

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ**

№7 2018

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

2018

УДК 60

ББК 30-1

Н-66

Н-66 Научно-технический вестник Поволжья. №7 2018г. – Казань:
Научно-технический вестник Поволжья, 2018. – 176 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.ntvr.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, 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ**01.01.00 — ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА**

- В.И. Антонов* ЛОГИЧЕСКАЯ ВЫВОДИМОСТЬ ФОРМУЛ И ИХ СЕМАНТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В РЕШЕТОЧНО УПОРЯДОЧЕННЫХ КОЛЬЦАХ 9
- Ю.В. Швеи, Н.В. Миллер, Н.И. Попова, И.А. Трефилова* СТЕПЕННАЯ ОЦЕНКА ДЛЯ ОДНОГО НЕСОБСТВЕННОГО ИНТЕГРАЛА 11

02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

- Е.Н. Минаев, Д.С. Хорищенко, Д.В. Цыпин* МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПРИ РАЗНОРОДНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ 17

05.02.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- А.П. Буйносов, О.И. Ветлугина* ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА ПЕРВОГО ОБЪЕМА ЭЛЕКТРОВОЗОВ ВЛ11 В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО 21
- И.В. Ивенина, Ю.Г. Смирнов, А.А. Лютое, Е.И. Истомина* РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕГЕНЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ЭМУЛЬГИРОВАННОЙ НЕФТИ 24
- А.А. Каменских, К.С. Крецу* ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА ЗУБНОЙ ПАРЫ ЧЕРЕЗ ТРЕХСЛОЙНУЮ КАППУ 29
- А.А. Каменских, Т.Н. Устюгова* АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТАКТА ЗУБНОЙ ПАРЫ ЧЕРЕЗ ПРОТЕТИЧЕСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ 32
- Е.О. Кузнеченков, С.О. Маслов, А.В. Жданов* ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН 36
- Л.Н. Лесневский, М.А. Ляховецкий, Д.А. Макарьев, И.А. Николаев, С.Н. Сарбучев* О ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОКРЫТИЙ В СОВРЕМЕННОМ БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ 39
- И.С. Цихалевский, А.П. Буйносов* ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРИМЕРЕ ПТОЛ СЕДЕЛЬНИКОВО 47

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

- Н.Н. Беспалов, А.В. Зорькин, П.М. Дёмкин* ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ИСТОЧНИКОМ НАПРЯЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДЛИННУЮ ЛИНИЮ НА ОСНОВЕ ВИТОЙ ПАРЫ 50
- С.В. Ершов, Д.В. Гилев* ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ 54
- С.В. Ершов, С.В. Фоминых* ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ 57

<i>Т.В. Карасева, И.А. Туряева, А.Н. Долгов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА БЕЗМАСОЧНОЙ ЛИТОГРАФИИ НА КАЧЕСТВО ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ	60
<i>А.В. Кутина, Б.Г. Свердлов</i> ИНФОРМАТИВНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ БПЛА И ПТИЦ	64
<i>Е.В. Субботин, А.С. Поздеева</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДАМИ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ	69
<i>А.Е. Терлыч, А.А. Макаров</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЖЕСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ	72
<i>В.Н. Хмельёв, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов</i> СТЕНД ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ	75

05.13.00 — ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>А.И. Акимов, И.А. Акимов, В.А. Урбан</i> ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ, РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА ВТОРОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ	78
<i>Г.Ф. Ахмедьянова</i> ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕСУРСОВ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ	81
<i>А.В. Бродский</i> О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ФОРМАЛЬНО КОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	85
<i>И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ РОТАЦИОННОГО РЕОМЕТРА	91
<i>Д.К. Егорова, Д.М. Плодухин</i> ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ	95
<i>А.В. Иляхинский</i> РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИРИХЛЕ КАК СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РЫНКА ЦЕННЫХ БУМАГ	99
<i>Н.В. Истомин, Н.М. Труфанова</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТОКОВУЮ ПЕРЕДАВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ ПО МОСТУ	102
<i>Е.Г. Кабулова, А.А. Бондарчук</i> ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ	105
<i>А.В. Казаков, Е.И. Лекомцев</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ	108
<i>В.С. Карабцев, В.С. Каримов, Р.Р. Сайфиев</i> РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ	112
<i>В.В. Киселев, В.Д. Володин, А.А. Шаронов</i> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ СЕРВОПРИВОДОМ С ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ В КОНТУРЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ	115
<i>Д.А. Конотоп, П.В. Максимов</i> ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАЯТНИКОВОГО КВАРЦЕВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА	118
<i>В.Н. Коханенко, М.Ф. Мицик, А.И. Кондратенко, Д.Б. Келехсаев</i> РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМЕРНОГО ПОТОКА ЗА БЕЗНАПОРНОЙ ТРУБОЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ СВОБОДНОМ РАСТЕКАНИИ В ШИРОКОМ ОТВОДЯЩЕМ РУСЛЕ	122

<i>П.В. Максимов, Д.А. Конотов</i> ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛОГОВОГО КОНТУРА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ	127
<i>Н.А. Рябкова, А.В. Казаков</i> СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ	131
<i>Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, В.К. Ильин, Ю.М. Стрелков, И.К. Киямов</i> ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	135
<i>Е.П. Сеногноева, А.С. Морозов, А.В. Ромодин</i> МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»	139
<i>А.Б. Сорокин, Е.А. Зикеева</i> РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ТЕКСТУРЕ МАТЕРИАЛА	143
<i>Е.В. Субботин, Ю.М. Хасянова</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ПРЕБЫВАНИЯ ПОЛИМЕРА ПРИ ТЕЧЕНИИ В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА	146
<i>А.Э. Файзуллин, Н.М. Труфанова</i> АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ	150
<i>А.Г. Щербинин, А.И. Кабирова</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ	154
<i>А.Г. Щербинин, Д.Ю. Корюкин</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ	157
<i>А.Г. Щербинин, А.Н. Кузнецов</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ	160
<i>А.Г. Щербинин, В.С. Черепок</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ	163
АННОТАЦИИ	166

THE RELEASE MAINTENANCE**01.01.00 — PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES — MATHEMATICS**

- V.I. Antonov* LOGICAL CONCLUSIONS FORMULAS AND THEIR SEMANTIC ESTIMATION IN SOLVED ORDERED RINGS 9
- Y.V. Shvets, N.V. Miller, N.I. Popova, I.A. Trefilova* POWER ESTIMAT FOR ONE IMPROPER INTEGRAL 11

02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES

- E.N. Minaev, D.S. Horishenko, D.V. Tsy-pin* MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTRIC FIELD IN THE TWO-ELECTRODE ELECTROCHEMICAL SYSTEMS WITH THE DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS 17

05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE

- A.P. Buinosov, O.I. Vetlugina* ORGANIZATION OF CURRENT REPAIR OF THE FIRST VOLUME OF ELECTRIC VOLVES VL11 IN SERVICE LOCOMOTIVE DEPOSITS 21
- I.V. Ivenina, Yu.G. Smirnov, A.A. Lyutoev, E.I. Istomina* DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF REGENERATION OF MAGNETITE NANOPARTICLES IN THE PROCESS OF WATER TREATMENT FROM EMULATED OIL 24
- A.A. Kamenskikh, K.S. Krecu* NUMERICAL MODELING A PAIR OF TEETH CONTACT THROUGH THE THREE-LAYER MOUTHGUARD 29
- A.A. Kamenskikh, T.N. Ustjugova* THE ANALYSIS OF NUMERICAL SOLUTION PROBLEM OF CONTACT THE PAIR OF TEETH THROUGH MOUTHGUARD DESIGN 32
- E.O. Kuznechenkov, S.O. Maslov, A.V. Zhdanov* APPLICATION OF ADDITIONAL REALITY IN DEVELOPING UNITS AND PARTS OF MACHINES 36
- L.N. Lesnevskiy, M.A. Lyakhovetskiy, D.A. Makariev, I.A. Nikolaev, S.N. Sarbuche* POSSIBILITY OF PLASMA COATING TECHNOLOGY IN MODERN LEAN PRODUCTION 39
- I.S. Tsikhalevsky, A.P. Buinosov* ORGANIZATION OF PRODUCTION OF TECHNICAL MAINTENANCE OF LOADED ELECTRONICS OF DC CONVENTION ON THE EXAMPLE OF PANEL SEDELNIKOVO 47

