объекта и целесообразностью использования описанной выше технологии.

Список литературы

1. Чеченина И.В. Разработка стратегии и концептуальных положений перспективной инновационной и инвестиционной политики жкх / Наука и образование в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам Международной науч. практ. конф. 2013. С. 145-146.
2. Козлов Н.А., Попова К.А. Проблемы внедрения технологий BIM проектирования в России / Козлов Н.А., Попова К.А. // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2016. – № 1 (15). – С 18-21
3. Таланов В. BIM: что под этим обычно понимают. Второе издание. 2014, http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17298 (дата обращения 01.12.2018).
4. Becerik-Gerber B, Jazizadeh F, Li N, Calis G. Application areas and data requirements for BIM-enabled facilities management. - Journal of Construction Engineering and Management, 2012, № 138, pp. 431–42.
5. Завтур А., Гришина Н., Чалый Юрий. Трехмерная фотограмметрия, или от фотографии к 3D-модели. 2016, <http://sapr.ru/article/25136> (дата обращения 01.12.2018).
6. Былкин Б.К., Чуйко Д.В., Тихоновский В.Л. Интерактивная трехмерная модель как инструмент обеспечения радиационной безопасности персонала при выполнении демонтажных работ. 2017. <http://www.atomic-energy.ru/science/76230> (дата обращения 01.12.2018).
7. Майсер М., Найденов С. BIM. Реконструкция промышленного объекта с применением передовых технологий Bentley – фотограмметрии. 2017г. Веб-семинар. https://pages.info.bentley.com/event-details-ae/?Webinar=CO_WBNRB_CC%D0%A1_171117&eventGUID=dea0ce13-d860-4300-b3df-e89b825f7308&SKID=CT_BNR_WEBINAR_RU_ISICAD (дата обращения 01.12.2018).
8. Аникушкин М., Белецкий Е., Окунькова Е., Серков С., Смирнов С. Лазерное сканирование и 3D моделирование для восстановления информационной модели Ростовской АЭС. 2014. http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=17243 (дата обращения 02.12.2018).
9. Filip Biljecki, Hugo Ledoux, Jantien Stoter. An improved LOD specification for 3D building models. 2016, с 7-10.

05.13.00

¹Д.А. Безуглов д-р техн. наук, ²В.В. Воронин канд. техн. наук,
³С.Е. Мищенко д-р техн. наук, ⁴В.И. Юхнов канд. техн. наук

¹Ростовский филиал Российской таможенной академии, ректорат,

²Донской государственный технический университет,
научно-исследовательская лаборатория «Математические методы обработки изображений
и интеллектуальные системы компьютерного зрения»,

³Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи,

⁴Северо-кавказский филиал Московского технического университета связи и информатики,
кафедра инфокоммуникационных технологий и систем связи,
Ростов-на-Дону, bezuglovda@mail.ru

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ НА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ

В работе рассмотрен новый алгоритм выделения контуров на телевизионных изображениях, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации. Проведен анализ известных алгоритмов, показаны их недостатки, заключающиеся в чувствительности к различным помехам, в том числе и импульсным, а также связанные с обнаружением многочисленных ложных замкнутых кривых. Приведены аналитические выражения для вычисления модуля градиента яркости с использованием нормализованных параболических сплайнов. Даны рекомендации по выбору коэффициента сглаживания.

Ключевые слова: *выделение контуров, сплайн-аппроксимация, модуль градиента яркости.*

Большинство известных способов выделения контуров на цифровых полутоновых изображениях основаны на вычислении модуля градиента на всей площади цифрового изображения по приближениям первой производной - локальным конечным разностям яркости. При этом приближенные компоненты градиента вычисляют с использованием скользящего окна (маски), перемещающегося по всему изображению. При этом яркости пикселей изображения, попадающих в скользящее окно, перемножают на коэффициенты маски, а затем суммируют [1, 2, 3, 4]

В настоящее время известно несколько типов масок: Робертса, Превитта, Собеля, Щарра и др. Маска Робертса является наиболее простой, поскольку имеет размер 2×2 пикселя. Маски Превитта, Собеля и Щарра имеют размерность 3×3 пикселя и отличаются значениями коэффициентов. Следует отметить, что подобные маски вычисления компонент градиента яркости при помощи конечных разностей используются в составе более сложных алгоритмов выделения контуров. Недостатками данных алгоритмов выделения контуров изображений на основе применения скользящих окон и определения компонент градиента яркости при помощи конечных разностей является их достаточно сильная чувствительность к помехам, относящимся к классу импульсных, возникающих вследствие многих явлений при цифровом преобразовании и передаче изображений.

К другим способам выделения контуров объектов на изображениях относятся способы, основанные на вычислении приближений вторых производных – операторы типа «лапласиан» «гауссиан», или операторы, использующие разновидности масок Лапласа. Известна также корреляционная маска, коэффициенты которой пропорциональны соответствующим коэффициентам корреляции элементов изображения. В случае, когда корреляция между элементами изображения отсутствует, маска не оказывает влияния на изображение, в противоположном случае коэффициент корреляции равен единице, данная маска сводится к маске Лапласа [3]. Данные способы благодаря пересечению нулевого уровня прямой, соединяющей разнозначные вторые производные, позволяют получить более точное положение контура, но являются более чувствительными к различным помехам, в

том числе и импульсным, чем градиентные, а также имеют недостаток, связанный с обнаружением многочисленных ложных замкнутых кривых.

Также известны способы выделения контуров объектов на изображениях, которые основаны на аппроксимации перепадов яркости и статистические способы, например, способ на основе локально-полиномиальной аппроксимации [5, 6]. Однако, недостатком таких способов и основанных на аппроксимации перепадов яркости, является чувствительность к наличию на матрице цифрового изображения импульсных помех.

Цель настоящей работы: синтез нового помехоустойчивого алгоритма выделения контуров на телевизионных изображениях, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации.

Пусть задана матрица изображения S размером $N_x \times N_y$. Тогда строке изображения может быть поставлена в соответствие некоторая функция $F_u(x \in [a, b])$. В области $x \in [a, b]$ элементы изображения можно представить в виде совокупности N_x равноотстоящих отсчетов координат x_i ($i = 0, 1, \dots, N + 1$) с шагом h , заданных так, что

$$x_0 < x_1 = a; x_N = b < x_{N+1}; x_i = x_{i-1} + h \quad (1)$$

и соответствующих им значений яркости изображения $F_i = F_u(x_i)$.

Представим элементы строки изображения в виде сплайн-аппроксимации в базисе сглаживающих кубических нормализованных В-сплайнов дефекта 1 [7]

$$F_c(x, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \sum_{i=0}^{N+1} \beta_i B_i^3(x), \quad (2)$$

где β_i – коэффициент i -го сплайна;

$$B_i^3(x) = \frac{1}{6} \left(2 + \frac{x - x_{0i}}{h} \right)^3 p_0^i + \left(\frac{2}{3} - 2 \left(\frac{x - x_{0i}}{h} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{x - x_{0i}}{h} \right)^3 \right) p_0^{i+1} + \left(\frac{2}{3} - 2 \left(\frac{x - x_{0i}}{h} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{x - x_{0i}}{h} \right)^3 \right) p_0^{i+2} + \frac{1}{6} \left(2 - \frac{x - x_{0i}}{h} \right)^3 p_0^{i+3}; \quad (3)$$

$$p_0^i = \begin{cases} 1, & x \in [x_i, x_{i+1}]; \\ 0, & x \notin [x_i, x_{i+1}]; \end{cases} \quad (4)$$

$x_{0i} = x_{i + \frac{n+1}{2}}$ – координаты середины носителя В-сплайна; n – степень сплайна.

Рассмотрим теперь участок $x \in [x_i, x_{i+1}]$ и осуществим привязку коэффициентов сплайна к середине соответствующего носителя. Тогда для этого участка, с учетом (4), выражение (5) примет вид [7]:

$$\begin{aligned}
 F_c(x, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) &= \frac{1}{6} \left(2 + \frac{x - x_{i+2}}{h} \right)^3 \beta_{i+2} + \left(\frac{2}{3} - \left(\frac{x - x_{i+1}}{h} \right)^2 - \frac{\left(\frac{x - x_{i+1}}{h} \right)^3}{2} \right) \beta_{i+1} + \\
 &+ \left(\frac{2}{3} - \left(\frac{x - x_i}{h} \right)^2 + \frac{\left(\frac{x - x_i}{h} \right)^3}{2} \right) \beta_i + \frac{1}{6} \left(2 - \frac{x - x_{i-1}}{h} \right)^3 \beta_{i-1} = \\
 &= \frac{1}{6} \left(2 + \frac{x - x_i - 2h}{h} \right)^3 \beta_{i+2} + \left(\frac{2}{3} - \left(\frac{x - x_i - h}{h} \right)^2 - \frac{\left(\frac{x - x_i - h}{h} \right)^3}{2} \right) \beta_{i+1} + \\
 &+ \left(\frac{2}{3} - \left(\frac{x - x_i}{h} \right)^2 + \frac{\left(\frac{x - x_i}{h} \right)^3}{2} \right) \beta_i + \frac{1}{6} \left(2 - \frac{x - x_i + h}{h} \right)^3 \beta_{i-1}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Введем нормализованную координату $\chi_x = \frac{x - x_i}{h}$, тогда выражение (5) можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
 F_c(\chi_x, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) &= \frac{1}{6} \chi_x^3 \beta_{i+2} + \left(\frac{2}{3} - (\chi_x - 1)^2 - \frac{(\chi_x - 1)^3}{2} \right) \beta_{i+1} + \\
 &+ \left(\frac{2}{3} - \chi_x^2 + \frac{\chi_x^3}{2} \right) \beta_i + \frac{1}{6} \chi_x^3 \beta_{i-1}.
 \end{aligned} \tag{6}$$

После несложных арифметических преобразований получим аналитическое выражение для сплайна на участке $x \in [x_i, x_{i+1}]$ в виде:

$$\begin{aligned}
 F_c(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) &= \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{1}{6} \chi_{xi}^3 (\beta_{i+2} - 3\beta_{i+1} + 3\beta_i - \beta_{i-1}) + \right. \\
 &\left. \frac{1}{2} \chi_{xi}^2 (\beta_{i+1} - 2\beta_i + \beta_{i-1}) + \frac{1}{2} \chi_{xi} (\beta_{i+1} - \beta_{i-1}) + \frac{1}{6} (\beta_{i+1} + 4\beta_i + \beta_{i-1}) \right).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Коэффициенты сплайна найдем из решения задачи минимизации функционала [8]:

$$\begin{aligned}
 J(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) &= \rho \int_a^b |F''(x, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})|^2 dx + \\
 &+ \sum_{i=0}^{N+1} (F_i - F_c(x_i, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}))^2,
 \end{aligned} \tag{8}$$

где ρ – коэффициент сглаживания; $F_c(x_i, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})$ – значение сплайна в точке x_i ; $|F''(x, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})|$ – модуль второй производной сплайна.

Коэффициент сглаживания выбирают равным величине среднеквадратического отклонения шума на изображении. В случае, если статистические характеристики шума неизвестны, то эффект сглаживания шумов наблюдается при $\rho \geq 10$.

С учетом представления сплайна в виде (7) функционал (8) можно представить в виде

$$J(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \rho \sum_{i=1}^{N-1} \int_0^1 |F''(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})|^2 d\chi_{xi} + \sum_{i=1}^N \left[F_i - \frac{1}{6}(\beta_{i+1} + 4\beta_i + \beta_{i-1}) \right]^2. \quad (9)$$

С учетом (7) $F''(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})$ представляет собой линейную функцию от χ_{xi} :

$$F''(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \frac{\partial^2}{\partial \chi_{xi}^2} F_c(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \chi_{xi}(\beta_{i+2} - 3\beta_{i+1} + 3\beta_i - \beta_{i-1}) + (\beta_{i+1} - 2\beta_i + \beta_{i-1}). \quad (10)$$

В узловых точках $\chi_{xi} = 0, 1$, откуда

$$\rho \sum_{i=1}^{N-1} \int_0^1 |F''(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1})|^2 d\chi_{xi} = \rho \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{N-1} (\beta_{i+2} - 3\beta_{i+1} + 3\beta_i - \beta_{i-1})^2 + \rho \sum_{i=1}^{N-1} (\beta_{i+2} - 3\beta_{i+1} + 3\beta_i - \beta_{i-1})(\beta_{i+1} - 2\beta_i + \beta_{i-1}) + \rho \sum_{i=1}^{N-1} (\beta_{i+1} - 2\beta_i + \beta_{i-1})^2; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^N \left[F_i - \frac{1}{6}(\beta_{i+1} + 4\beta_i + \beta_{i-1}) \right]^2 = \sum_{i=1}^N \left[F_i^2 - \frac{1}{3}F_i(\beta_{i+1} + 4\beta_i + \beta_{i-1}) + (\beta_{i+1} + 4\beta_i + \beta_{i-1})^2 \right]. \quad (12)$$

Для формирования результирующей системы уравнений относительно неизвестных коэффициентов $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}$ продифференцируем (9) по каждому элементу вектора β_i и приравняем к нулю полученное выражение. Например, первое уравнение можно записать в виде

$$\frac{\partial}{\partial \beta_0} J(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \frac{2}{3} \rho (\beta_3 - 3\beta_2 + 3\beta_1 - \beta_0) - \rho (\beta_2 - 2\beta_1 + \beta_0) + \rho (\beta_3 - 3\beta_2 + 3\beta_1 - \beta_0) + 2\rho (\beta_2 - 2\beta_1 + \beta_0) - \frac{1}{3} F_1 + 2(\beta_2 + 4\beta_1 + \beta_0) = 0. \quad (13)$$

После дифференцирования по каждому из коэффициентов β_i получим систему уравнений вида

$$\sum_{j=0}^{N+1} A_{i,j} \beta_j = c_i, \quad (14)$$

где A – квадратная симметричная матрица ранга $N+2$; c – вектор правых частей, который строится на основе входного массива F_i .

В работе [9] ненулевые элементы матрицы A были получены в виде:

$$A_{i,i} = \frac{1}{6} (1 + 12\rho, 17 + 48\rho, 14 + 84\rho, 18 + 96\rho, \dots, 18 + 96\rho, 14 + 84\rho, 17 + 48\rho, 1 + 12\rho); \quad (15)$$

$$A_{i,i+1} = A_{i+1,i} = \frac{1}{6} (4 - 18\rho, 8 - 36\rho, 8 - 54\rho, \dots, 8 - 54\rho, 8 - 36\rho, 4 - 18\rho); \quad (16)$$

$$A_{i,i+2} = A_{i+2,i} = \frac{1}{6}; \quad (17)$$

$$A_{i,i+3} = A_{i+3,i} = \rho, \quad (18)$$

а вектор c был записан в виде:

$$c = \begin{pmatrix} F_0 \\ 4F_0 + F_1 \\ F_0 + 4F_1 + F_2 \\ \dots \\ F_{i-2} + 4F_{i-1} + F_i \\ \dots \\ F_N + 4F_{N+1} \\ F_{N+1} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Анализ системы уравнений позволяет заключить, что матрица A всегда хорошо обусловлена, что обеспечивает существование единственного решения системы уравнений. При этом матрица A зависит только от коэффициента сглаживания. Это позволяет найти обратную матрицу A^{-1} и использовать ее для расчета искомых коэффициентов всех строк и столбцов изображения по формуле

$$\beta = A^{-1}c \quad (20)$$

Система уравнений вида (14) может быть решена для каждой строки и столбца изображения. В результате получим матрицы B_{n_y, n_x}^x и B_{n_x, n_y}^y , которые в каждой строке хранят массивы коэффициентов сглаживающих кубических B -сплайнов, аппроксимирующих распределения яркости вдоль строк и столбцов входного изображения S соответственно. С учетом выражения (7) сплайн, описывающий производную одномерной функции $F(\chi_{xi})$, может быть записан в виде [8, 9, 10, 11]:

$$F_c'(\chi_{xi}, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N+1}) = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{1}{2} \chi_{xi}^2 (\beta_{i+2} - 3\beta_{i+1} + 3\beta_i - \beta_{i-1}) + \right. \\ \left. + \chi_{xi} (\beta_{i+1} - 2\beta_i + \beta_{i-1}) + \frac{1}{2} (\beta_{i+1} - \beta_{i-1}) \right). \quad (21)$$

Отсюда следует, что компоненты градиента яркости входного изображения могут быть найдены по формулам:

$$G_{n_y, i}^x = \sum_{n_x=2}^{N_x-2} \left(\frac{1}{2} \chi_{xn_x, i}^2 (B_{n_y, n_x+2}^x - 3B_{n_y, n_x+1}^x + 3B_{n_y, n_x}^x - B_{n_y, n_x-1}^x) + \right. \\ \left. + \chi_{xn_x, i} (B_{n_y, n_x+1}^x - 2B_{n_y, n_x}^x + B_{n_y, n_x-1}^x) + \frac{1}{2} (B_{n_y, n_x+1}^x - B_{n_y, n_x-1}^x) \right); \quad (22)$$

$$G_{n_x, i}^y = \sum_{n_y=2}^{N_y-2} \left(\frac{1}{2} \chi_{yn_y, i}^2 (B_{n_x, n_y+2}^y - 3B_{n_x, n_y+1}^y + 3B_{n_x, n_y}^y - B_{n_x, n_y-1}^y) + \right. \\ \left. + \chi_{yn_y, i} (B_{n_x, n_y+1}^y - 2B_{n_x, n_y}^y + B_{n_x, n_y-1}^y) + \frac{1}{2} (B_{n_x, n_y+1}^y - B_{n_x, n_y-1}^y) \right). \quad (23)$$

Модуль градиента яркости найдем по формуле

$$G(S_{n_x, n_y}) = \sqrt{(G_{n_y, n_x}^x)^2 + (G_{n_x, n_y}^y)^2}. \quad (24)$$

При этом пороговое преобразование описывается соотношением:

$$Q(S_{n_x, n_y}) = \begin{cases} 1, & G(S_{n_x, n_y}) > P; \\ 0, & G(S_{n_x, n_y}) < P. \end{cases} \quad (25)$$

Здесь P – значение порога.

Выводы: Получены аналитические выражения для вычисления сглаженных значений строк и столбцов исходного изображения, при этом для прямого и обратного преобразования используется одномерные сплайн-функции и обработка по строкам и столбцам. Предложенный подход позволяет использовать как последовательную, так и параллельную обработку, которая позволяет значительно сократить вычислительные затраты при реализации алгоритма фильтрации изображений.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках постановления N 218 "О мерах государственной поддержки ..., в рамках подпрограммы "Институциональное развитие научно-исследовательского сектора" государственной программы РФ "Развитие науки и технологий" на 2013 - 2020 годы", (контракт №03.G25.31.0284).

Список литературы

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. -М.: Техносфера, 2005. 1072с.
2. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB.-М.: Техносфера, 2006, 616с.
3. Прэтт У.Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. Кн.2, 480с.
4. Гданский Н.И., Марченко Ю.А. Градиентный способ выделения контуров объектов на матрице полутонового растрового изображения. //Патент РФ №2325044 на изобретение. МПКН04N1/409, G06K9/46.Заявит. Гданский Н.И., Марченко Ю.А. Патентообл. МГУИЭ.- №2007106412/09; заявл. 21.02.2007; опубл. 20.05.2008.
5. Sherstobitov A. I., Marchuk V. I., Timofeev D. V., Voronin V. V., Egiazarian K. O. Local feature descriptor based on 2D local polynomial approximation kernel indices. Image Processing: Algorithms and Systems XII, edited by Karen O. Egiazarian, Sos S. Agaian, Atanas P. Gotchev, Proceedings of SPIE Vol. 9019 (SPIE, San Francisco, WA 2014) 901908, DOI: 10.1117/12.2041610.
6. Безуглов Д.А., Мищенко С.Е., Кузин А.П. Способ помехоустойчивого градиентного выделения контуров объектов на цифровых полутоновых изображениях //Патент РФ № 2648954, МПК G06K 9/48. Заявит. и патентообл. Ростовский филиал РТА - № 2016104498/08; заявл. 10.02.2016; опубл. 15.08.2017 Бюл. № 23.
7. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций. -М.: Наука, 1980. 350 с.
8. Лапчик М.П. Численные методы. -М: Академия, 2008, 381с.
9. Безуглов Д.А., Крутов В.А., Швачко О.В. Метод дифференцирования сигналов с использованием сплайн-аппроксимации // Фундаментальные исследования, 2017, № 4-1, С.24-28.
10. Айфичер Э.С., Джервис Б.У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. 2-е издание. - М.: Вильямс, 2004. 992 с.
11. Безуглов Д.А., Цугуран Н.О. Дифференцирование результатов измерений сглаживающими кубическими В-сплайнами. Современные информационные технологии. 2005. № 1. С. 73-78.

05.13.18

А.А. Кротких, П.В. Максимов канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика, механика и биомеханика»,
Пермь, andrei.krotkih@gmail.com

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ LEVEL-SET МЕТОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО МЕТОДА ШТРАФНОЙ ФУНКЦИИ

Работа посвящена анализу Level-set метода топологической оптимизации, обладающего рядом преимуществ в сравнении с традиционными гомогенизационными методами – SIMP и BESO. Level-set метод требует аккуратного подбора параметров оптимизации и коэффициентов штрафа для получения корректного решения. В работе представлена модификация алгоритма посредством замены метода штрафных функций эвристическим методом, который на каждой итерации подбирает нужные значения параметров. Проведено сравнение модифицированного алгоритма с оригинальным алгоритмом.

Ключевые слова: математическое моделирование, Level-set метод, топологическая оптимизация.

Введение

Методы топологической оптимизации начинают применяться повсеместно при решении проблем магнитостатики, теплопроводности, механики жидкости и газа, механики деформируемого твёрдого тела, протезирования, проектирования. Одной из основных проблем является получение корректного решения. Гомогенизационные методы, обладающие рядом недостатков, при реальном практическом применении требуют дополнительной доработки решения. В частности, известными недостатками методов являются «рваная» геометрия, проблема «шахматной доски». Level-set метод обладает рядом преимуществ, которые позволяют избегать вышеуказанных проблем [1]:

1. не зависит от степени дискретизации задачи;
2. решение всегда будет гладкой функцией с точностью до степени дискретизации;
3. при определённой реализации метод становится топологически гибким.

Идея Level-set метода и подробная математическая постановка приведены в [2]. Показано, что постановка задачи структурной оптимизации в терминах Level-set метода может быть сформулирована следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \underset{\partial D}{\text{Minimize}} \quad J(u, \Phi) &= \int_D F(u) H(\Phi) d\Omega, \\
 \int_D E_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} H(\Phi) d\Omega &= \int_D p v H(\Phi) d\Omega + \int_{\partial D_t} \tau v \delta(\Phi) |\nabla \Phi| dS, \\
 u|_{\partial D_u} &= u_0 \quad \forall u \in U, \\
 \int_{\bar{D}} H(\Phi) &\leq V_{\max};
 \end{aligned} \tag{1}$$

Дискретная запись алгоритма Level-set метода

Сформулируем стандартную задачу топологической оптимизации в дискретной форме в рамках метода конечных элементов [3]:

$$\begin{aligned}
\min : c(x) &= U^T K U = \sum_{e=1}^N u_e^T k_e u_e = \sum_{e=1}^N x_e u_e^T k_e u_e \\
\text{subject to : } V(x) &= V_{req} \\
&: KU = F \\
&: x_e = 0 \text{ or } x_e = 1 \forall e = 1, \dots, N
\end{aligned} \tag{2}$$

где $c(x)$ – податливость объекта, U – глобальный вектор узловых неизвестных, K – глобальная матрица жёсткости, u_e – локальный вектор узловых неизвестных конечного элемента, k_e – локальная матрица жёсткости конечного элемента, x_e – значение виртуальной плотности в конечном элементе, $V(x)$ – текущий объём тела, F – глобальный вектор внешних сил.

Можно заметить, что в дискретной записи задачи топологической оптимизации есть запись виртуальной плотности, которая характерна гомогенизационным методам. В данном случае виртуальная плотность представляет из себя маркер, который обозначает вхождение рассматриваемого конечного элемента в область Level-set функции. В рамках данной работы был реализован метод конечных элементов с квадратными конечными элементами с биквадратной аппроксимацией поля перемещений, при этом размеры всех конечных элементов были одинаковы. Это необходимо для ускорения расчёта, так как при таком воксельном подходе нет необходимости вычислять локальную матрицу жёсткости для каждого конечного элемента, в том числе, и при дальнейшей её модификации. Level-set функция представлена следующим образом:

$$\psi(p) = \begin{cases} < 0 & \text{if } p \in \Omega \\ = 0 & \text{if } p \in \partial\Omega \\ > 0 & \text{if } p \notin \Omega \end{cases} \tag{3}$$

Уравнение Гамильтона-Якоби будет решаться в стандартной форме, без использования дополнительного слагаемого, которое отвечает за процесс нуклеации внутри области [4]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -v |\nabla \psi| \tag{4}$$

Для решения задачи оптимизации также необходимо ввести штрафную функцию для обеспечения условия по объёму. Вводится оно с помощью дополненного метода штрафов Лагранжа:

$$\begin{aligned}
v_e &= u_e^T k_e u_e - \lambda^k - \frac{1}{\Lambda^k} (V(x) - V_{req}) \\
\Lambda^{k+1} &= \alpha \Lambda^k
\end{aligned} \tag{5}$$

где k – номер итерации, λ – первый коэффициент Лагранжа, Λ – второй коэффициент Лагранжа, α – третий коэффициент Лагранжа.

Так выглядит стандартный алгоритм топологической оптимизации на базе Level-set метода в дискретной записи.

Использование альтернативного эвристического алгоритма штрафов

Авторами работы предлагается иной подход к обеспечению выполнения условия по объёму. В большинстве работ предлагается использовать множество параметров алгоритма из пределов, полученных из ряда численных экспериментов. В рамках решения реальных задач такой подход не всегда будет эффективным. Есть необходимость в алгоритме, который сможет самостоятельно подбирать значения для получения корректного решения задачи без предварительного подбора параметров. Авторами работы предлагается замена дополненного метода штрафов Лагранжа эвристическим методом, который выглядит следующим образом:

$$v_e^{k+1} = u_e^T k_e u_e - K \left| v_e^k - \max(\bar{v}_e^k) \right|$$

$$K = \begin{cases} 0.01 & k = 1 \\ K \cdot b \text{ if } V^k - V^{k-1} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Такая запись алгоритма позволяет ему на каждой итерации подбирать необходимое значение параметра штрафа. Основным минусом данного подхода является медленная сходимость алгоритма. Но при использовании такого алгоритма нет необходимости в предварительном подборе параметров оптимизации, в том числе, значения числа реинициализации Level-set функции, и временного шага для решения методом конечных разностей уравнения Гамильтона-Якоби. Сравнение модифицированного и оригинального метода будем осуществлять, сравнивая значение целевой функции.

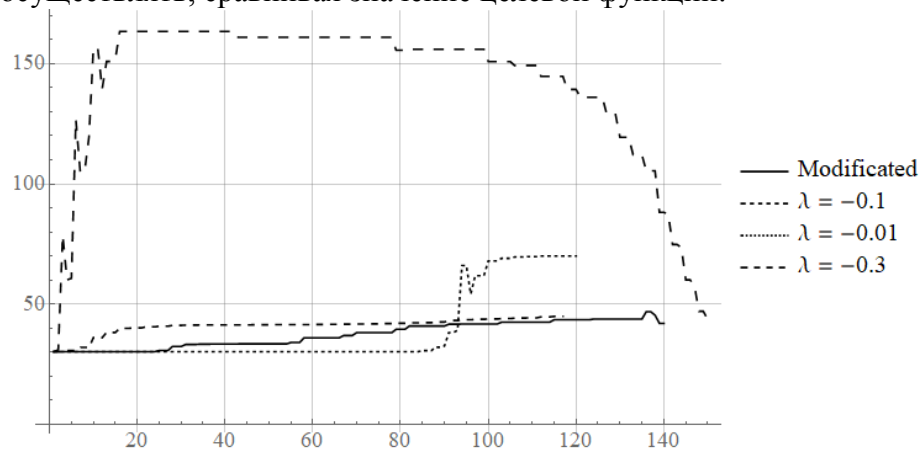


Рис.1- Значение целевой функции при использовании различных значений первого коэффициента в методе Лагранжа

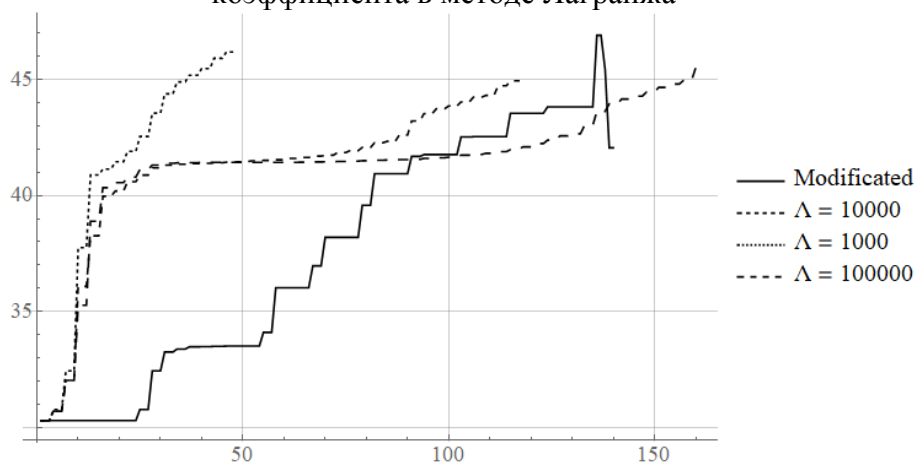


Рис.2- Значение целевой функции при использовании различных значений второго коэффициента в методе Лагранжа

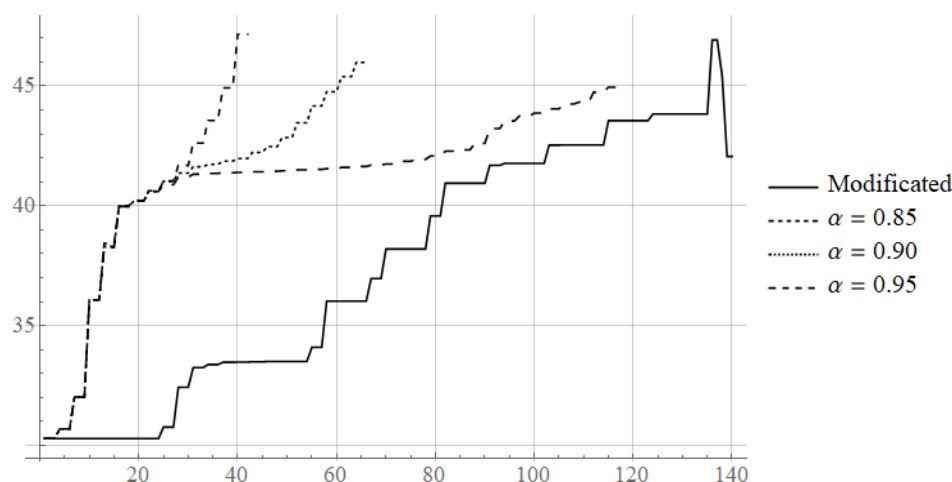


Рис.3- Значение целевой функции при использовании различных значений третьего коэффициента в методе Лагранжа

На рис. 1-3 наблюдается явное различие между адаптивным методом и дополненным методом Лагранжа, в частности, различается характер сходимости, конечное значение целевой функции и скорость сходимости. По данным параметрам можно утверждать о целесообразности введение модифицированного алгоритма.

Заключение

Авторами работы реализован и проанализирован оригинальный алгоритм Level-set метода. Рассмотрен существующий недостаток алгоритма в виде использования дополненного метода Лагранжа, сильно влияющий на сходимость задачи и на конечный результат топологической оптимизации. Предложен эвристический алгоритм штрафа, который позволяет избежать проблемы подбора параметров Лагранжа, но при этом требуется больше итераций для получения конечного решения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г., реализация постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. Van Dijk N.P., K. Maute, M. Langelaar, and F. Van Keulen, "Level-set methods for structural topology optimization: A review," Struct. Multidiscip. Optim., vol. 48, no. 3, pp. 437–472, 2013.
2. Максимов П.В., Кротких А.А., Ронжин Б.И. Реализация алгоритма на базе LEVEL-SET метода для решения задачи топологической оптимизации авиационных деталей // Научно-технический вестник Поволжья. -№9. – 2018. –с.107-110.
3. K. Liu and A. Tovar, "An efficient 3D topology optimization code written in Matlab," Struct. Multidiscip. Optim., vol. 50, no. 6, pp. 1175–1196, 2014.
4. Challis V.J., "A discrete level-set topology optimization code written in Matlab," Struct. Multidiscip. Optim., vol. 41, no. 3, pp. 453–464, 2010.

05.13.00

О.Н. Кузина канд. техн. наук

Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный
Университет (НИУ МГСУ),
кафедра информационных систем, технологий и автоматизации в строительстве,
Москва, kuzinaon@mgsu.ru

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Модели управления развитием информационной базы объекта необходимы для определения объема ресурсов и стоимости объекта строительства на каждом этапе жизненного цикла здания с учетом действующих требований к определению сметной стоимости на этапах от PRE-BIM до RE-BIM. Для разработки и внедрения системы управления стоимостью объекта в строительное производство необходимо не только определить основные уровни и параметры выбора при учете решений из организационно-технологической документации, но также построить архитектуру прикладного программного обеспечения для работы системы управления на всех последующих этапах жизненного цикла объекта строительства. Важно определить основные факторы, влияющие на принятие решений, и параметры формирования входных и выходных данные для моделирования каждого этапа жизненного цикла объекта, а также технико-экономические показатели информационной модели по стадиям.

Ключевые слова: жизненный цикл объекта, строительство, автоматизированное проектирование, моделирование, информационная модель, эксплуатация, переустройство зданий, утилизация, стоимость объекта, система управления.

Введение. Для развития информационной инфраструктуры, состоящей из цифровых платформ работы с данными для обеспечения потребностей потребителей всех уровней, разрабатывается прикладное программное обеспечение [1]. В частности, для строительной отрасли формируют архитектуру такого ПО с учетом целевой функции, состоящей в переходе на управление жизненным циклом объектов путем разработки и внедрения технологий информационного моделирования [2].

Одним из основных преимуществ использования таких систем является возможность прогнозировать изменения стоимости от стадии к стадии жизненного цикла объекта. Для определения стоимости объекта участникам инвестиционно-строительного процесса необходимо проанализировать варианты возможных решений на организационно-техническом, организационно-ресурсном, организационно-экономическом и организационно-нормативном уровне, а также учитывать возможные риски наступлений неблагоприятных обстоятельств или угрозы безопасности объекта и его инфраструктуре [3].

Системы искусственного интеллекта (или алгоритмы с возможностью самообучения) в режиме реального времени динамически дают возможность задать необходимые параметры для решения задач по достижению поставленной цели. Системы многоуровневого параметрического выбора проектных решений на основе информационного моделирования должны быть построены по следующим принципам.

В таких системах должна сохраняться последовательность в соответствии со стадиями создания объекта, по принципу от общего к частному. В начале определяется экономическая целесообразность возведения объекта, после чего последовательно определяют объемно-планировочные, конструктивные, архитектурные и организационно-технологические решения. Следующий принцип, закладываемый в алгоритм принятия решения – это возможность вариантной проработки каждого решения по технико-экономическим показателям, в том числе для расчета эксплуатационных затрат уже на стадии

предпроектных проработок. Безусловно, повысить скорость работы системы для генерации наиболее оптимального варианта в текущих условиях позволит использование типовых решений (проектов). Среди прочих преимуществ и недостатков использования типового проектирования для описываемой системы представляется экономически эффективным для строительных организаций использование типовых (сборных) конструкций. Наиболее важным принципом является учет взаимного влияния выбранных вариантов на каждом уровне, реализуя принцип комплексности решений (объемно-планировочных, архитектурных, конструктивных, организационно-технологических).

Методы. Для создания системы управления стоимостью в строительной отрасли важно руководствоваться принципами системотехники с использованием информационно-коммуникационных технологий.

Для организации процесса информационного моделирования стоимости объекта необходимо сформировать программное обеспечение, аппаратное обеспечение, сетевые ресурсы, базы и библиотеки компонентов, типовые проекты [4].