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

- N.N. Bespalov, A.V. Zorkin, P.M. Dyomkin* INVESTIGATION OF PASSING CONTROL IMPULSES THROUGH THE LONG LINE BASED ON TWISTED PAIR 50
- S.V. Ershov, D.V. Gilev* EXPERIMENTAL STUDY OF THE TEMPERATURE INFLUENCE ON THE VOLCANIZATION PROCESS SPEED OF RUBBER MIXTURES 54
- S.V. Fominykh, S.V. Ershov* EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS OXIDATIVE INDUCTION OF POLYMER COMPOSITIONS ON THE BASIS OF POLYOLEFINS 57
- T.V. Karaseva, I.A. Turyaeva, A.N. Dolgov* THE RESEARCH OF THE QUALITY OF TEST SAMPLES PRODUCED BY TECHNOLOGICAL PROCESS OF MASKLESS LITHOGRAPHY 60

<i>A.V. Kutina, B.D. Sverdlov</i> INFORMATIVE RADAR SIGNAL SPECIFIERS OF UAVS AND BIRDS	64
<i>E.V. Subbotin, A.S. Pozdeeva</i> DETERMINATION OF ACTIVATION ENERGY OF PROCESS THERMAL DECOMPOSITION OF POLYMERS BY THERMOGRAVIMETRY METHODS	69
<i>A.E. Terlych, A.A. Makarov</i> INVESTIGATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF CARBON BLACK SUSPENSION COMPOSITES	72
<i>V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Shalunov</i> STAND OF ULTRASONIC CONSOLIDATION OF THIN SHEETS OF METALS	75

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

<i>A.I. Akimov, I.A. Akimov, V.A. Urban</i> INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS, CALCULATED FORMULAS OF HEAT EXCHANGE AT THE SECOND STAGE OF MANUFACTURE OF MULTILAYER CONSTRUCTIONS OF SPHERICAL FORM BY METHOD OF POLYMERIZATION	78
<i>G.F. Akhmedyanova</i> OPTIMAL DISTRIBUTION RESOURCE MANAGEMENT IN THE ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM	81
<i>A.V. Brodskii</i> ABOUT DECOMPOSITION CAPABILITIES OF WELL-DEFINED FORMAL OPTIMIZATION PROBLEM IN CAD SYSTEM FOR AEROSPACE ENGINEERING	85
<i>I.Y. Djatlov, N.M. Trufanova</i> RUBBER CURING PROCESS RESEARCH VIA ROTATIONAL RHEOMETER	91
<i>D.K. Egorova, D.M. Plodukhin</i> PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS	95
<i>A.V. Ilyahinsky</i> DIRICHLET DISTRIBUTION AS A STATISTICAL MODEL OF SYSTEMIC ANALYSIS OF SECURITIES MARKET	99
<i>N.V. Istomin, N.M. Trufanova</i> THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON THE CURRENT TRANSMITTED POWER OF CABLES PAVED ON THE BRIDGE	102
<i>E.G. Kabulova, A.A. Bondarchuk</i> ESTIMATION OF CONVERGENCE OF ITERATIVE SOLUTIONS IN THE FORMULATION OF OPTIMAL CONTROL PROBLEMS	105
<i>A.V. Kazakov, E.I. Lekomcev</i> INVESTIGATION OF AXISYMMETRIC FLOW IN THE CABLE DIES	108
<i>V.S. Karabtsev, V.S. Karimov, R.R. Saifiev</i> DESIGN AND PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF CALCULATION OF FUEL EFFICIENCY OF THE CAR WITH USE OF GEODETAILS	112
<i>V.V. Kiselev, V.D. Volodin, A.A. Sharonov</i> HYDRAULIC SERVOMOTOR CONTROL SYSTEM WITH PRESSRE SENSOR IN ANGULAR ACCELERATION CONTROL LOOP	115
<i>D.A. Konotop, P.V. Maksimov</i> APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE PECULIARITIES OF PENDULAR QUARTZ ACCELEROMETER	118
<i>V.N. Kokhanenko, M.F. Mitsik, A.I. Kondratenko, D.B. Kelekhsaev</i> CALCULATION OF PARAMETERS OF TWO-DIMENSIONAL FLOW FOR NON-PRESSURE PIPE OF CIRCULAR CROSS SECTION WITH FREE SPREADING IN THE WIDE OUTLET CHANNEL	122
<i>P.V. Maksimov, D.A. Konotop</i> THE NUMERICAL MODEL OF PENDULUM ACCELEROMETER WITH ELECTRICAL ANALOGUE CIRCUIT OF FEEDBACK	127
<i>N.A. Ryabkova, A.V. Kazakov</i> COMPARISON METHODS OF NUMERICAL SOLUTION OF STRATIFIED FLOW	131

<i>L.S. Sabitov, N.F. Kashapov, V.K. Ilyin, Yu.M. Strelkov, I.K. Kiyamov</i> NUMERICAL-ANALYTICAL METHODS OF CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF FLEXIBLE SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF POLES OF OVERHEAD POWER LINES	135
<i>E.P. Senognoeva, A.S. Morozov, A.V. Romodin</i> THE METHOD OF RELIABILITY ASSESSMENT OF STRUCTURAL SYSTEMS OF POWER SUPPLY OF OOO «LUKOIL-PERM»	139
<i>A.B. Sorokin, E.A. Zikeeva</i> OBJECT RECOGNITION USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR THE TEXTURE OF THE MATERIAL	143
<i>E.V. Subbotin, Y.M. Hasyanova</i> DETERMINATION RESIDENCE TIMES OF POLYMER AT FLOW IN THE MELT ZONE OF SINGLE SCREW EXTRUDER	146
<i>A.E. Faizullin, N.M. Trufanova</i> ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN AN OIL WELL	150
<i>A.G. Shcherbinin, A.I. Kabirova</i> INVESTIGATION OF INDUCTIVITY OF POWER CABLES BY MATHEMATICAL MODELING OF MAGNETIC FIELDS	154
<i>A.G. Shcherbinin, D.Y. Koryukin</i> THE DETERMINATION OF THE AC RESISTANCE OF CURRENT-CARRYING SECTOR-SHAPED CONDUCTORS	157
<i>A.G. Shcherbinin, A.N. Kuznetcov</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIONARY THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEM OF POWER CABLES LAID IN THE GROUND	160
<i>A.G. Shcherbinin, V.S. Cherepok</i> INVESTIGATION OF THE ELECTRIC CAPACITY OF THE POWER CABLES WITH SECTOR CORES	163
ABSTRACTS	166

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)

01.01.00

В.И. Антонов канд. физ.-мат. наук

Бурятский государственный университет,
Институт математики и информатики, кафедра АГМ,
Улан-Удэ, antonov.imi@mail.ru

ЛОГИЧЕСКАЯ ВЫВОДИМОСТЬ ФОРМУЛ И ИХ СЕМАНТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В РЕШЕТОЧНО УПОРЯДОЧЕННЫХ КОЛЬЦАХ

В работе исследуются свойства оценок в решеточно упорядоченных кольцах методами гейтинговозначного анализа. На этой основе изучаются хорновы теории разных классов l -колец.

Ключевые слова: *гейтинговозначный анализ, оценки, булевы оценки, хорновы теории, пучки, предпучки, нормальные l -кольца.*

В работе изучается математическая теория, иногда называемой гейтинговозначным анализом (или нестандартным анализом в широком смысле).

Как известно, традиционное классическое и интуиционистское исчисление предикатов, а также аксиоматика теории множеств тесно связаны с оценками. С неклассическими логиками и в частности с интуиционистской логикой тесно связаны две задачи: развитие обычной математики (алгебры, анализа и так далее) в рамках данной логики и подыскание синтаксического перевода формул $\varphi \mapsto \varphi'$ при котором выводимость φ в теории с классической логикой влечет выводимость φ' в той же теории с данной неклассической логикой.

Булевозначный анализ эффективно использовался в связи с проблемами алгебраических систем. Гейтинговозначный (булевозначный) анализ применялся также для решения чисто логических проблем теории доказательств и теории моделей. Например, В. А. Любецкий, развивая метод гейтинговозначного анализа, изучал две традиционные логические проблемы: о переходе от выводимости в классической теории к выводимости в соответствующей интуиционистской теории и о построении модельного компаньона. В настоящей работе получены результаты в этих направлениях. По первому направлению известен следующий общий ответ: для алгебраической системы K методы гейтинговозначного анализа особенно эффективны, если для алгебраической системы K удастся построить такой содержательный пучок $F(\cdot)$, на полной гейтинговой алгебре Ω , что $K = F(1)$ («пучок $F(\cdot)$, представляет систему K »). В связи с этим важен вопрос о возможности построения такого пучка $F(\cdot)$.