Определение стоимости, ее уточнение, происходит от стадии к стадии жизненного цикла объекта. На стадии предпроект (PRE-BIM) стоимость объекта определяется по укрупненным показателям, определенным по объектам-аналогам. На стадии проектирования (D-BIM) стоимость объекта уточняется в связи с тем, что расчет производится по сметным нормативам и видам конкретных работ с конкретными объемами и рассчитанными для этого ресурсами, далее полученная стоимость может уточняться в связи с проведением экспертизы проектно-сметной документации, внесения изменения в проектные решения. На стадии исполнения или строительства (C-BIM) используется рабочая документация, существует вероятность возникновения дополнительных работ, которые невозможно было определить на предыдущей стадии, данные работы фиксируются в журнале авторского надзора проектировщика, вносятся корректировки в проектно-сметную документацию, однако важно отметить, что если вносимые изменения влияют на безопасность объекта, то необходима повторная экспертиза проекта с учетом вносимых изменений. Кроме того, на стадии строительства в режиме реального времени сложно спрогнозировать возникновение обстоятельств, влияющих на изменение стоимости объекта. Для этих целей в том числе предусмотрены средства на непредвиденные расходы в сводном сметном расчете. Однако, сложность в прогнозировании стоимости объекта на данной стадии также связана с процессом исполнения работ и ее приемки строительным надзором. При некачественно выполненных работах, тем более нарушающих безопасность последующей эксплуатации объекта, технический надзор (как заказчика, подрядчика, так и государственный) выдаст предписания устранить подобные нарушения, однако важно понимать, что это увеличит время производства работ, если на данные работы не было предусмотрено резервов времени. Увеличение времени работ ведет к увеличению затрат подрядчика и заказчика. При моделировании стоимости объекта на данном этапе необходимо обратить внимание на планирование хода работ, резервы времени, технологические и организационные перерывы, то есть математически рассчитывать оптимально возможное время для каждого вида работ. На стадии управления и эксплуатации (E-BIM) наша стоимостная модель имеет динамический характер, поскольку с определенной периодичностью получает данные обо всех изменениях в инженерных системах. Однако, стоимость эксплуатации возможно спрогнозировать уже на стадии проектирования, с учетом требований по периодичности ремонтов и модернизации оборудования. Хотя также, как и на стадии строительства, есть некоторые обстоятельства, которые сложно предположить на стадии проектирования, например, аварии оборудования или прорыв инженерных коммуникаций, поэтому при создании модели стоимость объекта на этапе его эксплуатации необходимо руководствоваться не только нормативными требованиями и условиями, но также предположить возможные непредвиденные затраты. Кроме того, на этапе эксплуатации важно отразить прогнозируемое увеличение стоимости из-за роста инфляции, стоимости энергоносителей, увеличение тарифов или условий поставки энергии на объект с учетом

нормативного срока эксплуатации объекта. На стадии переустройства объекта, то есть его реконструкции/реновации/ ретривации/реабилитации и т.д. (RE-BIM) стоимость объекта становится сопоставимой со стоимостью проектирования и строительства нового объекта, все зависит от степени физического и морального износа конструкций. То есть на данный этап необходимо заложить затраты на проектирование, прохождение экспертизы документации, производства строительных и специальных работ, демонтаж конструкций, утилизацию или переработку отходов строительства и сноса. В настоящее время накоплен большой опыт переустройства объектов, который также можно использовать для создания укрупненных показателей стоимости переустройства объекта для прогнозирования затрат уже на стадии проектирования [5,6,7].

На этапе предпроектных проработок PRE-BIM система управления стоимостью объекта складывается из принятых решений по 4 уровням. Далее представлена матрица таких решений, которая закладывается в программу для дальнейших расчетов стоимости на последующих этапах.

Таблица 1. Набор решений уровням требований из информационной модели для расчета стоимости.

Перечень решений по уровням	Территория застройки (по результатам изысканий)	АР и объемно-планировочные	КР	Организационно-технологические
Организационно-технический уровень	$R_t 1$	$R_t 2$	$R_t 3$	$R_t 4$
Организационно-ресурсный уровень	$R_r 1$	$R_r 2$	$R_r 3$	$R_r 4$
Организационно-нормативный уровень	$R_n 1$	$R_n 2$	$R_n 3$	$R_n 4$
Организационно-экономический уровень	$R_e 1$	$R_e 2$	$R_e 3$	$R_e 4$

В данной таблице каждое решение представляет собой набор параметров (функцию) и значений таких параметров, их ограничения, а стоимость определяется так, где $Cf(Ei)$ – стоимость выбираемого элемента.

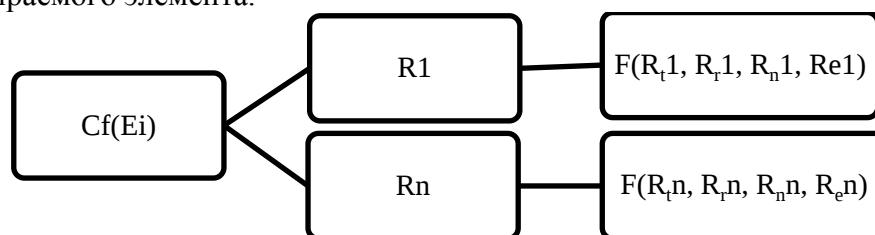


Рис. 1- Стоимость объекта в зависимости от выбора параметров [8].

Данный выбор отображается в информационной модели для обеспечения пользования данным решением при следующих выборах, реализуя принцип комплексности.

Результаты. Научная новизна выражена в предложении о внедрении системы многоуровневого параметрического выбора проектных решений на основе информационного моделирования для определения объема ресурсов и стоимости объекта строительства на каждом этапе жизненного цикла здания с учетом действующих требований к определению сметной стоимости на этапах предпроектных проработок, проектирования, получения положительного заключения экспертизы, строительства, сдачи объекта в эксплуатацию, эксплуатации, утилизации объекта.

На рис. 2 показана укрупненная архитектура прикладного программного обеспечения для определения стоимости на каждом этапе жизненного цикла объекта. Для внедрения ПО в строительные и проектные организации необходимо подготовить разноформатные базы данных с определенными правилами ввода данных и вывода результатов для осуществления многоуровневой многокритериальной оценки решений на основе системного анализа и рассмотренных выше принципов. Особенностью такой автоматизированной системы внедренной в процесс моделирования является возможность задать параметры и осуществить автоматический поиск, не только с учетом вводимой информации, но и с учетом уже принимаемых решений на предыдущих объектах [9].

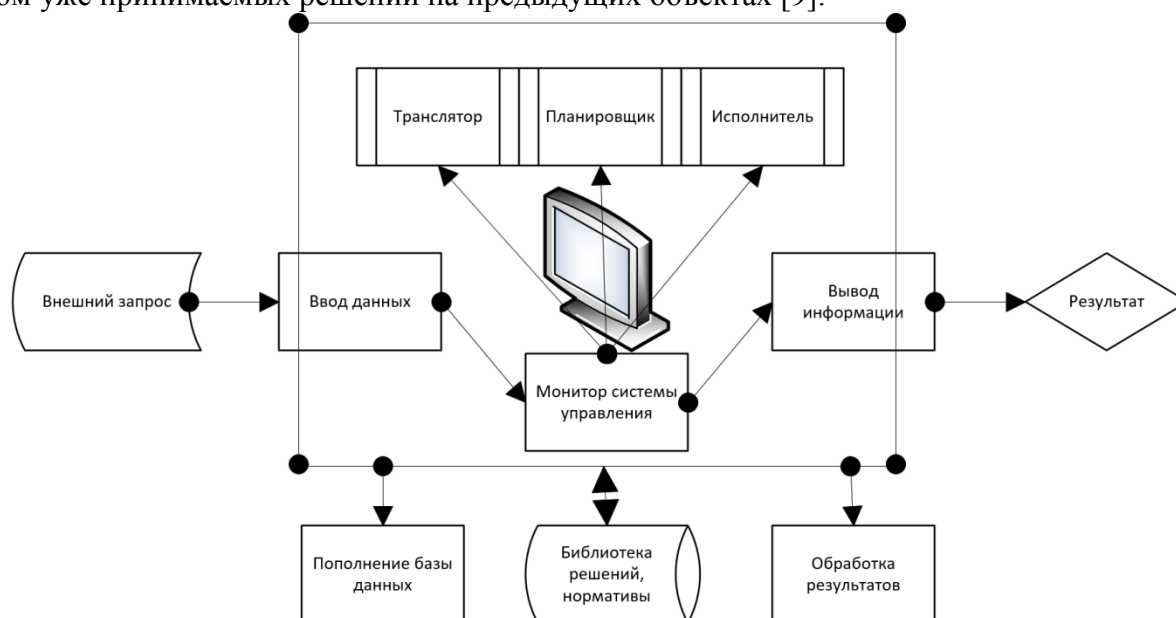


Рис.2- Архитектура программного обеспечения.

Обсуждение. В настоящее время существует множество систем управления, обеспечивающих поддержку жизненного цикла объекта (CALS, ERP). Однако в строительной отрасли такие системы применяются редко и для решения определенных задач, то есть не комплексно. Внедрение функционально-комплементарных моделей управления в строительстве позволит более качественно прогнозировать последующие возможные изменения системы, просчитать их последствия и взаимное влияние на другие элементы системы, на основе современных управленческих и информационных технологий, способных вести учет результатов и планировать ресурсы на следующих этап жизни объекта [10].

Заключение. Программные средства, базирующиеся на технологии и методах искусственного интеллекта, необходимо развивать и в строительной отрасли. Это позволит оптимизировать систему управления, наиболее качественно принимать решения, минимизировать затраты времени на поиск решений, а также контролировать выполнение государственных задач, снизить риски строительной отрасли в целом.

Список литературы

1. Стратегия развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 гг. от 9 мая 2017 года № 203.
2. Поручение президента РФ главе правительства РФ от 19.07.2018.
3. Волков А.А., Кузина О.Н. Функционально-комплементарная теория организации управления эксплуатацией комплекса зданий и инфраструктуры / Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 9. С. 61-67.
4. Свод правил СП 333.1325800.2017. «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла».
5. Кузина О.Н. Автоматизация оперативного управления на строительной площадке в модели C-BIM / Экономика и предпринимательство. 2017. № 11 (88). С. 890-893.
6. Гинзбург А.В. Информационная модель жизненного цикла строительного объекта / Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 9. С. 61-65.
7. Volkov A., Chulkov V., Korotkov D. Life cycle of a building / Advanced Materials Research. 2015. Т. 1065-1069. С. 2577-2580.
8. Volkov A., Kuzina O. Complementary Assets in the Methodology of Implementation Unified Information Model of the City Environment Project Life Cycle. Procedia Engineering 153, pp. 838-843. 2016.
9. Ginzburg A., Shilova L., Adamtsevich A., Shilov L. Implementation of BIM-technologies in Russian construction industry according to the international experience / Journal of Applied Engineering Science, 14 (4), p. 457-460 (2016).
10. Функционально-комплементарные модели управления в строительстве и ЖКХ на основе BIM/ Электронный ресурс: монография / Кузина О.Н.— Электронные текстовые данные. Саратов, 2017.

05.13.06

А.Д. Курзанов, М.А. Фомина

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра Строительного инжиниринга и материаловедения,
Пермь, kurzanov_sm_st@mail.ru

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

В статье предложена модель комплексного оценивания процесса структурообразования неавтоклавного газобетона. В качестве частных показателей процесса для построения модели комплексного оценивания предложено использовать коэффициент вспучивания смеси, величину осадки смеси и предельное напряжение сдвига растворной составляющей. Применение модели комплексного оценивания позволит количественно оценивать результат структурообразования, а также управлять данным процессом, используя ее в качестве критерия управления.

Ключевые слова: *неавтоклавный газобетон, управление, процесс структурообразования, комплексный критерий, комплексное оценивание.*

Особенностью неавтоклавного газобетона (НГБ) как конструкционно-теплоизоляционного материала является его уникальная ячеистая структура, представляющая собой полидисперсные сферические поры, разделенные плотной межпоровой перегородкой [1]. Структура газобетона определяет его эксплуатационные свойства: прочность, морозостойкость, плотность, теплопроводность и т.д. [2, 3]. Именно поэтому важнейшим этапом технологического процесса производства НГБ является процесс формирования ячеистой пористости. Оптимальное структурообразование (СО) обеспечивается при условии согласованности подпроцессов вспучивания и изменения вязкопластичных свойств смеси: конец активного газовыделения должен совпадать с достижением оптимальной структурной прочности массива, не допускающей осадки и других объемных деформаций. Согласованность подпроцессов достигается за счет тщательного подбора рецептурно-технологических параметров (РТП) технологического процесса.

По результатам многочисленных экспериментальных исследований установлено, что несогласованность указанных подпроцессов приводит образованию неоптимальной, дефектной макроструктуры, что в конечном итоге влечет за собой существенное снижение показателей качества продукции, вплоть до появления брака. При этом устойчивость процессов крайне низкая - любые возмущения способствует его нарушению [5].

В таких условиях для получения материала стабильно высокого качества необходимо решать задачу управления процессом структурообразования. С учетом особенностей производства НГБ по литевой технологии может быть выбран принцип управления по отклонению, в соответствии с которым необходимость изменения параметров процесса, а также количественные значения изменений определяется в результате измерения контролируемой величины (y) и сопоставления ее с требуемым значением. При этом изменение управляющих параметров процесса (u_i) осуществляется на следующем цикле производства.

Результат процесса структурообразования может быть описан с помощью нескольких показателей (y_i), а именно: коэффициент вспучивания массива, осадка смеси, предельное напряжение сдвига растворной составляющей. В реальных условиях производства управление процессом структурообразования осуществляется по одному показателю (коэффициент вспучивания), при этом значения других показателей не учитываются. Такое управление в условиях многофакторности технологического процесса нельзя считать эффективным.

Очевидно, что в сложившихся условиях управление должно осуществляться с учетом нескольких показателей процесса СО (частных показателей процесса), которые могут быть объединены в комплексный критерий (КК). Использование комплексного критерия, формируемого на основе использования известных механизмов комплексного оценивания (КО), позволяет агрегировать разнородную информацию и описывать результат процесса с помощью единого показателя.

Процедура построения комплексного критерия начинается с определения частных показателей, которые должны быть агрегированы в единый критерий. Комплексный критерий может быть представлен в виде дихотомического дерева критериев, в котором два критерия попарно сворачиваются в критерий следующего уровня [5].

Перед сверткой критериев их значения должны быть приведены к единой шкале комплексного оценивания от 1 до 4, в соответствии с которой наиболее благоприятным значениям частных показателей ставится в соответствие значение 4, а неблагоприятным - 1. Переход от натуральных значений к кодированным значениям осуществляется при помощи функции приведения, которая связывает текущее значение параметра в фазовом пространстве (натуральное значение – y_i) с значением параметра в квалиметрическом пространстве в шкале от 1 до 4 (кодированное значение – $\hat{Y}_i$), и может быть задана графически или алгебраически.

Значение критерия следующего уровня определяется линейной сверткой и вычисляется по формуле (1):

$$\hat{Y}_{ik} = a \cdot \hat{Y}_i + b \cdot \hat{Y}_k \quad (1)$$

где $\hat{Y}_{ik}$ – результат объединения критериев $\hat{Y}_i$ и $\hat{Y}_k$, a и b – коэффициенты, учитывающие важность каждого критерия при формировании критерия следующего уровня, также принимающего значения из диапазона [1;4].

Ранее было отмечено, что результат структурообразования может быть описан при помощи трех частных показателей: коэффициент вспучивания массива ($K_{всп}$), величина осадки смеси (ΔH , см) и значение предельного напряжения сдвига растворной составляющей ($P_{пред}$, Па) в момент завершения вспучивания. Следовательно, вектор показателей качества процесса структурообразования примет вид (2):

$$\vec{Y}_0 = \{Y_{K_{всп}}, Y_{\Delta H}, Y_{P_{пред}}\} \quad (2)$$

При свертке критериев «коэффициент вспучивания» и «осадка смеси» формируется критерий следующего уровня, называемый «высота массива» и характеризующий конечную высоту подъема массива. После этого критерий «высота массива» сворачивается с критерием «предельное напряжение сдвига», в результате чего формируется комплексный критерий качества процесса структурообразования, который может быть записан следующим образом (3):

$$\hat{Y}_0 = (\hat{Y}_{K_{всп}} \circ \hat{Y}_{\Delta H}) \circ \hat{Y}_{P_{пред}} \quad (3)$$

где $\hat{Y}_0$ – значение комплексного критерия, « $\circ$ » - оператор свертки.

Дихотомическое дерево комплексного оценивания, графически отражающее комплексный критерий, представлено на рисунке 1.

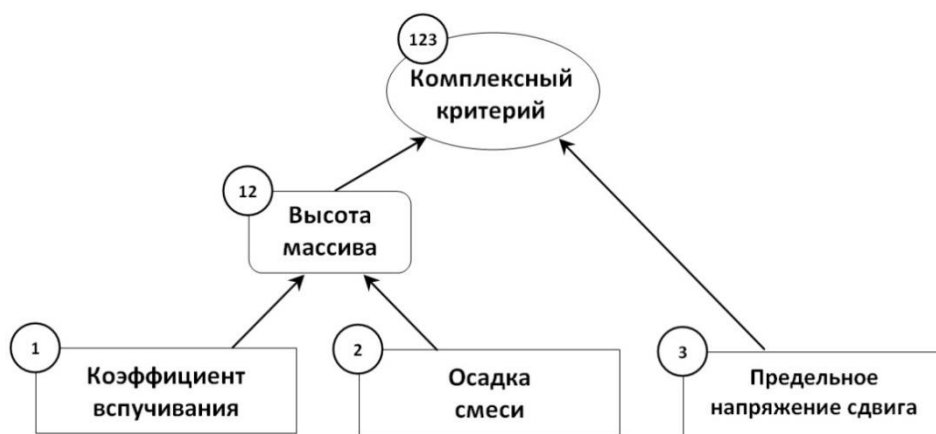
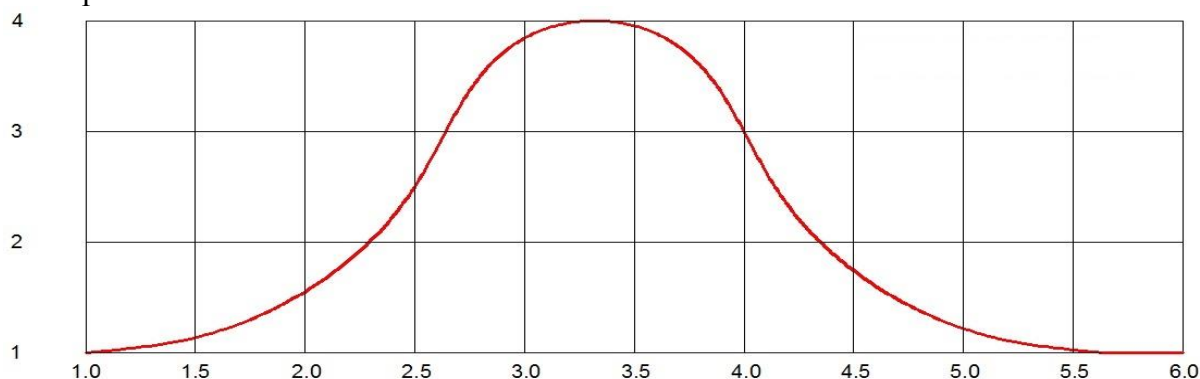


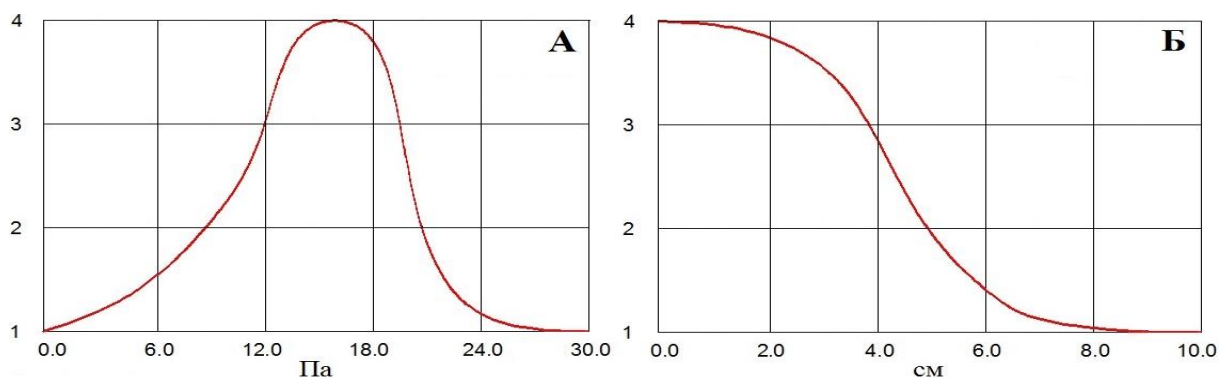
Рис. 1– Дихотомическое дерево комплексного оценивания

Следующий шаг процедуры КО – построение функций приведения для каждой частной характеристики. Функции приведения строятся следующим образом: «неудовлетворительным» значениям физической величины в фазовом пространстве должна быть поставлена оценка «1» в квалиметрическом пространстве, «удовлетворительным» значениям – оценка «2», «хорошим» – «3», «отличным» – «4».