Пусть A — решеточно упорядоченное кольцо (l -кольцо), $B = B(A)$ — булева алгебра его прямых факторов. Обозначим $X(A)$ стоуново пространство булевой алгебры B , то есть множество всех простых идеалов булевой алгебры B .

При этом $X(A)$ будет отделимым вполне несвязным компактным топологическим пространством. Совокупность всех его открытых множеств обозначим через τ . Заметим, что $B \subseteq \tau$. Обозначим \mathbb{B} полную булеву алгебру, являющуюся пополнением по Дедекинду булевой алгебры B , которую отождествим с решеткой всех регулярных открытых множеств в $X(A)$.

Булева алгебра B является подалгеброй алгебры \mathbb{B} и решетки τ . Пусть $a_1, a_2 \in A$. Определим оценку

$$\llbracket a_1 = a_2 \rrbracket \iff \mathbf{V}\{i \in B(A) \mid i(a_1) = i(a_2)\}, \quad (1)$$

где \mathbf{V} вычисляется в одном из двух пополнений булевой алгебры $B(A)$: топологическом пополнении $\tau(A)$ или дедекиндовом пополнении $\mathbb{B}(A)$. Таким образом определяются две оценки: $\llbracket \cdot \rrbracket_{\tau(A)}$ и $\llbracket \cdot \rrbracket_{B(A)}$. Они называются соответственно τ - и \mathbb{B} -оценками в языке l -колец.

Рассмотрим более подробно τ -оценку в языке l -колец. Из (1) имеем
$$[[a=0]]_\tau = \bigcup_{i(a)=0} \sigma(i) = \bigcup_{i \subseteq a^\perp} \sigma(i). \quad (2)$$

Для любого $p \in X(A)$ обозначим \bar{p} наименьший l -идеал, содержащий все i из p . Тогда $\bar{p} = \{i(a) \mid i \in p, a \in A\}$ и $\bar{p} \neq A$, т.е. \bar{p} — собственный l -идеал. Обозначим $A_p = A/\bar{p}$, где $p \in X(A)$. l -кольцо A_p называется локализацией A в точке p из $X(A)$. Локализации (в разных точках) образуют семейство l -колец $\{A_p \mid p \in X(A)\}$, которое будем записывать короче $\{A_p\}$.

Отметим ценную функцию $p \mapsto A_p$, а также функцию $a \mapsto a(\cdot)$, где $a \in A$, $a(\cdot): X(A) \rightarrow \bigcup_{p \in X(A)} A_p$, $a(p) \rightleftharpoons [a]_{\bar{p}}$ и $[a]_{\bar{p}}$ — класс эквивалентности в A_p элемента a по идеалу \bar{p} .

Будем писать Φ_A вместо $A \models \Phi$, а $[[\Phi_A]] = 1$ вместо $[[A \models \Phi]] = 1$.

Напомним, что l -кольцо A называется нормальным, если $\forall a \in A \exists i_a \in B(A) \forall i \in B(A) (i(a) = 0 \Leftrightarrow i \subseteq i_a)$.

Теорема 1. Для τ -значной оценки в категории l -колец (то есть для оценки, определяемой формулой (2) и вычисляемой в топологии τ) выполняются утверждения, показанные на следующей диаграмме:

$$A \models \Phi \underset{\text{хорнова}}{\overset{\text{позитивная}}{\rightleftharpoons}} [[A \models \Phi]]_\tau = 1 \underset{\text{позитивная } \forall\exists\text{-формула}}{\overset{\text{позитивная}}{\rightleftharpoons}} \{A_p\} \models \Phi$$

Теорема 2. Пусть A — нормальное l -кольцо. Тогда для любой формулы Φ в предваренной форме выполняется $([[\Phi_A]]_\tau = 1 \Rightarrow \{A_p\} \models \Phi)$ и для любой $\forall\exists$ -формулы Φ выполняется $(\{A_p\} \models \Phi) \Rightarrow ([[\Phi_A]] = 1)$.

Доказательство.

Если A — нормальное l -кольцо, то оценка атомарной формулы принадлежит $B(A)$ (иными словами, является открыто-замкнутым множеством). В этом случае нужно рассмотреть дополнительно только один новый случай, когда бескванторная формула содержит связки \neg . Поэтому

$$[[(\neg\Phi)_A]] = \neg [[\Phi_A]] = \{p \in X(A) \mid A_p \not\models \Phi\} = \{p \in X(A) \mid A_p \models \neg\Phi\}.$$

Итак, соотношение имеет место для любых бескванторных формул Φ , то есть $[[\Phi_A]] = \{p \in X(A) \mid A_p \models \Phi\}$.

Значит, имеет место $(p \in [[\Phi_A]]) \Leftrightarrow (A_p \models \Phi)$ для любой бескванторной формулы Φ . Отсюда имеем $([[\Phi_A]] = 1) \Rightarrow (\{A_p\} \models \Phi)$ для любой формулы Φ в предваренной нормальной форме и $(\{A_p\} \models \Phi) \Rightarrow ([[\Phi_A]] = 1)$ для любой $\forall\exists$ -формулы Φ .

Список литературы

1. Любецкий В. А. Оценки и пучки. О некоторых вопросах нестандартного анализа // УМН. — 1989. — Т. 44, вып. 4 (268). — С. 99–153.
2. Антонов В. И. Связь канонического пучка с пучком Каймела на стоуновом пространстве булевой алгебры прямых факторов решеточно упорядоченного кольца. // Вестник Бурятского государственного университета. — 2008. — Вып.9. — С. 102–105.
3. Takeuti G. Boolean simple groups and Boolean simple rings // Journal of Symbolic Logic. 1988. Vol. 53, No. 1. Pp. 160–173.
4. Антонов В.И. Булевы оценки и пучки некоторых классов решеточно упорядоченных групп. // Вестник Бурятского государственного университета. Математика, информатика. — 2016/2. — С. 3–10.

01.01.00

**Ю.В. Швец канд. педагог. наук, Н.В. Миллер канд. педагог. наук,
Н.И. Попова канд. педагог. наук, И.А. Трефилова канд. эконом. наук**

Сибирский государственный университет путей сообщения,
инженерно-экономический факультет, кафедра высшей математики,
Новосибирск, skorpi.1962@mail.ru

СТЕПЕННАЯ ОЦЕНКА ДЛЯ ОДНОГО НЕСОБСТВЕННОГО ИНТЕГРАЛА

В работе изучается несобственный интеграл первого рода с переменным нижним пределом $S(x, p) = \frac{P}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int e^{-t^p} dt$, где $\Gamma(x)$ — гамма-функция Эйлера. Оценивается четная степень $2k$ функции $S(x)$. Показано, что для $\forall x \in R$ и $m \in [1; \sqrt[2p]{2k}]$ выполняется интегральное неравенство $S^{2k}(x, p) < S(mx, p)$. Установлено также, что неравенство остается справедливым для $0 \leq m < 1$ и любого положительного x .

Ключевые слова: *несобственный интеграл первого рода, гамма-функция, степенные оценки, интегральные неравенства, неполная гамма-функция.*

Введение

В математическом анализе особую роль играют специальные функции, которые естественно возникают в различных приложениях и теоретических исследованиях. Одна из основных и значимых специальных функций – гамма-функция – впервые введена Эйлером в 1729 г. Она является одной из наиболее важных трансцендентных функций математического анализа, распространяющей понятие факториала на дробные, отрицательные и комплексные значения аргумента. Гамма-функция определяется формулой:

$$\Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot n}{x(x+1) \dots (x+n)} n^x.$$

Если действительная часть числа x положительна, то гамма функция может быть представлена как абсолютно сходящийся интеграл вида:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt.$$

Гамма-функция имеет широчайшее применение в прикладном анализе. С ней связаны функции Бесселя, используемые при синтезе фильтров в спектральном анализе, а также другие специальные функции: цилиндрические, гипергеометрические, бета-функция, дигамма-функция, полигамма-функция и другие. Через гамма-функцию выражается большое число важных определённых интегралов, бесконечных произведений и сумм рядов. В статистике широко используется гамма-распределение, частными случаями которого являются экспоненциальное распределение и распределение хи-квадрат.

При решении различных математических задач часто применяются родственные функции. К ним относятся верхняя неполная гамма-функция и нижняя неполная гамма-функция. Если гамма-функция определена как интеграл от нуля до бесконечности, то в неполной гамма-функции предполагается, что верхний либо нижний пределы интегрирования – переменные.

Вопросы применения гамма-функции и неполной гамма-функции при решении различных математических, физических, инженерных проблем рассмотрены в работах как российских, как и зарубежных ученых. Усилия многих авторов были направлены на получение различных оценок для гамма-функции и неполной гамма-функции.

Так в работе [1] Н. Alzer показал, что неравенство

$$x^{\alpha(x-1)-C} < \Gamma(x) < x^{\beta(x-1)-C}$$

выполняется для всех действительных $x \in (0;1)$ и $\alpha \leq 1-C = 0,42278$,

$$\beta \geq \frac{1}{2} \left(\frac{\pi^2}{6} - C \right) = 0,53385.$$

В статье [2] G.D. Anderson и S.-L. Qiu установили верхнюю и нижнюю границы для гамма-функции

$$x^{(1-C)x-1} < \Gamma(x) < x^{x-1} \quad (x > 1),$$

где $C=0.57721\dots$ – константа Эйлера.

Song-Zhimin, Dou-Xiangkai и Yin Li в [3], используя разложение функции $\frac{\Gamma'(x)}{\Gamma(x)}$ в ряд,

получили двойное неравенство

$$\frac{(x+y)^{x+y}}{x^x y^y e} \leq \frac{\Gamma(x+y+1)}{\Gamma(x+1)\Gamma(y+1)} \leq \frac{(x+y)^{x+y}}{x^x y^y},$$

где $x, y \in R^+$.

В работе [4] установлена взаимосвязь гамма-функции с дискретными вероятностными распределениями. Показано, что при $\lambda < 1$ имеет место соотношение

$$\Gamma(\lambda) = \lim_{n \rightarrow \infty} P(\xi = n-1) \cdot \prod_{s=1}^{n-1} \left(\frac{s}{\lambda} - 1 \right) (ne)^\lambda \cdot \frac{\pi}{\sin \lambda \pi},$$

где ξ – случайная величина, распределенная по закону Пуассона с параметром λ .

В других работах для неполной гамма-функции $\Gamma(k, x)$ установлены различные оценки сверху и снизу через некоторые значения подынтегральной функции.

Так в статье [5] речь идет об оценках, полученных для неполных гамма-функций.

Показано, что неравенство

$$\left(1 - e^{-\beta x^p} \right)^{\frac{1}{p}} < \frac{1}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{p}\right)^0} \int_0^x e^{-t^p} dt < \left(1 - e^{-\alpha x^p} \right)^{\frac{1}{p}}$$

выполняется для всех $x > 0$, где $p \neq 1$ $\alpha = \alpha(p)$ $\beta = \beta(p)$ действительные числа.

Кроме того, установлено, что оценки $-\log(1 - e^{-ax}) \leq \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt \leq -\log(1 - e^{-bx})$ выполняется

для всех $x > 0$, где a и b – любые действительные числа.

Близкие результаты получены в работах [6], [7].

J. M. Vorwein и O-Yeat Chan в статье [8] показали, что

$$\frac{c-2}{c-1} |z|^{a-1} e^{-x} \leq |\Gamma(a, z)| \leq \frac{c}{c-1} |z|^{a-1} e^{-x},$$

где $c \geq 2$, $a > 3$, $\text{Re}(z) > 0$, и $|z| \geq c(a-1)$.

В [9] Xiao-Li Ну получил два неравенства для неполной гамма-функции

$$\Gamma(k, x) = \frac{1}{\Gamma(k)} \int_x^\infty t^{k-1} e^{-t} dt \quad \text{и функции вида} \quad Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

которая возникает во многих приложениях. Основные результаты сформулированы им в теоремах.

Теорема 1. Пусть $k > 1$ и $0 \leq a \leq 2^{\frac{1}{k}}$ тогда $\forall x > 0$ выполняется неравенство

$$\Gamma^2(k, x) < \Gamma(k, ax).$$

Теорема 2. Пусть $1 \leq a \leq \sqrt{2}$, тогда $\forall x \in R$ выполняется неравенство

$$Q^2(x) < Q(ax). \tag{1}$$

В работе [10] было установлено, что интервал для параметра a из Теоремы 2 не может быть расширен. В [11] получены оценки для произвольной четной степени функции $Q(x)$.

В работе [12] неравенство (1) распространено на третью степень функции $S(x, 3) = \frac{3}{\Gamma\left(\frac{1}{6}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^6} dt$ и интервал $[1; \sqrt[6]{3}]$. Позднее в [13] доказано, что интегральное

неравенство

$$S^3(x, p) < S(mx, p) \tag{2}$$

выполняется для всех $x \in R$, $p \in N$ и любого $m \in [1; \sqrt[2p]{3}]$. Отметим, что в [14] установлен неулучшаемый интервал по параметру m для неравенства (2).

1. Формулировка основных результатов

Цель нашей работы состоит в том, чтобы получить степенную оценку более высокого порядка типа (1) для функции

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt, \tag{3}$$

где $p \in N$, а $\Gamma(x) = \int_0^\infty t^{x-1} e^{-t} dt$ - гамма-функция Эйлера.

Теорема 1.1. Пусть $1 \leq m \leq \sqrt[2p]{2k}$; $k \in N$.

Тогда для $\forall x \in R$ имеет место неравенство

$$S^{2k}(x, p) < S(mx, p) \tag{4}$$

Замечание 1.1 Неравенство (4) остается справедливым для $0 \leq m \leq 1$ и любого положительного x .

Действительно, при $0 \leq m \leq 1$ и $x > 0$ имеем $0 \leq mx \leq x$. Так как $S(x, p) < 1$ и $e^{-t^{2p}} > 0$, то $S(mx, p) > S(x, p) > S^{2k}(x, p)$.

2. Доказательство основного результата

Мы рассматриваем функцию $S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt$ при фиксированном $p \in N$, то есть

$S(x, p)$ является функцией от x . Заметим, что $e^{-t^{2p}} > 0$ при любом действительном t . Поэтому функция $S(x, p)$ убывающая и, следовательно, достаточно доказать утверждение теоремы 1.1 при $m = \sqrt[2p]{2k}$.

В дальнейшем будем оценивать разность

$$L(x, p) = S^{2k}(x, p) - S(\sqrt[2p]{2k} \cdot x, p). \tag{5}$$

Цель дальнейших выкладок состоит в доказательстве неравенства $L(x, p) < 0$ при любом x .

Имеем:

$$L(0, p) = S^{2k}(0, p) - S(0, p) = \left(\frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^0} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt \right)^{2k} - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^0} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt.$$

Отсюда

$$L(0, p) = \frac{1}{2^{2k}} - \frac{1}{2} < 0. \tag{6}$$

Кроме того,

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} L(x, p) = \lim_{x \rightarrow -\infty} \left(S^{2k}(x, p) - S(\sqrt[2p]{2k} x, p) \right) = 1 - 1 = 0. \quad (7)$$

Аналогично выводим

$$\lim_{x \rightarrow \infty} L(x, p) = \lim_{x \rightarrow \infty} \left(S^{2k}(x, p) - S(\sqrt[2p]{2k} x, p) \right) = 0 - 0 = 0. \quad (8)$$

Заметим, что

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)_x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt = \frac{1}{2} - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)_0} \int_0^x e^{-t^{2p}} dt.$$

Переходя к дифференцированию, получаем

$$S'(x, p) = \left(\frac{1}{2} - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)_0} \int_0^x e^{-t^{2p}} dt \right)' = -\frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-x^{2p}}. \quad (9)$$

Кроме того,

$$S'(\sqrt[2p]{2k} x, p) = \left(\frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)_{\sqrt[2p]{2k}x}} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt \right)' = \left(\frac{1}{2} - \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)_0} \int_0^{\sqrt[2p]{2k}x} e^{-t^{2p}} dt \right)' = -\frac{p \sqrt[2p]{2k}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-x^{2p} \cdot 2k}. \quad (10)$$

Из (5), (9), (10) выводим:

$$L'(x, p) = \left(S^{2k}(x, p) - S(\sqrt[2p]{2k} x, p) \right)' = -2k S^{2k-1}(x, p) \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-x^{2p}} + \frac{p \sqrt[2p]{2k}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-2k x^{2p}}.$$

Отсюда

$$L'(x, p) = \frac{p \sqrt[2p]{2k}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-x^{2p}} \left(e^{-(2k-1)x^{2p}} - \sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} S^{2k-1}(x, p) \right).$$

Цель дальнейших вычислений – исследование разности

$$Z(x, p) = e^{-(2k-1)x^{2p}} - \sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} S^{2k-1}(x, p). \quad (11)$$

Заметим, что

$$Z(0, p) = 1 - \sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} S^{2k-1}(0, p) = 1 - \frac{\sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}}}{2^{2k-1}} > 0. \quad (12)$$

Кроме того:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} Z(x, p) = 0 - \sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} = -\sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} < 0. \quad (13)$$

Рассмотрим поведение функции $Z(x, p)$ на интервале $(-\infty; 0]$. При $x < 0$ функция $y = e^{-(2k-1)x^{2p}}$ возрастает до единицы, а $S(x, p)$ убывает до $\frac{1}{2}$. Отсюда из соотношений (11),

(12), (13) вытекает, что $Z(x, p)$ на отрицательной полуоси ровно один раз меняет знак с минуса на плюс.