На рисунке 2 представлена функция приведения для критерия « $u_{\text{Квсп}}$ – коэффициент вспучивания». Эмпирически установлено, что для НГБ марки по средней плотности D500 оптимальное значение коэффициента вспучивания равно 3,32. Исходя из этого оценка «4» в квалиметрическом пространстве достигается именно при таком значении физической величины. Функция приведения монотонно возрастает на диапазоне от 1,0; 3,32 и монотонно убывает при большем значении.

Рис. 2– Функция приведения для « $u_{\text{Квсп}}$ – коэффициента вспучивания»

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация функций приведения для критерия « $u_{\text{Рпред}}$ – предельное напряжение сдвига» (А) и для критерия « $u_{\Delta H}$ – величина осадки смеси» (Б).

Рис. 3– Функция приведения для « $u_{\Delta H}$ – осадки смеси»

Заключительный шаг процедуры КО – формирование линейной свертки в вершинах дерева критериев. Линейная свертка позволяет определить численный результат взаимодействия двух сворачиваемых критериев с учетом их взаимного влияния на значение критерия следующего уровня (в зависимости от коэффициентов a и b).

Коэффициенты a и b были определены в результате обработки мнения группы экспертов, которым было предложено с учетом их знания и практического опыта сформировать численные значения данных коэффициентов для каждой линейной свертки. В конечном итоге с учетом определенных коэффициентов критерии $\hat{Y}_{12}$ («высота массива») и $\hat{Y}_0$ («комплексный критерий») вычисляются по формулам (4, 5):

$$\hat{Y}_{12} = 0,62 \cdot \hat{Y}_{\text{Квсп}} + 0,38 \cdot \hat{Y}_{\Delta H} \quad (4)$$

$$\hat{Y}_0 = 0,71 \cdot \hat{Y}_{12} + 0,29 \cdot \hat{Y}_{\text{Рпред}} \quad (5)$$

На основе этого может быть построена модель комплексного оценивания процесса структурообразования как результат объединения выражений (4) и (5):

$$\hat{Y}_0 = 0,44 \cdot \hat{Y}_{12} + 0,27 \cdot \hat{Y} + 0,29 \cdot \hat{Y}_{\text{Рпред}} \quad (6)$$

В заключении необходимо отметить следующее: во-первых, оценка качества процесса структурообразования должна осуществляться с позиций одновременного контроля нескольких частных показателей процесса. Для этого может быть использован комплексный критерий качества, как обобщенная характеристика процесса, получаемая агрегированием частных показателей. Во-вторых, в качестве частных показателей предложены следующие показатели процесса структурообразования: коэффициент вспучивания, осадка смеси, предельное напряжение сдвига растворной составляющей в момент завершения процесса структурообразования.

В-третьих, разработана модель комплексного оценивания качества процесса структурообразования неавтоклавнога газобетона, позволяющая, с одной стороны, количественно оценивать процесс структурообразования НГБ, а с другой – управлять данным процессом.

Список литературы

1. Рахимбаев Ш.М., Аниканова Т.В. О влиянии размера и формы пор на теплотехнические характеристики ячеистого бетона // Бетон и Железобетон. – 2010. – №1. – С.10-13.
2. Дерябин П.П., Дерябина С.Н. Влияние текучести смеси на свойства стеновых изделий из газобетона // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2014. – №2 (36). С. 60-64.
3. Bonakdar A. Physical and mechanical characterization of Fiber-Reinforced Aerated Concrete (FRAC) / A. Bonakdar [and others] // Cement & Concrete Composites. – 2013. – №. 38. – P. 82-87.
4. Куннос Г.Я. Элементы технологической механики ячеистых бетонов / Г.Я. Куннос [и др.] // Рига: Зинатие, 1976. – 96 с.
5. Харитонов В.А., Винокур И.Р., Белых А.А. Функциональные возможности механизмов комплексного оценивания с топологической интерпретацией матриц свертки // Управление большими системами. Сборник трудов. – 2007. – №18 – С. 129-140.

05.13.18

С.Л. Леванов, Г.Н. Власичев д-р техн. наук

Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева,
Институт Ядерной Энергетики и Технической Физики,
кафедра «Ядерные Реакторы и Энергетические Установки»,
Нижний Новгород, geell@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЁТНЫХ КОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

В работе проведена оптимизация основных характеристик твэлов с толерантным топливом, получен их оптимальный диаметр. В качестве толерантного предлагается использовать топливо на основе металлического урана с оболочкой из циркониевого сплава, а также топливо на основе металлического урана с оболочкой из сплава на основе хрома и никеля. Поставленная задача решена с помощью аттестованных в России расчётных кодов.

Ключевые слова: *паро-циркониевая реакция, физика реакторов, твэл, ядерное топливо, коэффициент размножения.*

Авария на АЭС Фукусима-2 показала особую опасность для легководных реакторов на тепловых нейтронах паро-циркониевой реакции, возникающей при повышении температуры оболочек после потери теплоносителя и всплесках реактивности. Для обеспечения работоспособности и безопасности в условиях аварии с потерей теплоносителя планируется использование так называемого толерантного топлива (Accident Tolerant Fuel), отличного по составу от используемого на данный момент в реакторах ВВЭР. В качестве толерантного предлагается использовать топливо на основе металлического урана с оболочкой из циркониевого сплава, а также топливо на основе металлического урана с оболочкой из сплава на основе хрома и никеля. Использование металлического топлива с большой теплопроводностью позволяет снизить его температуру, а использование оболочки из хромоникелевого сплава решает проблему возникновения паро-циркониевой реакции. В топливе с циркониевой оболочкой возможно использование специального покрытия твэлов для исключения контакта циркония с водородом. Увеличение загрузки урана из-за изменения состава топливной композиции приводит, в случае прямой замены, к ухудшению нейтронно-физических характеристик топлива из-за неоптимального соотношения делящегося материала и замедлителя нейтронов, что ухудшает технико-экономические показатели активной зоны реактора. Для получения максимального времени работы топлива при фиксированной загрузке урана необходимо провести ряд поисковых физических расчётов.

Данные расчёты выполнялись с использованием программных кодов WIMSD-5 и MCU-TR. Программы аттестованы в Российской Федерации для расчетов реакторов ВВЭР.

Перенос нейтронов в материалах активной зоны реактора описывается с помощью уравнения Больцмана. Интегральная форма этого уравнения (интегральное уравнение Пайерлса) записывается в виде [1]:

$$\Phi(r) = \frac{1}{4\pi} \cdot \int_V [\Sigma_s(r')\Phi(r') + S(r')] \frac{\exp\left(-\int_0^R \Sigma_t(r-R')dR'\right)}{|r'-r|^2} ,$$

где Σ_t , Σ_s – полное сечение и сечение рассеяния соответственно;

$\Phi(r)$ – функция распределения плотности потока нейтронов;

$S(r)$ – функция распределения источника нейтронов.

В программе WIMSD-5 решение интегрального уравнения переноса нейтронов реализовано методом вероятности первых столкновений:

$$\Sigma_{tj} \Phi_j V_j = \sum_{i=0}^{L-1} V_i P_{ij} [\Sigma_{si} \bar{\Phi}_i + \bar{S}_i]$$

где i, j – соответствующие индексы расчётных объемов V ;

P_{ij} – вероятность перехода нейтрона из объема i в объем j ;

L – число расчётных объемов.

Уравнение переноса нейтронов в программе MCU-TR решается методом Монте-Карло. Метод основан на последовательном моделировании траектории частиц и их взаимодействии с атомами среды. Результирующие функционалы получаются статистической обработкой определённого количества историй, определяемого необходимой точностью расчета.

На первом этапе расчётов была проведена верификация расчётных кодов на основе вычисления эффективного коэффициента размножения нейтронов ($K_{эфф}$) в критических сборках. Данный тип экспериментальных топливныхборок характеризуется тем, что у них заранее заложено критическое значение $K_{эфф} = 1$. Для верификации были использованы результаты экспериментов Брукхейвенской национальной лаборатории (Brookhaven National Laboratory) на критических сборках с топливом на основе металлического урана [2]. Обогащение урана в этих сборках изменялось в пределах 1,016 - 1,299%, диаметр твэлов изменялся в пределах 8 - 20 мм, шаг расстановки твэлов в треугольной решетке от 11 до 40 мм. За счет изменения диаметра и шага расстановки твэлов водо-урановое отношение (отношение объема замедлителя к объему топлива) изменялось в пределах от 1 до 4. В качестве замедлителя использовалась вода с температурой 20°C при атмосферном давлении. В качестве материала оболочки твэлов использовался алюминий. Так как экспериментальные сборки состояли из периодической однородной решетки твэлов, при верификации программ использовалась модель одномерной элементарной ячейки. Такая ячейка представляет собой твэл, окруженный водой. Все элементарные ячейки в решетке имеют одинаковую геометрическую форму и нейтронные характеристики. Переход к такой модели не приводит к заметным погрешностям в расчётах, т.к. он сводится лишь к замене формы границы ячейки (с шестигранника на окружность). Результаты расчетов $K_{эфф}$, выполненных по кодам WIMSD-5 и MCU-TR для 32 вариантов комплектации топливныхборок, а также физическая модель, приведены на рисунке 1.

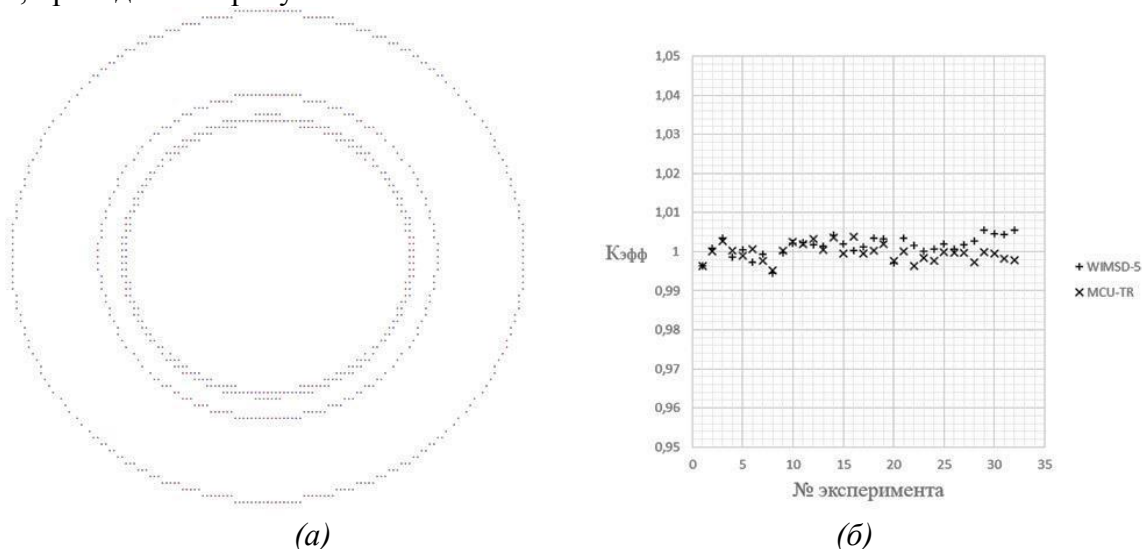


Рис. 1– Физическая модель (а) и результаты верификации расчётных кодов (б)

Анализируя результаты можно заметить, что значения $K_{эфф}$, полученные по используемым расчётным кодам, находятся в интервале 0,994 – 1,006, т.е. в рамках $\pm 0,6\%$ отклонения от критического значения.

Данный результат позволил нам сделать вывод об успешной верификации расчётного кода и возможности его применения для расчёта топлива на основе металлического урана.

В настоящее время в энергетических реакторах ВВЭР-1000 используются ТВС с топливом на основе оксида урана в твэлах диаметром 9,1 мм и оболочкой из циркониевого сплава. Твэлы в ТВС расположены по треугольной решетке с шагом 12,75 мм [3]. Указанные характеристики топлива обеспечивают значение водо-уранового отношения около 1,8. Данное значение водо-уранового отношения близко к оптимальному значению для оксидного топлива с плотностью 10,4 г/см³.

При переходе на топливо из металлического урана с плотностью ~17 г/см³ необходимо выполнить оптимизацию характеристик для получения оптимального значения водо-уранового отношения. Оно является одной из основных нейтронно-физических характеристик реактора и определяет геометрию топлива – в нашем случае, внешний диаметр твэлов. При одинаковом значении выгорания топлива переход на оптимальное значение водо-уранового отношения позволяет увеличить эффективный коэффициент размножения и длительность работы загрузки, получить больше энергии с единицы топлива и улучшить эффективность его использования. Изменение водо-уранового отношения в ТВС с толерантным топливом выполнялось путем изменения внешнего диаметра твэлов при сохранении шага расстановки 12,75 мм. Использованная физическая модель – та же модель одномерной элементарной ячейки.

Зависимость эффективного коэффициента размножения от водо-уранового отношения имеет выраженный максимум, которому соответствует оптимальное значение водо-уранового отношения. Данное значение определяется для выгоревшего топлива на момент окончания работы топливной загрузки. Расчеты были выполнены для обогащения 4,95%. В обоих случаях определялось значение реактивности в единицах рст ($(K_{\text{эфф}}-1) \cdot 10^5$) на момент конца работы загрузки.

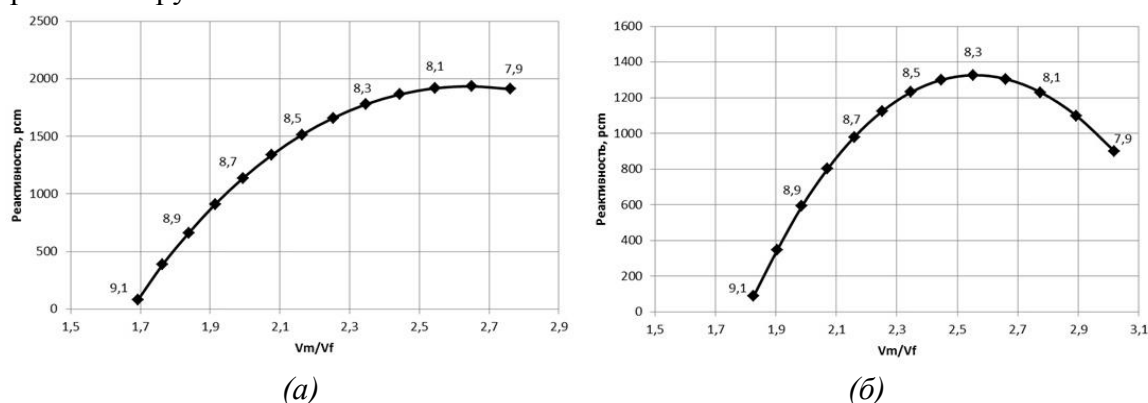


Рис.2– Зависимость реактивности от водо-уранового отношения для толерантного топлива с оболочкой твэлов из хром-никелевого сплава (а) и из циркония (б)

Анализируя полученные результаты можно заметить, что ярко выраженный максимум значения реактивности на момент окончания работы топливной загрузки приходится на значения диаметра толерантного топлива значительно меньшие, чем диаметр штатного ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000. Таким образом, можно прийти к выводу, о необходимости уменьшения диаметра твэла на величину, определяемую этим смещением максимума реактивности. Для недопущения заваливания в зону положительных эффектов реактивности в переходных режимах значение водо-уранового отношения необходимо выбирать меньшим, чем его значение при максимальной реактивности. Таким образом, принимаем оптимальное значение водо-уранового отношения для толерантного топлива в интервале 2,2 – 2,3, что соответствует диаметру твэлов 8,5 – 8,4 мм.

Список литературы

1. Бать Г.А. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов / Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Байбаков, М.С. Алтухов – М., Энергоатомиздат, 1982 – 511 с.
2. WIMS-D Library Update // Rep. IAEA, Vienna, 2007
3. Ядерное топливо для реакторов ВВЭР // АО «ТВЭЛ», 2017

05.13.18

П.В. Максимов канд. техн. наук, А.А. Кротких

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика, механика и биомеханика»,
Пермь, andrei.krotkih@gmail.com

ВВЕДЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО АЛГОРИТМОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА

Работа посвящена возможному внедрению дополнительного критерия для оценки качества решения, полученного алгоритмом топологической оптимизации. Подобный критерий позволит качественно сопоставить результаты решений различных алгоритмов, основанных на конечно-элементном моделировании. Предлагается в качестве критерия использовать дисперсию целевой функции во всей области, ограниченной телом. Подобный критерий будет явно указывать на наличие неравномерно распределённой энергии деформации.

Ключевые слова: математическое моделирование, Level-set метод, топологическая оптимизация.