Так как

$$L'(x, p) = \frac{p \sqrt[2p]{2k}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)} e^{-x^{2p}} \cdot Z(x, p), \quad (14)$$

то отсюда следует, что функция $L(x, p)$ имеет один минимум на $(-\infty; 0]$.

Далее рассматривается поведение $L(x, p)$ при $x > 0$. Покажем, что $Z(x, p) > 0$ при этих

значения x . В силу (14) это будет означать, что $L(x, p)$ возрастает на интервале $[0; \infty)$.

Функция $S(x, p)$ при $x > 0$ допускает оценку сверху:

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} dt < \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} \cdot \frac{t^{2p-1}}{x^{2p-1}} dt =$$

$$= -\frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \frac{1}{x^{2p-1} \cdot 2p} \int_0^\infty e^{-t^{2p}} d(-t^{2p}) = -\frac{p \cdot e^{-t^{2p}}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2p \cdot x^{2p-1}} \Bigg|_0^\infty.$$

Отсюда

$$S(x, p) < \frac{e^{-x^{2p}}}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2 \cdot x^{(2p-1)}}.$$

Следовательно,

$$S^{2k-1}(x, p) < \frac{e^{-(2k-1)x^{2p}}}{\Gamma^{2k-1}\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2^{2k-1} \cdot x^{(2p-1)(2k-1)}}. \tag{15}$$

Из (11) и (15) получаем

$$Z(x, p) = e^{-(2k-1)x^{2p}} - \sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} S^{2k-1}(x, p) > e^{-(2k-1)x^{2p}} - \frac{\sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}} \cdot e^{-(2k-1)x^{2p}}}{\Gamma^{2k-1}\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2^{2k-1} \cdot x^{(2p-1)(2k-1)}}.$$

Поэтому

$$Z(x, p) > e^{-(2k-1)x^{2p}} \left(1 - \frac{\sqrt[2p]{(2k)^{2p-1}}}{\Gamma^{2k-1}\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2^{2k-1} \cdot x^{(2p-1)(2k-1)}} \right).$$

Из последнего неравенства вытекает, что

$$Z(x, p) > 0 \text{ при } x > \frac{(2k)^{\frac{1}{2p(2k-1)}}}{\Gamma^{\frac{1}{2p-1}}\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2^{\frac{1}{2p-1}}}.$$

Аналогичное неравенство выполняется на интервале $\left(0; \frac{(2k)^{\frac{1}{2p(2k-1)}}}{\Gamma^{\frac{1}{2p-1}}\left(\frac{1}{2p}\right) \cdot 2^{\frac{1}{2p-1}}}\right)$.

Установленные соотношения показывают, что функция $Z(x, p)$ один раз меняет знак с «минуса» на «плюс» на всей числовой прямой. Таким образом, на интервале $(-\infty; \infty)$ $L(x, p)$ имеет ровно один минимум. Отсюда из (6)-(8) вытекает, что $L(x, p) < 0$ для любого действительного x .

Теорема 1.1 доказана.

Список литературы

1. *Alzer H.* Inequalities for the gamma function. Proceedings of the American mathematical society. Volume 128, Number 1, 141 – 147.
2. *Anderson G.D., Qiu S.-L.* A monotoneity property of the gamma function // Proc. Amer. Math. Soc. 125 (1997), 3355-3362.
3. *Song-Zhimin, Dou-Xiangkai, Yin Li.* Octogon Mathematical Magazine // Vol. 17, No.1, April 2009, pp. 14-18.
4. *Пожидаетев А.В., Пекельник Н.М., Хаустова О.И., Трефилова И.А.* О некоторых представлениях гамма функции // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2015. №4(36).С. 29-37.
5. *Alzer H.* On some inequalities for the incomplete gamma function, Math. Comp. 66 (1997), no 218, 771-778
6. *Natalini P., Palumbo B.* Inequalities for the incomplete gamma function, Math. Inequal. Appl. 3 (2000), no. 1, 69-77
7. *Qi F.* Monotonicity results and inequalities for the gamma and incomplete gamma functions, Math. Inequal. Appl. 5 (2002), no. 1, 61-77
8. *Borwein J. M., O-Yeat Chan.* Uniform Bounds for the Complementary Incomplete Gamma Function // Mathematical Inequalities & Applications Volume 12, Number 1 (2009), 115–121
9. *Xiao-Li Hu.* Two new inequalities for Gaussian and gamma distributions // Journal of mathematical inequalities. Volume 4, Number 4 (2010), 609– 613
10. *Пекельник Н.М., Хаустова О.И., Трефилова И.А.* Замечания об одном интегральном неравенстве. X международная научно-практическая конференция: «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия» №3(10) 2015, часть 9, 72 – 74
11. *Пожидаетев А.В., Пекельник Н.М., Хаустова О.И., Трефилова И.А.* Об оценке четных степеней срезов некоторых интегралов, Наука и мир Международный научный журнал, №1 (17), 2015, том 1, 29 – 34
12. *Швец Ю.В., Миллер Н.В., Пучнин Р.В.* Об одном неравенстве для несобственного интеграла с переменным нижним пределом // Евразийский союз ученых. 2015. № 10– 6(19). С. 57– 59.
13. *Швец Ю.В., Миллер Н.В., Пучнин Р.В.* Степенная оценка одной неполной функции // Вестник современной науки. 2015. №11, С. 17– 20.
14. *Швец Ю.В., Миллер Н.В., Попова Н.И., Трефилова И.А.* Уточнение интегрального неравенства для одной неполной функции // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. №5. С. 26-29

ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)

02.00.05

Е.Н. Минаев д-р техн. наук, Д.С. Хорищенко, Д.В. Цыпин

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
физико-технический факультет, кафедра физики,
Саратов, emin@sstu.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ПРИ РАЗНОРОДНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

На основе решения дифференциального уравнения Лапласа проведено моделирование электрического поля в плоскопараллельных системах со смешанными граничными условиями третьего рода и первого – третьего рода. Представлен метод решения, аналитические выражения для расчёта и результаты численного моделирования.

Ключевые слова: математическое моделирование; электрическое поле, электрохимические системы.

В электрохимическом производстве, а также при прогнозировании электрохимической коррозии гальванических пар и электрохимической защите металла возникают задачи численного моделирования распределения параметров электрического поля в растворе внутри рассматриваемого объекта [1].

Как известно, при математическом моделировании на основе использования дифференциальных уравнений в частных производных, существуют три типа граничных условий: граничные условия первого рода (на поверхности задан потенциал); граничные условия второго рода (на поверхности задана плотность тока); граничные условия третьего рода (на поверхности задана линейная связь между потенциалом и плотностью тока). В последнем случае, электрод является линейно поляризованным. Часто в электрохимических системах на разных участках одной и той же координатной поверхности выполняются разнородные граничные условия, такие участки называются электродами, граничные условия – смешанными, а системы – двух электродными, трёх электродными или многоэлектродными в зависимости от числа участков. В этом заключается особенность рассматриваемых задач [2]. В работе [3] представлена методика расчёта в случае, когда на одном из электродов задано граничное условие второго рода, а на другом – третьего рода. В данной работе рассмотрены случаи граничных смешанных условия третьего рода с разными значениями коэффициентов удельной поляризации, граничных условий первого – третьего рода, а также результаты численного моделирования электрического поля в указанных случаях.

Рассмотрим двухэлектродную плоскопараллельную систему, ограниченную координатами $0 < x < l$, $0 < y < \infty$, состоящую из двух линейно поляризованных электродов. Ставится задача о распределении электрического потенциала $\varphi(x, y)$ внутри рассматриваемой области заполненной раствором и на её границе при смешанных условиях третьего рода

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = 0, \quad 0 < x < l, \quad 0 < y < \infty, \quad (1)$$

$$\varphi - \alpha_1 \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_1, \quad 0 < x < x_1, \quad y = 0, \quad (2)$$

$$\varphi - \alpha_2 \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0, \quad x_1 < x < l, \quad y = 0, \quad (3)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad (4)$$

В данной краевой задаче приняты следующие обозначения: α_1 и α_2 – коэффициенты удельной поляризации [$\text{Ом} \cdot \text{м}^2$]; λ – удельная электропроводность раствора [$\text{Ом}^{-1} \text{м}^{-1}$].

Для того, чтобы привести граничные условия (2) и (3) к стандартному виду, преобразуем условие (2) на электроде $0 < x < x_1, y = 0$

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_1 + (\mu_1 - \mu_2) \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad (5)$$

где приняты обозначения $\mu_1 = \alpha_1 \lambda, \mu_2 = \alpha_2 \lambda$. Производную на этом участке (которая в общем случае является функцией координат) заменим ее средним по поверхности анода значение

$$\frac{\partial \varphi(x, 0)}{\partial y} \approx \frac{1}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi(x, 0)}{\partial y} dx = \text{const}, \quad (6)$$

и подставим в правую часть равенства в (5). Точность вычислений будет тем выше, чем точнее выполняется последнее условие. Тогда, граничные условия (2), (3) можно переписать в виде

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{cases} \varphi_1 + \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi}{\partial y} dx, & 0 < x < x_1, \quad y = 0, \\ 0, & x_1 < x < l, \quad y = 0, \end{cases} \quad (7)$$

Если ввести константу f_1 , которая определяется из условия

$$f_1 = \varphi_1 + \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi(x, 0)}{\partial y} dx, \quad (8)$$

то граничные условия (2) и (3) преобразуются в выражение

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \begin{cases} f_1, & 0 < x < x_1, \quad y = 0, \\ 0, & x_1 < x < l, \quad y = 0, \end{cases} \quad (9)$$

представляющее собой стандартное граничное условие третьего рода.

Предположение о постоянстве плотности тока на электроде $0 < x < x_1$ можно считать выполненным при выполнении неравенства $\mu/x_1 > 10$. Это связано со следующим обстоятельством. Безразмерный параметр μ/x_1 является электрохимическим критерием подобия. Он указывает на соотношение между поляризационным (α) и омическим (x_1/λ) факторами при распределении тока в электролите. Увеличение первого из этих факторов приводит к уменьшению неравномерности распределения плотности тока, увеличение второго – к увеличению неравномерности [4]. Превышение поляризационного фактора на порядок по сравнению с омическим означает равномерность распределения тока на участке $0 < x < x_1$. В задачах стационарной теплопроводности α – коэффициент теплоотдачи, λ – коэффициент теплопроводности, в задачах о стационарном распределении растворённого в жидкости вещества α – коэффициент массоотдачи, λ – коэффициент диффузии.

Решая уравнение (1) с граничным условием (9) методом интегрального косинус преобразования с конечными пределами интегрирования, найдём решение в виде разложения в ряд Фурье с точностью до неизвестного множителя f_1

$$\varphi(x, y) = f_1 \left\{ \frac{x_1}{l} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{l} x_1\right) \cos\left(\frac{k\pi}{l} x\right) \exp\left(-\frac{k\pi}{l} y\right)}{\left(1 + \mu_2 \frac{k\pi}{l}\right) k} \right\}. \quad (10)$$

Перейдём к нахождению константы f_1 , для чего продифференцируем (10) при $y = 0$ и проинтегрируем по поверхности электрода

$$\int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi(x, 0)}{\partial y} dx = -f_1 \left\{ \frac{2}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2\left(\frac{k\pi}{l} x_1\right)}{\left(1 + \mu_2 \frac{k\pi}{l}\right) k} \right\}. \quad (11)$$

Используя определение f_1 (формулу (8)), получим алгебраическое уравнение для нахождения этой величины

$$f_1 = \varphi_1 - \frac{2}{\pi} f_1 \frac{(\mu_1 - \mu_2)}{x_1} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2\left(\frac{k\pi}{l} x_1\right)}{\left(1 + \mu_2 \frac{k\pi}{l}\right) k} \right\}. \quad (12)$$

Определив значение f_1 из данного алгебраического уравнения, и подставив его в выражение для потенциала (10), мы тем самым решим исходную краевую задачу.

Аналогичный подход может быть реализован, если заменить условия (2) условием $\varphi = \varphi_a$ на поверхности первого электрода $y = 0$, $0 < x < x_1$, то есть рассматривать смешанную задачу первого – третьего рода. Преобразуем это условие к виду

$$\varphi - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y} = \varphi_a - \mu_2 \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad y = 0, \quad 0 < x < x_1.$$

Заменим в правой части распределение производной на электроде её средним по поверхности значением по формуле (6). Тогда, граничные условия по всей поверхности будет иметь вид (9), с той лишь разницей, что неизвестная константа f_1 будет определяться выражением

$$f_1 = \varphi_a - \frac{\mu_2}{x_1} \int_0^{x_1} \frac{\partial \varphi(y, 0)}{\partial y} dx. \quad (13)$$

Используя выражение для производной по поверхности (11) и подставляя его в (13), определим алгебраическое уравнение для нахождения множителя f_1 в формуле (10) для расчёта поля.

$$f_1 = \varphi_a + \frac{2}{\pi} f_1 \frac{\mu_2}{x_1} \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin^2\left(\frac{k\pi}{l} x_1\right)}{\left(1 + \mu_2 \frac{k\pi}{l}\right) k} \right\}.$$

Таблица. Распределение потенциала (в вольтах) по координатам

x, см	y, см.			
	1	3	6	10
1	0,026	0,023	0,021	0,019
2	0,025	0,022	0,02	0,019
3	0,024	0,022	0,02	0,019
4	0,022	0,021	0,02	0,019
5	0,021	0,021	0,02	0,018
6	0,02	0,02	0,019	0,018
7	0,019	0,019	0,019	0,018
10	0,018	0,018	0,018	0,017
15	0,016	0,016	0,016	0,016
20	0,015	0,015	0,015	0,016
25	0,014	0,014	0,015	0,015

Представленный алгоритм был использован для моделирования электрического поля при следующих значениях исходных данных: $\mu_1=0,3\text{м}$; $x_1 = 0.03\text{м}$; $l = 0.5\text{м}$; $\mu_2 = 1\text{м}$. Результаты представлены в таблице.

Список литературы

1. *Гнусин Н.П.* Основы теории расчета и моделирования электрических полей в электролитах / Н.П. Гнусин, Н.П. Поддубный, А.И. Маслий. – Новосибирск: Наука, 1972. – 276с
2. *Минаев Е.Н.* Математические и электрохимические методы контроля и прогнозирования коррозии металлов / Е.Н. Минаев. – Саратов: Издательство «КУБиК», 2012. – 134 с.
3. *Минаев Е.Н.* Методика расчёта электрического поля в системе катодной защиты при смешанных граничных условиях / Е.Н. Минаев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2011. – №5. – С.215-219
4. *Минаев Е.Н.* Методы математической физики при исследовании электрохимических систем / Е.Н. Минаев – Саратов: Издательство «КУБиК», 2015. – 240 с.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ (05.02.00)

05.02.22

А.П. Буйносов д-р техн. наук, О.И. Ветлугина

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

**ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА ПЕРВОГО ОБЪЕМА
ЭЛЕКТРОВЗОВ ВЛ11 В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО**

В статье рассматривается возможность выполнения текущего ремонта первого объема и технического обслуживания четвертого объема электровозов на пятилетнюю перспективу, согласно указаниям ОАО «РЖД» по реструктуризации локомотивного хозяйства. Дано обоснование пополнения технологического оборудования для выполнения процессов, связанных с введением в сервисных локомотивных депо текущего ремонта.

Ключевые слова: электровоз, депо, сервис, ремонт, объем, текущий, организация.

Сервисное локомотивное депо (СЛД) Свердловск является базовым депо на полигоне Свердловской железной дороги по средним и текущим ремонтам электровозов ВЛ11 и оборудовано в соответствии с технологическими регламентами утвержденными ЦТ ОАО «РЖД». Однако, большая текучесть кадров ремонтников по причине неудовлетворенностью заработной платой, тяжелыми условиями труда, отсутствием жилья и необходимого резерва квалифицированных рабочих ставит вопрос о перенесении текущего ремонта первого объема (ТР-1) в другое депо, а именно в СЛД Нижний Тагил, где имеется значительный и регулярно пополняемый резерв рабочей силы. Организация ТР-1 выполнено под патронажем вице-президента ОАО «РЖД» Воротилкина А.В.