Введение

Алгоритмы топологической оптимизации можно условно разделить на несколько видов: гомогенизационные, Level-set, и другие [1-3]. Гомогенизационные методы, одни из первых и самые распространённые методы для решения задач топологической оптимизации. Основаны на понятии поля «виртуальной» плотности, которая определяет физические свойства тела в произвольной точке пространства [3]. Алгоритмы в большинстве случаев реализуются посредством конечно-элементного моделирования. Алгоритмы, построенные на базе гомогенизационных методов, имеют ряд недостатков. В частности, такими недостатками являются: дискретная форма записи значений целевой функции; необходимость перехода к гладкой функции, для получения корректной геометрии; обязательная процедура фильтрации для устранения черно-белого решения. Алгоритмы, основанные на применении Level-set метода, реализуются в большинстве своём также, как и гомогенизационные алгоритмы – с использованием метода конечных-элементов [1-2]. Основное отличие Level-set метода от гомогенизационного метода в ином подходе к решению задачи топологической оптимизации, что позволяет избежать ряда проблем. Такими проблемами является зависимость решения от степени дискретизации задачи, необходимость гладкости функции.

Конечно-элементная постановка задачи топологической оптимизации

Сформулируем стандартную задачу топологической оптимизации в дискретной форме в рамках метода конечных элементов [1-3]:

$$\begin{aligned} \min : c(x) &= U^T K U = \sum_{e=1}^N u_e^T k_e u_e = \sum_{e=1}^N x_e u_e^T k_e u_e \\ \text{subject to : } V(x) &= V_{req} \\ &: K U = F \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

где $c(x)$ – податливость объекта, U – глобальный вектор узловых неизвестных, K – глобальная матрица жёсткости, u_e – локальный вектор узловых неизвестных конечного элемента, k_e – локальная матрица жёсткости конечного элемента, x_e – значение виртуальной плотности в конечном элементе, $V(x)$ – текущий объём тела, F – глобальный вектор внешних сил.

Подобная постановка задачи используется для большинства алгоритмов. Существует иная постановка задачи, где целевой функцией выбрана работа внешних сил. Её можно применять только при условии нулевого тепловыделения в ходе деформационного процесса. Результатом оптимизации при использовании гомогенизационного алгоритма является поле виртуальной плотности, определённое в дискретной форме в каждом конечном элементе. При использовании Level-set алгоритмов, результатом является по сути такое же виртуальное поле, на базе которого мы выстраиваем конечный результат в виде Level-set модели. Эта модель как раз позволяет восстановить гладкую модель реального объекта.

Необходимость введения критерия качества решения

Большинство алгоритмов топологической оптимизации обладают большим спектром параметром, от которых конечное решение может сильно изменяться, это справедливо в отношении и гомогенизационных и Level-set алгоритмов. В частности, такими параметрами для гомогенизационного алгоритма являются радиус фильтрации, степень штрафа, а для Level-set метода такими параметрами выступают частота реинициализации Level-set модели, временной шаг в решении уравнения Гамильтона-Якоби. При этом нет чётких критериев, определяющих качество решения.

Критерий качества

Авторами работы предложен критерий качества для оценки решений, полученных алгоритмами топологической оптимизации в следующем виде:

$$S(\bar{c}_e) \rightarrow \min \quad (2)$$

где S – дисперсия, c_e – вектор значений целевой функции в конечных элементах.

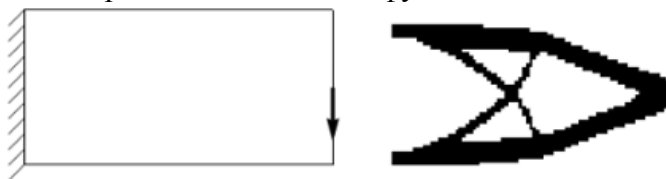


Рис. 1- Расчетная схема задачи и топологически оптимизированное решение

Такой критерий явным образом определяет существование перегруженных элементов. Таким образом, есть возможность оценить качество решения при использовании различных параметров методов. Произведём оценку применимости данного критерия на базе Level-set алгоритма варьируя параметры метода штрафов при решении известной верификационной задачи, изображённой на рис. 1. На рис. 2-4 показана величина дисперсии целевой функции при использовании различных параметров штрафного метода и специального метода, разработанного для минимизации дисперсии. В качестве штрафного метода используется дополненный метод Лагранжа.

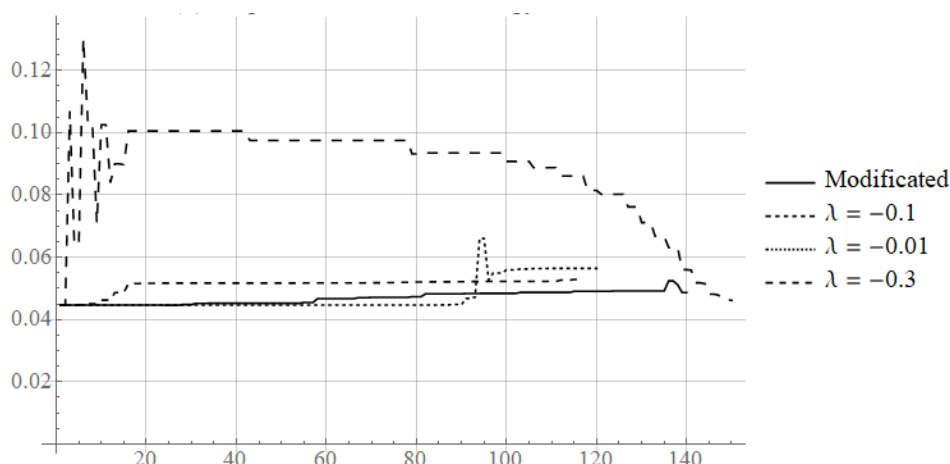


Рис. 2- Зависимость дисперсии целевой функции от первого коэффициента Лагранжа

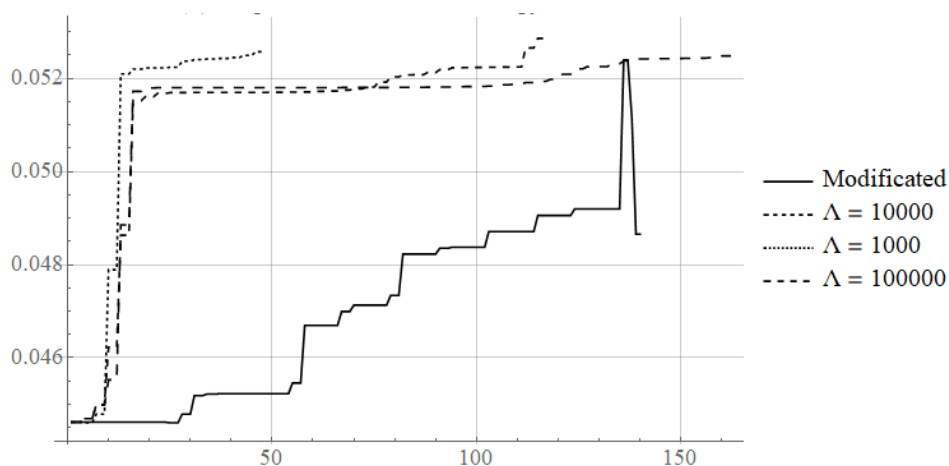


Рис. 3- Зависимость дисперсии целевой функции от второго коэффициента Лагранжа

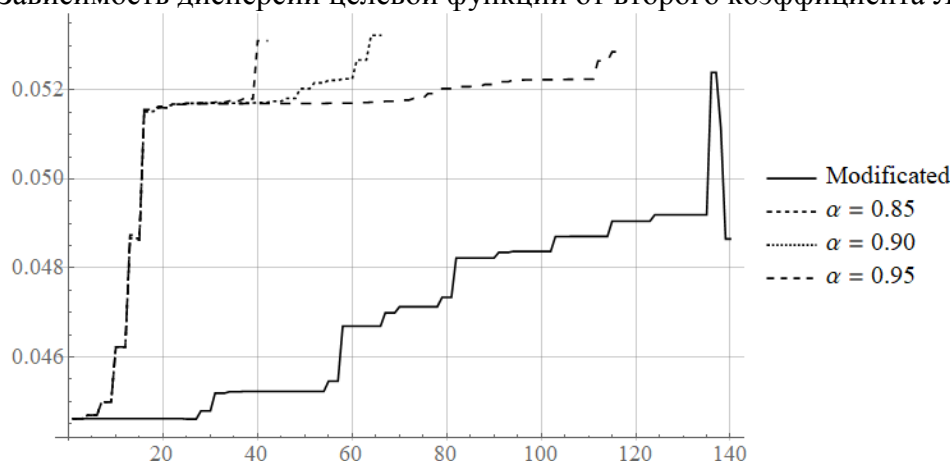


Рис. 4- Зависимость дисперсии целевой функции от третьего коэффициента Лагранжа

Заключение

Авторами работы рассмотрены существующие методы топологической оптимизации, перечислены недостатки получаемых решений. На основании анализа предложен критерий, позволяющий оценить качество получаемых решений. Произведена оценка применимости введенного критерия на примере решения известной задачи топологической оптимизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор №02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г., реализация постановления Правительства РФ № 218).

Список литературы

1. M. Wang, X. Wang, and D. Guo, "A level set method for structural topology optimization," *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, vol. 192, pp. 227–246, 2003.
2. G. Allaire, F. de Gournay, F. Jouve, and A. Toader, "Structural optimization using topological and shape sensitivity via a level set method," no. Umr 7641, pp. 1–21, 2005.
3. M.P. Bendsøe and O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods, and applications*. 2003.

05.13.00

**В.В. Назарова канд. техн. наук, Л.А. Надточий канд. техн. наук,
В.А. Демченко канд. техн. наук, А.Д. Апалько, О.Л. Жданова**

Университет ИТМО,
Санкт-Петербург

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ САЛАТА (*LACTUCA SATIVA* L) ГИДРОПОННЫМ МЕТОДОМ

*В статье описывается нахождение зависимости между управляемыми параметрами микроклимата теплицы и урожайностью, периодом созревания салата латук (*Lactuca sativa* L.), при постоянном спектральном составе света. Для оценки влияния рассматриваемых факторов на динамику изменения среднего веса салата была получена регрессионная модель, описывающая установленную зависимость. Полученная модель позволит подобрать необходимые значения параметров для оптимального периода созревания и наилучшей урожайности.*

Ключевые слова: *гидропоника, салат Латук, урожайность, период созревания, управляемые параметры.*

Основными в рационе здорового питания человека являются овощи, фрукты и зелень. Большая часть северных широт Российской Федерации относится к регионам с ограниченными возможностями по выращиванию этих культур. Овощи поступают на региональный рынок в очень ограниченном количестве, так как тепличные хозяйства работают сезонно.

Выращивания зелени и овощной продукции помимо общепринятого грунтового метода актуально и методом гидропоники, что позволяет снизить затраты на рекультивацию земель, отказ от удобрений, пестицидов. Продукция, выращенная гидропонным способом, является экологически чистой, так как выращивается по точно заданным параметрам, не требует удобрения, а соответственно превышения химических элементов.

Для обеспечения населения свежими овощами во внесезонный период требуется расширение ассортимента овощных культур, зелени выращиваемых в защищенном грунте. Исследования, проведенные в последнее время, показали возможность выращивания на существующих салатных линиях более 34 видов зеленных и пряно-вкусовых культур [1]. Основная культура — салат Латук, которая пользуется спросом у россиян, но технологии его выращивания еще недостаточно отработаны и нуждается в совершенствовании [2], для чего требуется проведение надлежащих исследований, что и стало целью нашей работы.

Светодиодная гидропонная установка стеллажного типа, с помощью которой проводились исследования, обладает следующими характеристиками: простотой, мобильностью, не требует почвы, не зависит от сезонов, климатических условий, позволяет выращивать любые не районированные сорта растений, не применяются ядохимикаты и пестициды. Модульность позволяет оптимально заполнить любое сложное пространство в помещении. Установка представляет собой прямоугольный секционный многоярусный вегетационный стеллаж (рис. 1). Размеры базовой установки длина 120 см, ширина 80 см, высота 200 см. На стойках с перфорированными отверстиями по всей высоте крепятся держатели поддонов. На держатели устанавливаются пластиковые поддоны. Поддоны имеют ячеистую крышку для установки емкостей с растениями на определенной высоте, а также отверстия для подачи и слива питательного раствора.

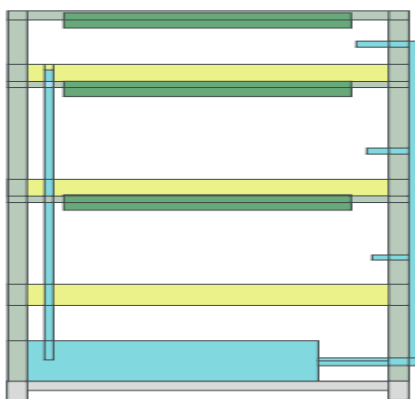


Рис. 1- Схема экспериментальной установки

Салат (*Lactuca sativa* L.) был выращен в закрытой гидропонной установке с оптимальными управляемыми параметрами: температура 20,3 – 23,9°C, относительная влажность воздуха 50 – 70%, pH-раствора 5,3 – 6,3, освещенность 7 – 12 кЛк, световой день 14 – 20 часов [3].

Подкормку необходимыми минеральными элементами для роста растения осуществляли специальными питательными растворами, которые были приготовлены из состава макро- и микроудобрений, используемых для выращивания в тепличном овощеводстве. Субстратом для проточной гидропоники во всех опытах выступил агроперлит.

Спектральный состав светодиодных светильников использовавшихся для освещения растений, которые мы брали для эксперимента, с соотношением энергии в отдельных спектральных диапазонах 730 нм - 13%, 660 нм - 58%, 450 нм - 29% [4].

Необходимое значение освещенности во время вегетационного периода на необходимом уровне поддерживали за счет изменения высоты, на которой крепился излучатель [5, 6]. В ходе выполнения работы было исследовано 20 режимов микроклимата и освещенности для выращивания листьев салата, урожайность листьев салата составила от 3,6 до 5,6 кг/м², а период созревания составил от 25 до 35 дней.

Чтобы оценить совокупное влияние рассматриваемых факторов на динамику роста и созревания растения [7] была получена регрессионная модель описывающая установленные закономерности:

$$z_1 = -0,172 \cdot y_1 + 0,11 \cdot y_2 - 0,204 \cdot y_3 + 0,33 \cdot y_4 - 0,121 \cdot y_5 + 2$$

где z_1 – урожайность салата, кг/м²;

y_1 – температура окружающей среды, °C;

y_2 – относительная влажность воздуха, %;

y_3 – pH-раствора;

y_4 – уровень освещенности, кЛк;

y_5 – световой день, ч.

Модель для периода созревания z_2 , дней:

$$z_2 = 0,023 \cdot y_1 - 0,302 \cdot y_2 + 1,924 \cdot y_3 - 1,251 \cdot y_4 - 2,431 \cdot y_5 + 1,844$$

Таблица 1 - Экспериментальные данные для показателей урожайности и периода созревания

Режим	Температура , °C	Влажность, %	pH	Освещённость , кЛк	Световой день, ч	Урожайность , кг/м ²	Период созревания, дней
1	23,3	66	6,0	11,3	19	5,5	26
2	20,6	62	6,1	8,2	20	4,3	30
3	23,2	70	6,2	8,7	18	5,0	30,0
4	21,8	56	6,1	11,1	18	4,8	29,0
5	20,7	50	5,4	11,0	22	3,8	30,0

6	22,5	52	5,9	8,9	16	3,7	31,0
7	22,1	61	5,6	7,7	19	4,1	31,0
8	21,3	51	6,3	11,0	18	4,1	32,0
9	21,6	62	6,3	10,3	17	5,3	29,0
10	22,5	63	6,0	12,0	18	5,6	25,0
11	23,3	69	6,1	10,4	20	5,2	27,0
12	23,4	61	5,6	7,8	16	4,2	30,0
13	23,9	63	6,3	10,1	17	4,7	29,0
14	23,2	51	5,4	10,7	16	3,9	32,0
15	23,8	53	6,3	11,0	18	3,8	32,0
16	21,0	68	6,2	7,9	22	4,3	32,0
17	20,8	56	5,3	7,8	18	3,7	32,0
18	23,8	65	6,1	8,9	16	4,8	31,0
19	20,0	50	5,3	7,0	15	3,6	35,0
20	23,7	53	6,1	10,0	16	3,7	30,0

Следующим объектом для исследования являлось зависимость среднего веса листа салата Латук от двух основных факторов микроклимата гидропонной установки, а именно температуры окружающей среды и влажности. Все они были выращены в защищённом грунте методом гидропоники, поддерживали требуемые значения управляемых параметров: рН-раствора 6, освещенность 12 кЛк, световой день 18 часов. Во время выполнения работы было исследовано 20 режимов микроклимата для выращивания листьев салата, средний вес листьев салата составлял от 116 до 157 г. Чтобы оценить совокупное влияние рассматриваемых факторов на динамику изменения среднего веса листьев салата была получена регрессионная модель, описывающая установленные закономерности: где z – средний вес листа (г), y_1 – температура окружающей среды ($^{\circ}\text{C}$), y_2 – относительная влажность воздуха, (%):

$$z = 1,750 \cdot y_1 + 1,8211 \cdot y_2 - 9,045$$

Таблица 2 - Экспериментальные данные для показателя средний вес

Режим	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Влажность, %	Средний вес листа салата, г
1	22,3	66	154
2	20,6	62	142
3	23,2	70	157
4	21,8	56	134
5	20,7	50	116
6	22,5	52	127
7	20,1	51	117
8	21,3	51	128
9	22,9	63	155
10	20,7	63	150
11	23,3	69	149
12	23,4	61	143
13	23,9	63	145
14	23,2	51	127
15	23,8	53	129
16	21,0	68	144
17	20,8	56	122
18	23,8	65	154
19	20,0	50	117
20	23,7	53	123

Полученные результаты проведенных экспериментов предоставили возможность математически описать закономерности роста растения для светокультуры салат. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процесса выращивания салата Латук (*Lactuca sativa* L.) гидропонным методом. В ходе настоящей работы при постоянном спектральном составе света и с изменением управляемых параметров решалась задача выявления реакции растений на режимы освещения и микроклимата. Полученная модель позволит подобрать необходимые значения параметров для оптимального периода созревания и наилучшей урожайности салата Латук (*Lactuca sativa* L.) в гидропонной установке стеллажного типа.