В настоящее время в СЛД Н. Тагил производится техническое обслуживание второго объема (ТО-2) шестистам электровозам ВЛ11 (3, 4 секции); ежемесячное техническое обслуживание третьего объема (ТО-3) шестнадцати электровозов ВЛ11, работающих в пассажирском движении; в оборотном депо Кушва (цех депо) выполняется четыреста сорок ТР-1 электровозов ВЛ11 (3, 4 секции).

Для выполнения предложения о передаче ТР-1 в СЛД Н. Тагил требуется детальное рассмотрение современных положений объемов и организации ремонта; требований к механизации работ, диагностированию, необходимому оборудованию и др.; необходимых капитальных вложений. ТР-1 по своему назначению включает обмывку, диагностирование и осмотр, ревизии и ремонт электровоза, а также техническое обслуживание четвертого объема (ТО-4), на котором производится обточка бандажей колесных пар и замена неисправных колесно-моторных блоков (КМБ).

Количество стойловых участков (стойл) непосредственно по осмотру, ревизии и ремонту оборудования при текущем ремонте зависит от многих факторов: простоев в ремонте, продолжительности смен, фонда рабочего времени стойла, равномерности постановки в ремонт и определяется по формуле:

$$C_{\text{ТР-1}} = \frac{N_{\text{ТР-1}} \cdot t_{\text{ТР-1}}}{K \cdot \Phi \cdot t_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}}} \cdot \psi, \quad (1)$$

где $N_{\text{ТР-1}}$ – количество ремонтов ТР-1; $t_{\text{ТР-1}}$ – норма простоя электровоза в ремонте, ч; K – переводной коэффициент учета секционности электровоза; Φ – фонд времени работы стойла, сут.; $t_{\text{см}}$ – продолжительность смены, ч; $n_{\text{см}}$ – число смен; ψ – коэффициент, учитывающий неравномерность постановки, $\psi = 1,1-1,2$.

При расчете принималось, что комплексные бригады работают по 12 ч. При этом возможны три варианта работы: 1) круглосуточно без выходных и праздничных дней, $\Phi =$

365 сут.; 2) круглосуточно за вычетом праздничных дней, $\Phi = 353$ сут.; 3) круглосуточно с выходными и праздничными днями, $\Phi = 249$ сут. Норма простая в текущем ремонте ТР-1 электровозов ВЛ11 (в 4-х секционном исполнении) согласно приказа начальника Свердловской железной дороги «О мерах по улучшению технического состояния локомотивов» № 255М от 29.04.2005 г. установлена 24 ч.

Кроме стойловых участков для осмотра, ревизий и ремонта электровозов при текущих ремонтах должны предусматриваться специальные стойла для диагностирования оборудования. Такие стойла диагностирования, например, имеет СЛД Свердловск. Согласно [1] установлена норма 0,5 ч на один КМБ для вибродиагностики. Время для диагностирования другого оборудования определяется техническими описаниями устройств. Ориентировочно оно составляет 4–5 ч. Общее время для диагностирования электровоза ВЛ11 (4 секции) составляет 12 часов [2].

Количество стойловых участков, необходимых для диагностирования и производства текущего ремонта ТР-1 приведено в табл. 1.

Таблица 1

Количество стойловых участков для текущего ремонта ТР-1

Наименование	Φ , сут.		
	365	353	249
Количество стойловых участков текущего ремонта ТР-1	1,36	1,40	2,24
Количество стойловых участков для диагностирования	0,68	0,70	0,99

Длина стойловых участков определяется по формуле

$$L = A + C, \quad (2)$$

где A – значение, зависящее от габаритных размеров локомотива и его сборочных единиц; C – постоянная величина, зависящая от вида ремонта, типа здания и принятой технологии [3].

Длина стойловых участков сервисного депо для электровозов ВЛ11 (3 секции) определяется по формулам: а) для сквозных путей $L = l + 15,70$ м; б) для тупиковых путей $L = l + 14,45$ м. Отсюда: $L_{a3} = 49,26 + 15,70 = 64,96$ м и $L_{б3} = 49,26 + 14,45 = 63,71$ м. Таким образом, исходя из строительного шага 6 м, длина стойловых участков для электровоза ВЛ11 (3 секции) составит 66 м. Длина стойловых участков сервисного депо для электровозов ВЛ11 (4 секции) определится из выражений: а) для сквозных путей $L_{a4} = l + 17,20$ м; б) для тупиковых путей $L_{б4} = l + 15,95$ м. Отсюда: $L_{a4} = 65,68 + 17,20 = 82,88$ м, $L_{б4} = 65,68 + 15,95 = 81,63$ м. При строительном шаге 6 м длина стойловых участков L для электровозов ВЛ11 (4 секции) при текущем ремонте ТР-1 должно быть 84 м.

Длина стоек технического обслуживания ТО-4 определится из выражения

$$L_{\text{ТО-4}} = 2 \cdot (l - k) + C, \quad (3)$$

где l – длина локомотива, м; k – расстояние от оси автосцепки до центра оси колесной пары, $k = 2,96$ м; C – постоянная величина: а) для сквозных путей 11,3 м, б) для тупиковых путей 10,5 м [4].

Отсюда для ВЛ11: а) $L_{\text{ТО-4}} = 2 \cdot (32,84 - 2,96) + 11,30 = 58,80 + 11,30 = 70,10$ м; б) $L_{\text{ТО-4}} = 2 \cdot (32,84 - 2,96) + 10,50 = 58,80 + 10,50 = 69,38$ м. Таким образом, длина $L_{\text{ТО-4}}$ для ВЛ11 из условий строительного шага составляет 72 м. Длина стойлового участка для выкатки колесно-моторного блока (КМБ) равна длине $L_{\text{ТО-4}}$ и составляет 72 м.

Рекомендованные нормы длин участков стойловой части локомотивных депо при проектировании и строительстве новых зданий для текущего ремонта ТР-1 электровозов ВЛ11 (3 секции) – 84 м, технического обслуживания ТО-4 ВЛ11 (3 секции) – 120 м.

Для электровозов ВЛ11 (4 секции), ВЛ10 длина стоек определится по тем же формулам и составит [для сквозных путей (а) и для тупиковых путей (б)]: а) $L_{\text{ТО-4}} = 2 \cdot (65,68 - 2,96) + 11,30 = 125,44 + 11,30 = 136,74$ м; б) $L_{\text{ТО-4}} = 2 \cdot (65,68 - 2,96) + 10,50 = 125,44 + 10,50 = 135,94$ м. Длина стоек ВЛ11 (4 секции) из условий кратности строительному шагу должна быть 142 м.

В то же время для реконструируемых зданий можно предусматривать расстояние от обреза канавы до торцевой стены 1,8–2,3 м вместо 4,25 м и расстояние от обреза канавы до оси автосцепки 1,2 м вместо 1,4 м. Это уменьшает расчетную длину стойловых участков на 4,4 м. Следовательно, расчетные длины канав ТО-4 будут составлять 132,3–131,54 м. Поэтому исходя из строительного шага длина стоек будет 132 м.

Таким образом, для производства текущего ремонта ТР-1 девяти сот электровозов ВЛ11 (4 секции) при современных методах ремонта требуется: 1) закрытые стойла для продувки электрооборудования, обмывки кузова, механического оборудования, подогрева и сушки изоляции тяговых двигателей; 2) испытательная станция локомотивов для диагностирования организованная на стойловом участке; 3) стойловые участки в количестве 1,3–2,2 для текущего ремонта ТР-1 длиной 84 м; 4) стойловые участки для технического обслуживания ТО-4 и выкатки КМБ длиной 142 м.

Норматив площади на ремонт электродвигателей при текущем ремонте ТР-1 определяли из соотношения [5]:

$$S_{ЭЛ-1} = S_{ЭЛ-3} \cdot \frac{T_{ТР-1,2}}{T_{ТР-3}}, \tag{4}$$

где $S_{ЭЛ-3}$ – норма площади электромашиного цеха при текущем ремонте ТР-3; $T_{ТР-1,2}$ и $T_{ТР-3}$ – трудоемкости ремонта тяговых двигателей при текущих ремонтах ТР-1,2 и ТР-3.

$$S_{ЭЛ-1} = (970 + 200) \cdot (12/360) = 39 \text{ м}^2.$$

С учетом расстановки оборудования и ремонта электрических машин, которые имеются в каждом локомотивном депо, можно принять норму площади электромашиного участка для локомотивных депо, производящих текущий ремонт ТР-1 40–60 м².