Список литературы

1. Аутко А.А. В мире овощей. – Минск: Технопринт, 2004. – 559с.
2. Осипова Г.С. Овощеводство защищенного грунта: Учеб. пособие. – СПб.: Проспект Науки, 2010. – 286 с.
3. Полякова М.Н., Мартиросян Ю.Ц., Диловарова Т.А., Кособрюхов А.А. Фотосинтез и продуктивность у растений базилика (*Ocimum basilicum* L.) при облучении различными источниками света // Сельскохозяйственная биология. – 2015. – Т. 50. – №1. – С. 124-130.
4. Ракутько Е.Н., Ракутько С.А. Сравнительная оценка эффективности источников излучения по энергоемкости фотосинтеза // Инновации в сельском хозяйстве. 2015. № 2 (12). – С. 50–54.
5. Ракутько С.А. Энергетическая оценка и оптимизация биотехнических сельскохозяйственных систем // Вестник РАСХН. 2009. №4. – С. 89–92.
6. Яковцева М.Н., Говорова Г.Ф., Тараканов И.Г. Фотоморфогенетическая регуляция роста, развития и продукционного процесса растений земляники садовой (*Fragaria x Ananassa* L.) в условиях светокультуры // Известия ТСХА. – 2015. – №3. – С. 25-35.;
7. Maisonneuve B, Chupeau M. C., Bellec Y. et al. Sexual and somatic hybridization in the genus *Lactuca* // Euphytica. — 1995. — V. 85, N 1–3. — P. 281–285.

05.13.18

Н.А. Пшеничникова, Н.В. Пешков канд. физ.-мат. наук, В.А. Ильных канд. техн. наук

Забайкальский институт железнодорожного транспорта - филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»,
кафедра «Прикладная механика и математика»,
Чита, starka_nadya@mail.ru, peshkovn@mail.ru, ilinykh.viktor5@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ ПРИ ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ

В статье ставится задача проанализировать погрешность формы деталей профильных моментопередающих соединений в результате демонтажа, тем самым определить момент «непригодности» детали при использовании метода кумулятивных сумм, как одного из методов по обнаружению разладки. Моментом непригодности деталей является невозможность ее дальнейшей эксплуатации в моментопередающем соединении прецизионного узла машины. В статье определяется среднее время задержки и среднее время между ложными тревогами, выбирается оптимальный уровень μ . В результате численного моделирования находится среднее значение момента разладки.

Ключевые слова: профильный вал, метод кумулятивных сумм, среднее время между ложными тревогами, среднее время задержки, математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение, погрешность формы.

Во многих промышленных странах на сегодняшний день нашли применение профильные моментопередающие соединения, которые используются в различных механизмах машин и станков, например: «Pitler», «Bamesberger», в двигателях строительных машин «Volvo», кузнечно-прессовом оборудовании, а также в инструментальных системах «Heinlein» и др. [1,2] В процессе эксплуатации данные соединения подвергаются значительному износу [3]. В результате демонтажа соединений можно наблюдать изменение жесткости конического стыка (рис. 1) [3-5] и как следствие потерю работоспособности профильного соединения в результате отказа в узлах механизмов, машин и станков. Для своевременного определения «непригодности детали» при воспроизведении ее геометрической формы существует несколько подходов, которые используются в решении данной задачи [6]. Одним из них является применение метода кумулятивных сумм [7].

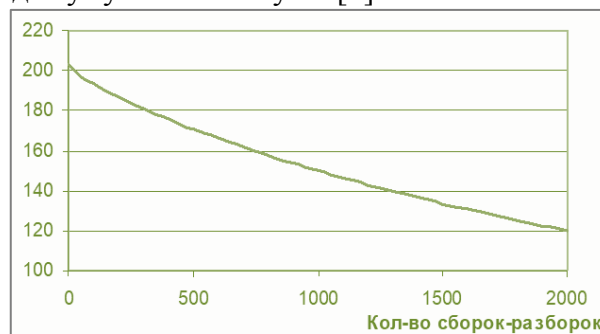


Рис. 1– Изменение жесткости конического стыка, Н/мм [4]

Основными параметрами метода кумулятивных сумм являются среднее время задержки в обнаружении разладки и среднее время между ложными тревогами.

Пусть S_0 будет любое число из интервала $[1, \mu]$, $\mu > 1$ и

$$S_n = \max \left\{ 1, S_{n-1} \cdot \frac{p_1(x_n)}{p_0(x_n)} \right\}, n \geq 1, (1)$$

тогда регистрация момента разладки происходит в момент, когда текущее значение

случайной последовательности S_n впервые пересекает некоторый заранее выбранный уровень μ (рис 2).

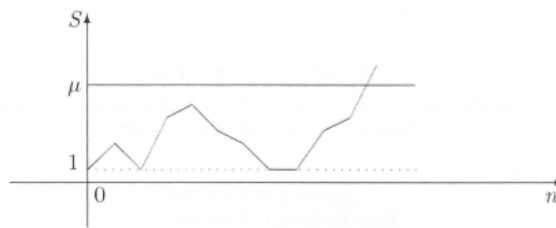


Рис 2– Поведение последовательности S_n [7]

Основная задача метода состоит в том, чтобы из практических соображений выбрать оптимальный уровень μ . Он должен быть выбран так, чтобы среднее время задержки было сведено к минимуму, а среднее время между ложными тревогами было максимальным.

Анализ характера распределения случайных величин – значений отклонений формы с использованием критерия Пирсона позволяет сделать вывод о нормальном распределении этих случайных величин для каждого горизонта измерений.

Таким образом, не нарушая общности, будем считать, что значения отклонений от идеальной формы – случайные величины $x_1, x_2, \dots, x_n$ распределены до и после наступления момента разладки по нормальному закону с плотностями:

$$p_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-a_0)^2}{2\sigma^2}\right) \text{ и } p_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-a_1)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

Согласно требованиям, к качеству точности изготовления деталей, верхний и нижний предел значений отклонений диаметральных размеров для деталей типа вал равен +25мкм и +9 мкм соответственно при шероховатости поверхности равной 0,4 мкм [8].

Таким образом, в нашей модели:

$a_0 = 17 \text{ мкм}$ – среднее значение отклонений от идеальной формы новых деталей;

$a_1 = 9 \text{ мкм}$ – среднее значение отклонений от идеальной формы технологически непригодных деталей;

$\sigma_0 = \sigma_1 = 0,4 \text{ мкм}$

Рассматривается случай, когда $a_1 < a_0$. Тогда среднее время задержки при определении момента разладки будет находиться [7] по формуле (3):

$$\pi_1(x) = P_1 \left\{ x_1 \leq \frac{a_1 + a_0}{2} + \frac{\sigma^2 \ln(\mu/x)}{a_1 - a_0} \right\} = F \left(\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} - \frac{\sigma \ln(\mu/x)}{a_0 - a_1} \right) \quad (3)$$

где $F(x) = \int_{-\infty}^x \varphi(t)dt$, $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2)$ – функция и плотность распределения стандартного нормального закона соответственно.

Для $n \geq 2$

$$\pi_n(x) = \pi_{n-1}(1) \left[1 - F \left(\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} + \frac{\sigma \ln x}{a_0 - a_1} \right) \right] + \int_{\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} - \frac{\sigma \ln(\mu/x)}{a_0 - a_1}}^{\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} + \frac{\sigma \ln(x)}{a_0 - a_1}} \pi_{n-1} \left(x e^{-\frac{t(a_0 - a_1)}{\sigma} - \frac{(a_1 - a_0)^2}{2\sigma^2}} \right) \varphi(t) dt \quad (4)$$

а среднее время между ложными тревогами будет определяться:

$$\tilde{\pi}_1 = F \left(-\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} - \frac{\sigma \ln(\mu/x)}{a_0 - a_1} \right) \quad (5)$$

Для $n \geq 2$

$$\tilde{\pi}_n(x) = \tilde{\pi}_{n-1}(1) \left[1 - F \left(\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} - \frac{\sigma \ln x}{a_1 - a_0} \right) \right] + \int_{\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} - \frac{\sigma \ln(\mu/x)}{a_0 - a_1}}^{-\frac{a_0 - a_1}{2\sigma} + \frac{\sigma \ln x}{a_0 - a_1}} \tilde{\pi}_{n-1} \left(x e^{-\frac{t(a_1 - a_0)}{\sigma} - \frac{(a_1 - a_0)^2}{2\sigma^2}} \right) \varphi(t) dt \quad (6)$$

Исходными данными для моделирования являлись результаты замеров погрешностей формы 20 контрольных деталей профильных соединений. Замеры производились на каждой 100 технологической сборке-разборке. Для каждого μ рекуррентным способом с использованием формул (3-6) по каждой контрольной детали произведен расчет π , $\tilde{\pi}$. После это вычислялись средние значения π и $\tilde{\pi}$ по всем деталям для каждого μ . Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты расчетов μ , π_n , $\tilde{\pi}_n$

μ	π_n	$\tilde{\pi}_n$
2	0,008	0,001
5	0,02	0,07
10	0,09	0,15
20	0,17	0,31
35	2,7	3,3
50	5,2	4,8

Из проведенного анализа, с применением метода кумулятивных сумм, можно сделать вывод, что из технологической целесообразности, а именно: рациональным соотношением между средним временем запаздывания в обнаружении разладки и средним временем между ложными тревогами является оптимальное значение μ равное 20.

Подставив найденное значение μ в рекуррентный алгоритм (1), определяем момент разладки методом кумулятивных сумм по каждому контрольному образцу. Среднее значение момента разладки $\tau = 6,85$. Таким образом результаты моделирования для данного типа деталей свидетельствуют о том, что наиболее вероятный момент разладки в диапазоне 600-700 разъемов соединений.

Список литературы

1. *Ильиных В.А.* Расчет и выбор конструктивных параметров профильных соединений с равноосным контуром: Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.02.02 / Ильиных Виктор Анатольевич. М.: МВТУ, 1987. 185 с.
2. *Рожкова Е. А.* Теория и методы проектирования профильных неподвижных неразборных соединений с равноосным контуром с натягом: дис. ... канд. тех. наук: 05.02.02 / Рожкова Елена Александровна. – Братск: Братский государственный университет, 2014. – 181 с.
3. *Линейцев В.Ю., Ильиных В.А.* Учет износа при имитационном моделировании сборки РК-3 профильных конических соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 26-30.
4. *Линейцев В.Ю.* Контактная прочность, жесткость и точность разъемных неподвижных конических соединений в инструментальных системах: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Линейцев Владимир Юрьевич. – Иркутск, 2006. – 184 с.
5. *Линейцев В.Ю., Ильиных В.А.* Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 2 (46). С. 51-55.
6. *Пшеничникова Н.А.* Корреляционно-спектральный анализ погрешности формы деталей профильных соединений / Н. А. Пшеничникова, В. А. Ильиных, В. Ю. Линейцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2018. — Т. 58, № 1. — С. 40–45.
7. *Mazalov V.V.* METHOD OF CUMULATIVE SUMS AND PROBLEMS OF OPTIMAL CONTROL BY TECHNOLOGICAL PROCESSES // International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering. 1997. Т. 7. № 2. С. 219-229.
8. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора – машиностроителя: Т.1. – 8-е изд., перераб. и доп. / В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – 920 с.: ил.

АННОТАЦИИ
ABSTRACTSК.Г. Николаев, Б.Н. Иванов, Э.Р. Магдеев, Р.Х. Шагимуллин,
В.С. МинкинХИМИЧЕСКИЙ И ФИЗИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В
ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ
СООБЩЕНИЕ 1. ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ПРИМЕНЕНИЯ*Ключевые слова:* химический резонанс, физический резонанс, химическая технология, движение.*Статья продолжает и развивает цикл многолетних работ [1-21] по исследованию общности и отличия физических и химических видов взаимодействия применительно к важнейшим процессам химической технологии и универсальным приемам их осуществления.**Настоящая статья посвящена раскрытию некоторых теоретических и практических аспектов физического и химического резонансов в химико-технологических процессах и в способах их осуществления; их связи и перспективах применения.*

М.М. Сорокина

О СУЩЕСТВОВАНИИ $\mathcal{F}_\Omega$ -ПРОЕКТОРОВ В КОНЕЧНЫХ
ГРУППАХ*Ключевые слова:* конечная группа, класс групп, $\mathcal{F}_\Omega$ -проектор. В работе изучаются $\mathcal{F}$ -подгруппы конечных групп, где $\mathcal{F}$ – некоторый класс конечных групп. Доказано существование $\mathcal{F}_\Omega$ -проекторов в конечной группе G для класса $\mathcal{F}$, являющегося Ω -примитивно замкнутым гомоморфом, где Ω – произвольный непустой класс конечных простых групп.Е.В. Спиридонова, Н.А. Гамова, Н.В. Кулиш, И.П. Томина
ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УЧАСТКОВ РАЗВИТИЯ И
СТАГНАЦИИ ПЛОСКИХ ТРЕЩИН В СМЕШАННОЙ
ПОСТАНОВКЕ*Ключевые слова:* трещина на плоскости, смешанные краевые условия, развитие трещины, стагнация трещины, коэффициенты интенсивности напряжений.*В настоящей статье описывается принцип построения участков развития и стагнации трещин на плоскости со смешанными краевыми условиями, заданными на ее берегах. Получено соотношение, которое позволяет контролировать взаимосвязь между коэффициентами аппроксимации, для которых возможно построение таких областей.*В.Г. Шармин, Д.В. Шармин, Е.А. Дмитриева
СТРОЕНИЕ МНОЖЕСТВА АКСИАЛЬНЫХ ТОЧЕК
ПОВЕРХНОСТИ БЕЗ КРУЧЕНИЯ*Ключевые слова:* поверхность, коэффициенты кручения, аксиальная точка, каноническая система нормалей.*В статье изучаются свойства поверхностей в многомерном евклидовом пространстве. Получены необходимые условия принадлежности поверхности некоторому подпространству объемлющего пространства, а также выяснено строение множества аксиальных точек поверхности без кручения.*А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов, Л.А. Гайнуллова
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В
ЦЕНТРАЛЬНО - СИММЕТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ*Ключевые слова:* дифференциальные уравнения, физические законы, центрально-симметрическое поле, логарифмическая спираль.*В данной работе рассмотрено движение точки в центрально-симметрическом поле. Показано, что в зависимости от начальных условий точка либо удаляется от центра поля, либо к нему приближается.*K.G. Nikolaev, B.N. Ivanov, E.R. Magdeev, R.H. Shagimullin,
V.S. MinkinCHEMICAL AND PHYSICAL RESONANCE IN
CHEMICAL PROCESSES AND TECHNOLOGIES
MESSAGE 1. FEATURES AND PERSPECTIVES OF
APPLICATION*Keywords:* chemical resonance, physics resonance, chemical engineering, movement.*The article continues and develops a series of durable works [1-21] on the study of similarities and differences of physical and chemical interactions in relation to the most important processes of chemical technology and universal methods of their realization.**This article is devoted to the disclosure of some theoretical and practical aspects of physical and chemical resonances in chemical processes and methods of their implementation; their relationship and application perspectives.*

M.M. Sorokina

ON EXISTENCE OF $\mathcal{F}_\Omega$ -PROJECTORS IN FINITE GROUPS*Keywords:* finite group, class of groups, $\mathcal{F}_\Omega$ -projector. In this paper we study $\mathcal{F}$ -subgroups of finite groups where $\mathcal{F}$ is a certain class of finite groups. The existence of $\mathcal{F}_\Omega$ -projectors in a finite group G for the class $\mathcal{F}$, which is an Ω -primitively closed homomorph, where Ω is an arbitrary non-empty class of finite simple groups, is proved.E.V. Spiridonova, N.A. Gamova, N.V. Kulish, I.P. Tomina
THE PRINCIPLE OF CONSTRUCTION OF AREAS OF
DEVELOPMENT AND STAGNATION OF FLAT CRACKS
IN THE MIXED STATEMENT*Keywords:* flat crack, mixed boundary conditions, crack development, crack stagnation, stress intensity factors.*This article describes the principle of construction of areas of development and stagnation of cracks on the plane with mixed boundary conditions specified on its banks. A relation is derived that allows you to control the relationship between the coefficients of approximation for which it is possible to build such areas.*V.G. Sharmin, D.V. Sharmin, E.A. Dmitrieva
THE STRUCTURE OF THE SET OF AXIAL POINTS OF
THE SURFACE WITHOUT TORSION*Keywords:* surface, torsion coefficients, axial point, canonical system of normals.*The article studies the properties of surfaces in multidimensional Euclidean space. The necessary conditions for the belonging of a surface to a certain subspace of the ambient space are obtained. The structure of the set of axial points of surfaces without torsion is studied.*A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov, L.A. Gainulova
MATHEMATICAL MODELING OF MOTION IN A
CENTRALLY SYMMETRIC FIELD*Keywords:* differential equation, physical law, the central symmetric field, logarithmic spiral.*In this paper, the motion of a point in a centrally symmetric field is considered. It is shown that, depending on the initial conditions, the point either moves away from the center of the field, or approaches it.*

Г.Е. Бордина, Н.П. Лопина, Е.Г. Некрасова, Е.В. Ожимкова,
А.Е. Соболев

ИК-СПЕКТРОСКОПИЯ ЭФИРНЫХ МАСЕЛ

Ключевые слова: эфирные масла, ИК-спектроскопия, характеристические частоты, органолептические свойства. Эфирные масла обладают множеством полезных свойств, поэтому пользуются большим спросом на фармацевтическом рынке. Многие производители идут на ухищрения, чтобы увеличить выпуск конечной продукции. Проблема фальсификации на сегодняшний день особенно актуальна. Пользование фальсифицированными эфирными маслами неблагоприятно сказывается на здоровье человека.

Н.Я. Есина, М.Н. Курасова, О.И. Андреева, М.В. Тачаев,
И.И. Кожухова, Ци Шэнхуа, А.А. Годзишевская,
Е.С. Митрофанова

КОМПЛЕКСНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ Cu(II), Ni(II), Rh(III) И Ir(IV) С ГИСТИДИНОМ

Ключевые слова: родий, иридий, гистидин, координационные соединения, аминокислота.

Синтезированы комплексные соединения $\text{Cu}(\text{Hist})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{Hist})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Rh}(\text{HistH})_2\text{Cl}_3$ и $\text{Ir}(\text{HistH})\text{Cl}_4$. Выделенные соединения охарактеризованы методами химического, рентгеноспектрального, термogravиметрического анализов и ИК-спектроскопией. Определен способ координации лиганда ионами некоторых переходных металлов.

В.В. Семченко, Е.А. Зеленская, Н.П. Шабельская, А.С. Деева,
А.И. Мущоряпов

СИНТЕЗ И ФАЗООБРАЗОВАНИЕ В СИСТЕМЕ V – Al – O

Ключевые слова: оксид ванадия, оксид алюминия, синтез оксидных соединений.

В работе изучен процесс фазообразования в сложной оксидной системе V–Al–O. Показана принципиальная возможность синтеза композиционного материала состава $\text{V}_2\text{O}_5 - \text{Al}_2\text{O}_3$ с применением в качестве органического восстановителя лимонной кислоты. Предложен механизм формирования фазового состава образцов в процессе синтеза и дополнительной термообработки при температурах 700 и 900 °C.

Е.А. Смирнова

РАСТВОР ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ТРАВЛЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Ключевые слова: химическое селективное травление, состав травильных растворов, нержавеющая сталь, медь.

В работе представлены результаты изучения влияния состава растворов на качество обработки поверхности изделий, емкость травильных растворов и скорость селективного травления нержавеющих сталей, находящихся в контакте с медью.

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков ЭФФЕКТ ПЛАСТИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СМАЗАННОЙ МАГНИТНЫМ МАСЛОМ

Ключевые слова: магнитные смазочные материалы, поверхностные эффекты, управление трением, трение, износ. Изложены результаты исследования особенностей проявления адсорбционного пластифицирования стали под действием магнитных смазочных сред, в присутствии неоднородного магнитного поля. Установлено что пластифицирующее действие существенно снижает микротвердость поверхности по глубине и его значение стремится к насыщению через несколько часов.

G.E. Bordina, N.P. Lopina, E.G. Nekrasova, E.V. Ojimkova,
A.E. Sobolev

IR-SPECTROSCOPY OF ESSENTIAL OILS

Keywords: essential oils, quality, alternative medicine. Today's society is experiencing an unprecedented surge of interest in alternative and traditional medicine. The value of essential oils increases when worsens psychological atmosphere, the ecological situation and geomagnetic conditions.

Essential oils have many beneficial properties, so are in great demand in the international market. Many manufacturers go to lengths to increase the production of the final product. The problem of falsification of today is particularly relevant. Use of counterfeit essential oils adversely affects the health.

N.Y. Esina, M.N. Kurasova, O.I. Andreeva, M.V. Tachaev,
I.I. Kozhuhova, Tci Shenhua, A.A. Godzishevskaya,
E.S. Mitrofanova

COMPLEX COMPOUNDS OF Cu(II), Ni(II), Rh(III) AND Ir(IV) WITH HISTIDINE

Keywords: rhodium, iridium, histidine, complex compounds, amino acid.

$\text{Cu}(\text{Hist})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ni}(\text{Hist})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Rh}(\text{HistH})_2\text{Cl}_3$ и $\text{Ir}(\text{HistH})\text{Cl}_4$ were synthesized. The isolated compounds were characterized by chemical, X-ray, thermogravimetric analyzes and IR-spectroscopy. A method of coordination the ligand by ions of certain transition metals has been determined.

V.V. Semchenko, E.A. Zelenskaya, N.P. Shabel'skaya,
A.S. Deeva, A.I. Mushoryapov

SYNTHESIS AND PHASE FORMATION IN THE SYSTEM V – Al – O

Keywords: vanadium oxide, aluminum oxide, synthesis of oxide compounds

The process of phase formation in a complex oxide system V–Al–O is studied. The principal possibility of synthesis of the composite material $\text{V}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3$ with the use of citric acid as an organic reducing agent is shown. The mechanism of formation of phase composition of samples in the process of synthesis and additional heat treatment at temperatures of 700 and 900 °C is proposed.

Е.А. Смирнова

SOLUTION FOR SELECTIVE ETCHING STAINLESS STEEL

Keywords: chemical selective etching, etching solution composition, stainless steel, copper.

The paper presents the results of studying the influence of the composition of solutions on the quality of surface treatment of products, the capacity of etching solutions and the rate of selective etching of stainless steels in contact with copper.

А.Н. Болотов, О.О. Новикова, В.В. Новиков THE EFFECT OF PLASTICIZATION OF THE SURFACE OF THE LUBRICATED MAGNETIC OIL

Keywords: magnetic lubricants, surface effects, friction control, friction, wear.

The paper presents the results of a study of the features of adsorption plasticization of steel under the action of magnetic lubricating media in the presence of a non-uniform magnetic field. It is found that the plasticizing effect significantly reduces the microhardness of the surface in depth and its value tends to saturation in a few hours.

А.П. Буйносов, С.И. Лаптев
СПОСОБ ОЦЕНКИ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ
ПРОВЕДЕНИИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ
ЛОКОМОТИВОВ

Ключевые слова: подвижной состав, техника, локомотив, диагностика, проведение, результат, достоверность, оценка, способ.

В статье предложен новый способ оценки достоверности полученных результатов при проведении технической диагностики узлов подвижного состава в сервисном локомотивном депо. Выполнена верификация на основе анализа потока отказов электровозов ВЛ10 и ВЛ11.

Л.В. Быков, О.А. Пашков
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕЧЕНИЯ ЗА
СПУСКАЕМЫМ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ
СЕГМЕНТАЛЬНО-КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Ключевые слова: спускаемый аппарат, вычислительная газодинамика и теплообмен, турбулентность, отрывные зоны. Представлены расчетные параметры течения в отрывной зоне, образующейся вблизи поверхности обтекаемого высокоскоростным потоком сегментально-конического тела, полученные с помощью математической модели, основанной на решении уравнений газодинамики, дискретизованных по методу конечного объема. Уравнения решались на нерегулярной сетке совместно с уравнениями переноса массы для каждого компонента смеси, дифференциальным уравнением теплопроводности и уравнением модели лучистого теплообмена. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными ЦАГИ. Сделаны выводы о корректности работы использованной математической модели.

Т.Н. Иванова
ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТЬ АБРАЗИВНОГО ЗЕРНА ПРИ
ОДНОПРОХОДНОМ И МНОГОПРОХОДНОМ
ШЛИФОВАНИИ

Ключевые слова: многопроходное шлифование, однопроходное шлифование, износ зерен, стойкость абразивного инструмента, температура в зоне резания, скорость нагревания.

Исследованы стойкость абразивного инструмента, скорость изменения температуры, градиенты скоростей термических процессов при однопроходном и многопроходном шлифовании. Выявлено, что для многопроходного шлифования характерно разрушение зерен под действием высоких температур и напряжений. При однопроходном шлифовании износ зерен происходит под действием микрорезания. Уменьшение температуры, возникающей в зерне, за 1 оборот шлифовального круга возможно при увеличении теплофизических параметров абразивного слоя. При многопроходном шлифовании максимальные значения температуры зерна и глубины ее распространения выше, чем при однопроходном. Увеличение скорости нагрева зерна зависит от увеличения плотности теплового потока, уменьшения роста тепловой активности зерна, обрабатываемой детали и времени нагревания. При удалении точки от поверхности зерна скорость нагревания уменьшается, и смещение максимума происходит в сторону увеличения времени.

Н.В. Козулько, К.В. Семиниченко
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ
АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)

Ключевые слова: абразивная обработка, композиционные материалы, зернистость абразива, лепестковый круг, шлифовальная шкурка, микропрофиль поверхности.

В работе представлены результаты исследования процесса окончательной абразивной обработки деталей из ПКМ с применением гибкого шлифовального инструмента. Цель исследования заключается в повышении эффективности

А.Р. Буиносов, С.И. Лаптев
METHOD OF ESTIMATION OF RELIABILITY OF
RESULTS AT CARRYING OUT TECHNICAL
DIAGNOSTICS OF LOCOMOTIVES

Keywords: rolling stock, machinery, locomotive, diagnostics, performance, result, reliability, evaluation, method.

This paper proposes a new method of assessing the reliability of the results obtained when carrying out technical diagnostics of nodes of the rolling stock in service the locomotive depot. Verification is performed on the basis of the analysis of the failure flow of electric locomotives VL10 and VL11.

L.V. Bykov, O.A. Pashkov
STUDY OF THE PARAMETERS OF THE FLOW FOR THE
DOWNLOADED SPACE EQUIPMENT SEGMENTAL-
CONICAL FORM

Keywords: descent vehicle, computational gas dynamics and heat transfer, turbulence, tear-off zones.

The design parameters of the flow in the separation zone formed near the surface of a segmental-conical body streamlined by a high-speed flow are presented using a mathematical model based on solving the equations of gas dynamics discretized by the finite volume method. The equations were solved on an irregular grid together with the mass transfer equations for each component of the mixture, the differential heat equation and the radiative heat transfer model equation. A comparison of the simulation results with the experimental data of TsAGI was carried out.

T.N. Ivanova
THE HEAT RELEASE RATE OF THE ABRASIVE GRAIN
DURING SINGLE-PASS AND MULTI-PASS GRINDING
Keywords: multi-pass grinding single-pass grinding, the wear of grains, durability of the abrasive tool, the temperature in the cutting zone, the heating rate

The durability of the abrasive tool, the rate of temperature change, the rate gradients of thermal processes in single-pass and multi-pass grinding are investigated. It is revealed that multi-pass grinding is characterized by the destruction of grains under the influence of high temperatures and stresses. In single pass grinding grain wear occurs under the influence of micro-cutting. Reducing the temperature arising in the grain for 1 revolution of the grinding wheel is possible by increasing the thermal parameters of the abrasive layer. In multi-pass grinding, the maximum values of grain temperature and depth of its propagation are higher than in single-pass grinding. The increase in the grain heating rate depends on the increase in the heat flux density, the decrease in the growth of the thermal activity of the grain, the workpiece and the heating time. When the point is removed from the grain surface, the heating rate decreases, and the maximum displacement occurs in the direction of increasing time.

N.V. Kozulko, K.V. Seminichenko
RESEARCH OF PROCESS OF FINAL ABRASIVE
PROCESSING OF DETAILS FROM THE POLYMERIC
COMPOSITE MATERIALS (PCM)

Keywords: abrasive processing, composite materials, granularity of abradant, petal circle, emery paper, microsurface profile.

In work results of probe of process of final abrasive processing of details of PKM with use of the flexible grinding tool are presented. The research objective consists in increase in efficiency of process of preparation of surfaces of details of

процесса подготовки поверхностей деталей из ПКМ к склеиванию и повышение качества обработки путем замены ручного труда на механизированный. Описаны параметры поверхности, влияющие на формирование качественного клевого соединения.

В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, С.Н. Антропов
ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
С УЧЕТОМ МИНИМУМА ЗАТРАТ ПРИ УСЛОВИИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ НАДЕЖНОСТИ

Ключевые слова: подвижной состав, узел, надежность, работоспособность, восстановление, затраты, учет, обеспечение, уровень, минимум, технология, условие, выбор.

В статье рассматривается выбор наилучшей технологии восстановления работоспособности узлов с точки зрения минимума затрат на техническое обслуживание и ремонт подвижного состава при условии обеспечения требуемого уровня надежности, т. е. обеспечение требуемого уровня надежности и сокращение затрат на поддержание работоспособности железнодорожного подвижного состава.

А.Л. Яблонев, А.М. Гусева
О КОРРЕЛЯЦИОННОЙ СВЯЗИ ПЛОТНОСТИ И ПРОЧНОСТИ
НА ИЗГИБ КУСКОВОГО ТОРФА, ПОЛУЧАЕМОГО В
ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ ШНЕКОВЫМ ПРЕССОМ

Ключевые слова: кусковой торф, шнековый пресс, плотность, прочность на изгиб, коэффициент корреляции.

В работе представлены результаты экспериментов по определению плотности и прочности кускового торфа, произведенного в ходе формования шнековым прессом. Выполнен корреляционный анализ данных. Выявлена тесная связь между ними. Получены аппроксимирующие выражения, связывающие плотность и прочность кускового торфа.

Н.А. Абышев, А.В. Ключников
К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ТОЧНОСТИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТЕНДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МСИХ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОД
АСТАТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Ключевые слова: летательный аппарат, контрольно-измерительный стенд, астатический маятник, массо-инерционные характеристики, эталон, погрешность измерений. Рассмотрена методика оценки метрологических характеристик стенда, предназначенного для контроля массо-центровочных и массо-инерционных характеристик летательных аппаратов в заданных диапазонах измерений параметров. Оценка выполняется по результатам контроля эталонных параметров массо-инерционной асимметрии, моделируемых с помощью специализированного рабочего эталона, представляющего собой массо-габаритный макет летательного аппарата, и контрольных грузов.

М.Е. Калинкина, А.С. Козлов, Р.Я. Лабковская,
О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков
РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ

Ключевые слова: математическая модель, чувствительный элемент, датчик давления, тензорезистор, микроэлектромеханические системы.

Статья посвящена разработке математической модели тензорезистивного чувствительного элемента интеллектуального датчика для измерения давления. В работе рассмотрен имитационный метод моделирования по двум факторам воздействия (температуре и давлению). Полученные алгоритмы и программное обеспечение с использованием MATLAB дали возможность говорить о корректности и адекватности проведенного математического моделирования.

ПКМ for pasting and improvement of quality of processing by replacement of manual work by mechanized. The surface parameters influencing formation of high-quality glue joint are described.

V.S. Nagovitsyn, A.P. Buinosov, S.N. Antropov
THE CHOICE OF TECHNOLOGY FOR RESTORATION OF
KNOTS OF ROLLING STOCK TAKING INTO ACCOUNT
THE MINIMUM COST WHILE ENSURING THE
REQUIRED LEVEL OF RELIABILITY

Keywords: rolling stock, unit, reliability, performance, recovery, costs, accounting, maintenance, level, minimum, technology, condition, choice.

The article considers the choice of the best technology for restoring the efficiency of nodes from the point of view of the minimum cost of maintenance and repair of the rolling stock, provided the required level of reliability, i.e. ensuring the required level of reliability and reducing the cost of maintaining the efficiency of the railway rolling stock.

A.L. Yablonev, A.M. Guseva
ON THE CORRELATION OF DENSITY AND FLEXURAL
STRENGTH SOD PEAT OBTAINED IN THE PROCESS OF
SCREW PRESS FORMATION

Keywords: sod peat, screw press, flexural strength, density, coefficient of correlation.

The paper presents the results of experiments on the determination of density and durability sod peat produced during screw molding press. Correlation analysis of data produced. Revealed a close relationship between them. Received approximating mathematical model linking the density and strength of peat on a bend.

N.A. Aбышев, A.V. Klyuchnikov
TO THE ISSUE ABOUT ESTIMATION OF FUNCTIONAL
PRECISION OF A STAND, WHICH IS INTENDED FOR
DEFINITION THE MASS-INERTIA CHARACTERISTICS
OF FLYING VEHICLES BY THE ASTATIC PENDULUM
METHOD

Keywords: flying vehicle, testing stand, astatic pendulum, mass-inertia parameters, standard, error of measurements. Methods of estimation metrological characteristics of a testing stand, which is intended for definition the flying vehicles' mass-inertia parameters into determining ranges, is considered in the article. Estimation makes with results of definition of mass-inertia asymmetry standard parameters. Modeling of the mass-inertia asymmetry standard parameters makes with assistance of flying vehicle's working standard and standard plummets. The flying vehicle's working standard imitates a mass-gabarit mock-up of the flying vehicle.

M.E. Kalinkina, A.S. Kozlov, R.Ya. Labkovskaya,
O.I. Pirozhnikova, V.L. Tkach, N.A. Shmakov
DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF
THE SENSITIVE ELEMENT OF THE PRESSURE SENSOR

Keywords: mathematical model, sensitive element, pressure sensor, strain gauge, microelectromechanical systems.

The article is devoted to the development of a mathematical model of the strain-measuring sensitive element of an intelligent sensor for measuring pressure. The paper discusses the simulation method of modeling for two factors (temperature and pressure). The obtained algorithms and software using MATLAB made it possible to talk about the correctness and adequacy of the conducted mathematical modeling.

М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Д.И. Медведков,
О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков
РАЗРАБОТКА БИБЛИОТЕКИ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Ключевые слова: чувствительный элемент, система
автоматизированного проектирования, микромеханический
прибор.

Объектом исследования и разработки являются мембранные и балочные плоские тонкостенные чувствительные элементы микроакселерометров, микрогироскопов и интегральных датчиков давления. На основе всестороннего анализа существующих численных методов расчета оболочечных и тонкостенных элементов осуществлена разработка новых алгоритмов и модифицированных методик расчета чувствительных элементов микромеханических приборов. Для этого сформирована библиотека конечных элементов для мембранных и балочных чувствительных элементов микромеханических приборов.

М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Н.Ю. Коновалов,
О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков
ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И
ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ПРИБОРОВ

Ключевые слова: микромеханические приборы, чувствительный элемент, акселерометр, гироскоп, метод конечных элементов. Проведён анализ влияния электростатических воздействий на смещение чувствительного элемента микромеханических приборов с учетом различных температурных воздействий окружающей среды. Получены выражения для установившейся зависимости между параметрами движения, в частности измеряемым ускорением в микромеханических акселерометрах, величиной отклонения чувствительного элемента и емкости между обкладкой конденсатора и подложкой (также играющей роль обкладки конденсатора). Предложен метод, который в свою очередь, увеличивает точность измерения микроприборов.

М.Е. Калинкина, А.Г. Коробейников, Р.Я. Лабковская,
О.И. Пирожникова, В.Л. Ткалич, Н.А. Шмаков
АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ
ДАВЛЕНИЯ С ТЕРМОСТАБИЛЬНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ
ЭЛЕМЕНТОМ

Ключевые слова: микромеханические приборы, датчики давления, чувствительный элемент, температурная погрешность.

В работе проведён анализ дестабилизирующих факторов от ряда температурных, вибрационных и ударных нагрузок и выявлено, что основной причиной появления неравномерности в процессе изменения сопротивления являются диффузные флуктуации в тонкопленочной гетероструктуре чувствительного элемента под воздействием нестационарных тепловых потоков. Рассмотрены возможные пути снижения температурной погрешности как за счёт правильного подбора материала сплавов тензорезисторов так и путем разработки новых модифицированных схем и технологий изготовления термостабильных тонкопленочных тензорезисторов.

С.С. Капитонов, С.Ю. Прытков, С.Ю. Григорович,
А.В. Капитонова, С.А. Медведев, Н.П. Слугина
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЦВЕТОВОЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ И СПЕКТРА ИЗЛУЧЕНИЯ
СВЕТОДИОДНЫХ СВЕТИЛЬНИКОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ
ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ключевые слова: светодиодный светильник, электрический режим эксплуатации, питающий ток, спектр излучения, цветовая температура.

M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, D.I. Medvedkov,
O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov
DEVELOPMENT OF LIBRARY OF FINAL ELEMENTS
FOR CREATING AUTOMATED DESIGN SYSTEMS OF
SENSITIVE ELEMENTS OF MICROMECHANICAL
DEVICES

Keywords: sensitive element, micromechanical device, microelectromechanical systems.

The object of research and development are membrane and beam flat thin-walled sensitive elements of microaccelerometers, microgyros and integral pressure sensors. Based on a comprehensive analysis of existing numerical methods for calculating shell and thin-walled elements, the development of new algorithms and modified methods for calculating sensitive elements of micromechanical devices has been carried out. For this purpose, a library of finite elements for membrane and beam sensitive elements of micromechanical devices has been formed.

M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, N.Yu. Kononov,
O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov
EFFECT OF ELECTROSTATIC IMPACTS AND
TEMPERATURE FACTOR ON DEFORMATION OF THE
SENSITIVE ELEMENT OF MICROMECHANICAL
DEVICES

Keywords: micromechanical devices, sensitive element, accelerometer, gyroscope, finite element method.

The analysis of the effect of electrostatic effects on the displacement of the sensitive element of micromechanical devices, taking into account various temperature effects of the environment. Expressions are obtained for establishing the relationship between the motion parameters, in particular, the measured acceleration in micromechanical accelerometers, the deviation of the sensitive element and the capacitance between the capacitor plate and the substrate (also playing the role of a capacitor plate). A method is proposed which, in turn, increases the accuracy of measuring micro-devices.

M.E. Kalinkina, A.G. Korobeynikov, R.Ya. Labkovskaya,
O.I. Pirozhnikova, V.L. Tklich, N.A. Shmakov
ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF INTEGRAL
PRESSURE SENSORS WITH A THERMOSTABLE
SENSITIVE ELEMENT

Keywords: micromechanical devices, pressure sensors, sensitive element, temperature error.

In this paper, an analysis of destabilizing factors from a number of temperature, vibration and shock loads was carried out, and it was found that the main cause of non-uniformity in the process of resistance change is diffuse fluctuations in the thin-film heterostructure of the sensitive element under exposure to non-stationary heat fluxes. The possible ways of reducing the temperature error are considered both due to the correct selection of the material of the alloys of the strain gauges and by developing new modified schemes and technologies for the manufacture of thermostable thin-film strain gauges.

S.S. Kapitonov, S.V. Prytkov, S.Yu. Grigorovich,
A.V. Kapitonova, S.A. Medvedev, N.P. Slugina
RESEARCH OF CHANGE OF COLOR TEMPERATURE
AND EMISSION SPECTRUM OF LED LUMINAIRES IN
THE COURSE OF THEIR OPERATION

Keywords: LED luminaire, electric mode of operation, the feeding current, an emission spectrum, color temperature. The research of change of an emission spectrum and color temperature of a batch of the LED luminaires released by the

В статье проведено исследование изменения спектра излучения и цветовой температуры партии светодиодных светильников, выпускаемых отечественными предприятиями, в различных электрических режимах их эксплуатации. Представлены результаты измерения спектра излучения и цветовой температуры светильников в процессе их эксплуатации на протяжении двух тысяч часов в номинальном режиме работ, в режиме токовой перегрузки и в режимах с различными значениями коэффициента пульсации питающего тока. Сделаны выводы о влиянии электрического режима работы светодиодного светильника на спектр его излучения и величину цветовой температуры. Результаты исследования будут полезны как производителям светодиодной техники, так и её потребителям.

Ю.И. Шакиров, Р.Г. Садыков, А.А. Хафизов, Р.И. Валиев
РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Ключевые слова: система электроснабжения, потери электроэнергии, надежность, подстанция.

Работа посвящена анализу схемных решений систем электроснабжения действующих нефтепромыслов. Результаты анализа режимов электропотребления показали, что с ростом электрических нагрузок нефтепромыслов отклонения напряжения в узлах нагрузки выходят за нормально допустимые пределы, что вызывает необходимость совершенствования управления режимами напряжения электрических сетей. Установлены закономерности, позволяющие сделать выводы, способствующие эффективности регулирования напряжения в системах электроснабжения нефтепромыслов.

А.В. Алабин, М.А. Свищева
ПРЕИМУЩЕСТВА СОЗДАНИЯ ПРОЕКТА
РЕКОНСТРУКЦИИ, МОДЕРНИЗАЦИИ И ДЕМОНТАЖА
ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ BIM
ТЕХНОЛОГИЙ

Ключевые слова: BIM, информационная модель здания, реконструкция, модернизация, системы автоматизированного проектирования.

В данной работе были проанализированы проекты реконструкции и модернизации строительных объектов, при создании которых применялись современные технологии информационного моделирования, с соответствующей оценкой эффективности применяемых технологий. Описаны преимущества использования современных информационных технологий проектирования строительных объектов. Основной задачей при реконструкции определена подготовка достоверной информации о строительном объекте реконструкции в короткие сроки. Рассмотрены различные методы получения информации об объекте реконструкции или модернизации. Сделан вывод о необходимости интеграции модулей подготовки информации о текущем состоянии строительного объекта при использовании информационных систем для разработки проектов реконструкции или модернизации.

Д.А. Безуглов, В.В. Воронин, С.Е. Мищенко, В.И. Юхнов
АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ КОНТУРОВ НА
ТЕЛЕВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ИСКАЖЕННЫХ
ИМПУЛЬСНЫМИ ШУМАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ

Ключевые слова: выделение контуров, сплайн-аппроксимация, модуль градиента яркости.

В работе рассмотрен новый алгоритм выделения контуров на телевизионных изображениях, искаженных импульсными шумами с использованием сплайн-аппроксимации. Проведен анализ известных алгоритмов, показаны их недостатки, заключающиеся в чувствительности к различным помехам, в том числе и импульсным, а также связанные с обнаружением многочисленных ложных замкнутых кривых. Приведены

domestic enterprises in the different electric modes of their operation is conducted in article. Results are presented measurements of an emission spectrum and color temperature of luminaires in the course of their operation for two thousand hours in the nominal mode of works, in the mode of a current overload and in the modes with different values of ripple ratio of the feeding current. Conclusions are drawn on influence of an electric operation mode of the LED luminaires on a range of its radiation and value of color temperature. Results of a research will be useful both to vendors of the LED equipment, and consumers.

Yu.I. Shakirov, R.G. Sadykov, A.A. Khafizov, R.I. Valiev
OPERATION MODES OF POWER SUPPLY SYSTEMS OF
OBJECTS OF OIL AND GAS FIELDS

Keywords: power supply system, power loss, reliability, substation.

The work is devoted to the analysis of circuit solutions of power supply systems of existing oil fields. The results of the analysis of power consumption modes showed that with the growth of electric loads of oil fields, the voltage deviations in the load nodes go beyond the normally permissible limits, which necessitates the improvement of the control of the voltage modes of electric networks. The regularities that allow to draw conclusions to contribute to the efficiency of voltage regulation in power supply systems of oil fields.

A.V. Alabin, M.A. Svishcheva
ADVANTAGES OF FACILITIES' RECONSTRUCTION,
MODERNIZATION AND DISMANTLING PROJECT
CREATION USING BIM TECHNOLOGIES

Keywords: BIM, building information model, reconstruction, modernization, automated design system.

In this paper, we analyzed and correspondingly estimated the technology effectiveness of facilities' reconstruction and modernization projects, which were created with modern information modeling technologies. Advantages of using modern information technology for designing facilities are described. The primary target of reconstruction project we defined as acquisition of reliable information about the facility in a short time. Various methods for obtaining information about the reconstructing or modernizing object are considered. It was concluded that it is necessary to integrate the information preparation modules on the current standing of a facility when using information systems for developing reconstruction or modernization projects.

D.A. Bezuglov, V.V. Voronin, S.E. Mishchenko, V.I. Yukhnov
THE ALGORITHM OF ALLOCATION OF CONTOURS ON
THE TV IMAGES DISTORTED BY IMPULSE NOISE
USING SPLINE APPROXIMATION

Keywords: allocation of contours, spline approximation, the magnitude of the gradient of brightness.

The paper considers a new algorithm for the allocation of contours on television images distorted by pulse noise using spline approximation. The analysis of known algorithms is carried out, their shortcomings consisting in sensitivity to various interferences, including pulse, and also connected with detection of numerous false closed curves are shown. The analytical expressions for calculating the magnitude of the gradient of brightness using the normalized parabolic splines.

аналитические выражения для вычисления модуля градиента яркости с использованием нормализованных параболических сплайнов. Даны рекомендации по выбору коэффициента сглаживания.

Recommendations on the choice of smoothing factor are given.

А.А. Кротких, П.В. Максимов
РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ LEVEL-SET МЕТОДА С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНОГО МЕТОДА
ШТРАФНОЙ ФУНКЦИИ

Ключевые слова: математическое моделирование, Level-set метод, топологическая оптимизация.

Работа посвящена анализу Level-set метода топологической оптимизации, обладающего рядом преимуществ в сравнении с традиционными гомогенизационными методами – SIMP и BESO. Level-set метод требует аккуратного подбора параметров оптимизации и коэффициентов штрафа для получения корректного решения. В работе представлена модификация алгоритма посредством замены метода штрафных функций эвристическим методом, который на каждой итерации подбирает нужные значения параметров. Проведено сравнение модифицированного алгоритма с оригинальным алгоритмом.

A.A. Krotkikh, P.V. Maksimov
DEVELOPMENT OF TOPOLOGY OPTIMIZATION
ALGORITHM BASE ON LEVEL-SET METHOD WITH
USING ADAPTIVE SELECTION OF PENALTY
FUNCTION PARAMETERS

Keywords: additive technology, Level-set method, topology
The work is devoted to the analysis of the Level-set method of topological optimization, which has several advantages in comparison with traditional homogenization methods - SIMP and BESO. The Level-set method requires accurate selection of optimization parameters and penalty coefficients to obtain the correct solution. The work presents a modification of the algorithm by replacing the method of penalty functions with a heuristic method, which at each iteration selects the appropriate values of parameters. The modified algorithm was compared with the original algorithm and the results were analyzed.

О.Н. Кузина
ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОИМОСТИ
ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА НА КАЖДОМ ЭТАПЕ
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Ключевые слова: жизненный цикл объекта, строительство, автоматизированное проектирование, моделирование, информационная модель, эксплуатация, переустройство

зданий, утилизация, стоимость объекта, система управления. Модели управления развитием информационной базы объекта необходимы для определения объема ресурсов и стоимости объекта строительства на каждом этапе жизненного цикла здания с учетом действующих требований к определению сметной стоимости на этапах от PRE-BIM до RE-BIM. Для разработки и внедрения системы управления стоимостью объекта в строительное производство необходимо не только определить основные уровни и параметры выбора при учете решений из организационно-технологической документации, но также построить архитектуру прикладного программного обеспечения для работы системы управления на всех последующих этапах жизненного цикла объекта строительства. Важно определить основные факторы, влияющие на принятие решений, и параметры формирования входных и выходных данных для моделирования каждого этапа жизненного цикла объекта, а также технико-экономические показатели информационной модели по стадиям.

O.N. Kuzina
INFORMATION MODELING OF CONSTRUCTION
OBJECT COST AT EACH STAGE OF LIFECYCLE
Keywords: object life cycle, construction, computer-aided design, modeling, information model, operation, reconstruction of buildings, utilization, facility management, cost management, control system.

Project information base development is necessary for determination of volume of resources and cost at each stage of project life cycle taking into account the existing requirements to determination of estimated cost at stages from PRE-BIM to RE-BIM. For the development and implementation of the cost management system of the object in the construction industry, it is necessary not only to determine the basic levels and parameters of choice when taking into account solutions from the organizational and technological documentation, but also to build the architecture of application software to ensure the operation of the control system at all subsequent stages of the life cycle of the construction object. It is important to determine the main factors affecting decision-making and parameters of formation of input and output data for modeling each stage of the life cycle of the object, as well as technical and economic indicators of the information model by stages.

А.Д. Курзанов, М.А. Фомина
МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА
ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

Ключевые слова: неавтоклавный газобетон, управление, процесс структурообразования, комплексный критерий, комплексное оценивание.

В статье предложена модель комплексного оценивания процесса структурообразования неавтоклавного газобетона. В качестве частных показателей процесса для построения модели комплексного оценивания предложено использовать коэффициент вспучивания смеси, величину осадки смеси и предельное напряжение сдвига растворной составляющей. Применение модели комплексного оценивание позволит количественно оценивать результат структурообразования, а также управлять данным процессом, используя ее в качестве критерия управления.

A.D. Kurzanov, M.A. Fomina
QUALITY COMPLEX ESTIMATION MODEL OF NON-
AUTOCLAVED AERATED CONCRETE STRUCTURE
FORMATION PROCESS

Keywords: Non-autoclaved aerated concrete, structure formation process, control, complex criterion, complex estimation.

The complex estimation model (CEM) of the non-autoclaved aerated concrete structure formation process is proposed. It was proposed to use the mixture swelling coefficient, the amount of mixture subsidence and the limiting shear stress of the solution component as particular indicators of the process for the CEM's construction. CEM application will allow to quantify the structure formation result and to control the structure formation process, using it as a management criterion.

С.Л. Леванов, Г.Н. Власичев
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ
РАСЧЁТНЫХ КОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ
ХАРАКТЕРИСТИК ТОЛЕРАНТНОГО ТОПЛИВА В
РЕАКТОРАХ ВВЭР-1000

Ключевые слова: паро-циркониевая реакция, физика реакторов, твэл, ядерное топливо, коэффициент размножения.
В работе проведена оптимизация основных характеристик твэлов с толерантным топливом, получен их оптимальный диаметр. В качестве толерантного предлагается использовать топливо на основе металлического урана с оболочкой из циркониевого сплава, а также топливо на основе металлического урана с оболочкой из сплава на основе хрома и никеля. Поставленная задача решена с помощью аттестованных в России расчётных кодов.

П.В. Максимов, А.А. Кротких
ВВЕДЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕШЕНИЯ,
ПОЛУЧЕННОГО АЛГОРИТМОМ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ
ОПТИМИЗАЦИИ НА БАЗЕ LEVEL-SET МЕТОДА

Ключевые слова: математическое моделирование, Level-set метод, топологическая оптимизация.
Работа посвящена возможному внедрению дополнительного критерия для оценки качества решения, полученного алгоритмом топологической оптимизации. Подобный критерий позволит качественно сопоставить результаты решений различных алгоритмов, основанных на конечно-элементном моделировании. Предлагается в качестве критерия использовать дисперсию целевой функции во всей области, ограниченной телом. Подобный критерий будет явно указывать на наличие неравномерно распределённой энергии деформации.

В.В. Назарова, Л.А. Надточий, В.А. Демченко, А.Д. Апалько,
О.Л. Жданова
ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ САЛАТА
(LACTUCA SATIVA L) ГИДРОПОННЫМ МЕТОДОМ

Ключевые слова: гидропоника, салат Латук, урожайность, период созревания, управляемые параметры.
В статье описывается нахождение зависимости между управляемыми параметрами микроклимата теплицы и урожайностью, периодом созревания салата латук (*Lactuca sativa* L.), при постоянном спектральном составе света. Для оценки влияния рассматриваемых факторов на динамику изменения среднего веса салата была получена регрессионная модель, описывающая установленную зависимость. Полученная модель позволит подобрать необходимые значения параметров для оптимального периода созревания и наилучшей урожайности.

Н.А. Пшеничникова, Н.В. Пешков, В.А. Ильиных
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КУМУЛЯТИВНЫХ СУММ ПРИ
ОЦЕНКЕ ПОГРЕШНОСТИ ФОРМЫ ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ
Ключевые слова: профильный вал, метод кумулятивных сумм, среднее время между ложными тревогами, среднее время задержки, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, погрешность формы.

В статье ставится задача проанализировать погрешность формы деталей профильных моментопередающих соединений в результате демонтажа, тем самым определить момент «непригодности» детали при использовании метода кумулятивных сумм, как одного из методов по обнаружению разладки. Моментом непригодности деталей является невозможность ее дальнейшей эксплуатации в моментопередающем соединении прецизионного узла машины. В статье определяется среднее время задержки и среднее время между ложными тревогами, выбирается оптимальный уровень μ . В результате численного моделирования находится среднее значение момента разладки.

S.L. Levanov, G.N. Vlasichev
USING NUCLEAR CALCULATION CODES FOR
OPTIMIZATION TOLERANT FUEL CHARACTERISTICS
IN VVER-1000 REACTORS

Keywords: vapor-zirconium reaction, reactor physics, fuel elements, nuclear fuel, multiplication factor.
In this paper, the main characteristics of fuel rods with accident tolerant fuel (ATF) were optimized, their optimum diameter was obtained. As ATF it is proposed to use a fuel based on metallic uranium with a clad of zirconium alloy, as well as fuel based on metallic uranium with a clad of an alloy based on chromium and nickel. The task is solved with codes certified in Russia.

P.V. Maksimov, A.A. Krotikh
CRITERIA INTRODUCTION FOR ESTIMATING THE
QUALITY OF THE SOLUTION OF THE TOPOLOGICAL
OPTIMIZATION ALGORITHM BASED ON LEVEL-SET
METHOD

Keywords: additive technology, Level-set method, topology
The work is devoted to the possible implementation of an additional criterion for assessing the quality of the solution obtained by the topological optimization algorithm. Such a criterion will make it possible to compare the results of the solutions of various algorithms based on finite element modeling. It is proposed as a criterion to use the variance of the objective function in the entire region bounded by the body. Such a criterion will clearly indicate the presence of an unevenly distributed strain energy.

V.V. Nazarova, L.A. Nadtochiy, V.A. Demchenko,
A.D. Opalko, O.L. Zhdanova
OPTIMIZATION OF PROCESS OF CULTIVATION OF
LETTUCE (LACTUCA SATIVA L) HYDROPONIC
METHOD

Keywords: hydroponic, lettuce, yield, plant growth, controlled parameters.
The article describes correlation between controlled parameters (temperature and humidity) and yield, growth rate of lettuce (*Lactuca sativa* L.). To find correlation between controlled parameters and dynamics of lettuce weight we have made regression analysis. Obtained model allows to select parameters value for optimal growth rate and better yield.

N.A. Pshenichnikova, N.V. Peshkov, V.A. Ilinykh
APPLICATION OF THE METHOD OF CUMULATIVE
SUMS IN THE EVALUATION OF FORM ERROR PROFILE
SHAFTS

Keywords: profile shaft, the method of cumulative sums, the average time between false alarms, the average delay time, the expectation, the standard deviation, the error of the form.
The article aims to analyze the error of the shape of the parts of the profile torque-transmitting compounds as a result of dismantling, thereby to determine the moment of "unfitness" of the part when using the method of cumulative sums as one of the methods for detecting the disorder. The moment of unsuitability of parts is the impossibility of its further operation in the torque transmission connection of the precision unit of the machine. The article determines the average delay time and the average time between false alarms, the optimal level μ is selected. As a result of numerical simulation, the average value of the moment of decomposition is found.

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" и ООО "Рашин Сайнс" 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

№1 2019

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 30.01.2019 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

8,9 усл.печ.л. 10,4 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1810.

Учредитель: ООО «Научно-технический вестник Поволжья»

420021, Республика Татарстан, Казань,

ул. З.Султана, д.17а, оф. 19

Адрес редакции, издателя и типографии совпадают с адресом учредителя

Цена свободная.

© Научно-технический вестник Поволжья

тел.(843) 216-30-35

Отпечатано с готового оригинал-макета

ООО «Научно-технический вестник Поволжья»