При производстве ТР-1 электровозов ВЛ11 в объеме 900 ед. в СЛД Н. Тагил программа ремонта ВЛ11 на перспективу до 2023 г. будет следующей (табл. 2)

Таблица 2

Программа ТР-1 электровозов ВЛ11 на перспективу до 2023 года

СЛД	План ремонта, ед. по годам					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Н. Тагил	900	900	900	900	900	900
Свердловск	826	1094	1176	1247	1291	1357
Пермь	1080	1063	1107	1163	1218	1255
Итого	2806	3057	3183	3310	3409	3512

Предлагается произвести сравнение экономической целесообразности двух вариантов: варианта производства ТР-1 парку электровозов серии ВЛ11 в планируемых объемах по существующей схеме, то есть в трех локомотивных депо; варианта производства текущего ремонта ТР-1 электровозов ВЛ11 в объеме 900 ед. в СЛД Н. Тагил с его реконструкцией.

Список литературы

1. Распоряжения ОАО «РЖД» № 3р «О системе технического обслуживания и ремонта локомотивов ОАО «РЖД» (в ред. распоряжений ОАО «РЖД» от 30.04.2007 №558р, от 22.06.2012 №1246р). М., 2012. 11 с.
2. Головатый А.Т., Исаев И.П., Горский А.В., Буйносов А.П. Система ремонта локомотивов на конкретных участках обращения // Железнодорожный транспорт. 1992. № 7. С. 40-44.
3. Цихалевский И.С., Кудяров М.М. Оптимизация организации ремонта локомотивов на полигоне Свердловской железной дороги // Транспорт Урала. 2012. № 1. С. 110-113.
4. Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. Т. 60. № 1. С. 85-91.
5. Цихалевский И.С., Ветлугина О.И., Кудяров М.М. Оптимизация организации ремонта грузовых электровозов 2ЭС6, 2ЭС10 с целью получения экономического эффекта // Транспорт Урала. 2014. № 1 (40). С. 45-48.

05.02.13

**И.В. Ивенина¹ канд. техн. наук, Ю.Г. Смирнов¹ канд. физ.-мат. наук.,
А.А. Лютоев¹, Е.И. Истомина²**

¹Ухтинский государственный технический университет,
институт фундаментальной подготовки,
Ухта, iv_ivenina@list.ru

²Коми научный центр УрО РАН, институт химии, Сыктывкар

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕГЕНЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ ЭМУЛЬГИРОВАННОЙ НЕФТИ

Работа посвящена проблеме очистки пластовых вод от эмульгированной нефти при помощи наночастиц магнетита и силового воздействия магнитного поля. Предложено и обосновано технологическое решение, включающее обязательный этап регенерации частиц магнетита, решающее проблему поддержания степени их дисперсности.

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, очистка воды от нефти, регенерация наночастиц магнетита.

В процессе добычи нефти из добывающих скважин непрерывно производится извлечение пластовых вод. Извлеченная вода может быть использована для повторного закачивания в пласт или после предварительной очистки сброшена на ландшафт. В любом случае необходим комплекс очистных мероприятий для удаления воды из воды нефти. В соответствии с выше изложенным, поиск эффективных, относительно недорогих и экологических методов очистки пластовой воды от остаточного нефтяного загрязнения является актуальной задачей.

Особую проблему составляет отделение эмульгированной нефти от воды, поскольку разделение водонефтяных эмульсий в отстойниках не эффективно в отношении эмульсий с высокой степенью дисперсности. К тому же содержащиеся в составе нефти природные поверхностно-активные вещества, такие как асфальтены и смолы, увеличивают гидрофильность поверхности нефтяных капель и стабилизируют образующиеся эмульсии. Следствием этого является проблематичность разделения подобных водонефтяных эмульсий механическими методами. Поэтому необходимы более эффективные методы тонкой очистки для извлечения нефти и нефтепродуктов из загрязненных вод.

Существует большой перечень методов и приемов удаления остаточного нефтяного загрязнения из воды после предварительного отстаивания в резервуарах-отстойниках. К ним относятся как физико-химические, так и биологические группы методов. Первая группа имеет существенный недостаток, связанный с утилизацией сорбента или коагулянта. Применение биологических методов, как правило сопряжено с длительностью процесса микробиологической деструкции нефти, поэтому они не могут быть включены, например, в цикл обратного водоснабжения.

В зарубежных публикациях [1], а также в экспериментальных исследованиях [2] была показана принципиальная возможность извлечения эмульгированной нефти в магнитном поле из загрязненной воды после обработки водонефтяной эмульсии наночастицами магнетита. Эти частицы агрегируются на границе раздела фаз вода-нефть, то есть на поверхности асфальтенового слоя, который покрывает нефтяные капли. Частицы магнетита, способные намагничиваться и направленно двигаться под воздействием внешнего магнитного поля, закрепившись на поверхности нефтяных капель, дают возможность извлечь эмульгированную в воде нефть с помощью воздействия магнитного поля. Среди преимуществ данной методики можно выделить следующие.

- Мобильность: метод может быть реализован непосредственно на территории месторождения и адаптирован для любых объемов загрязненной воды.
- Замкнутый цикл: возможность регенерации очищающего реагента обеспечивает отсутствие отходов после очистки.
- Удобство автоматизации процесса очистки воды: узел очистки воды и регенерации магнитных частиц может быть встроен в уже имеющиеся схемы оборотного водоснабжения.

Данный метод очистки рассматривается как перспективный, но еще не получивший практического применения. Одной из причин этого является отсутствие технологической схемы, включающей в себя, помимо самой операции очистки воды, так же и стадию восстановления отработанных ферромагнитных наночастиц, загрязненных нефтепродуктами.

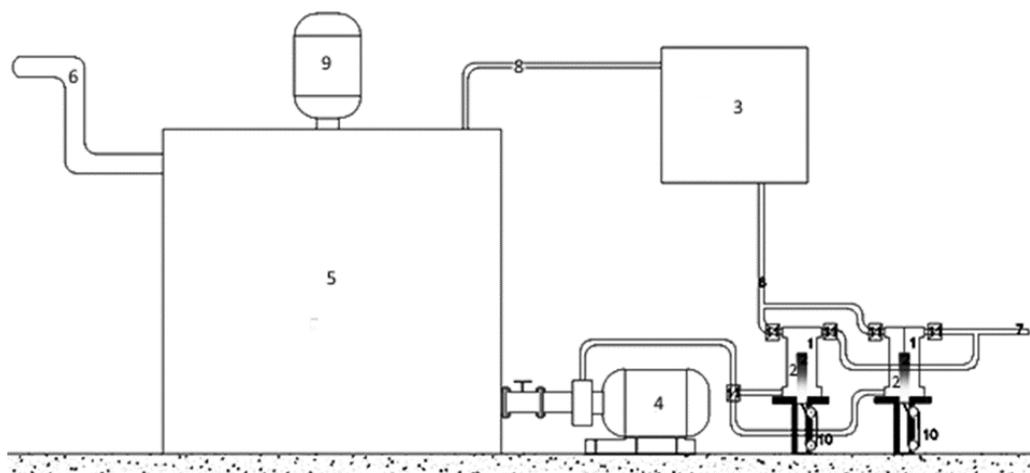


Рис. 1- Схема очистки пластовой воды от эмульгированных нефтепродуктов:

- 1) магнитный сепаратор, 2) неодимовый магнит, 3) блок восстановления магнитных частиц (БВМЧ), 4) насос, 5) резервуар-смеситель, 6) трубопровод от РВС, 7) трубопровод к блочно-кустовым насосным станциям (БКНС), 8) трубопровод к БВМЧ; 9) электродвигатель смесителя, 10) подъемный механизм неодимового магнита, 11) электроклапан.

Технологическая схема процесса определяет как его экономичность, так и экологические аспекты применения метода, что в конечном итоге позволяет судить о целесообразности его использования. Принципиальная схема очистки пластовой воды от нефтепродуктов представлена на рисунке 1 [3]. Для коалесценции и извлечения намагниченных эмульсий можно использовать как электромагниты, так и постоянные магниты. Для укрупнения и удаления эмульсий можно использовать магнитные сепараторы в различных модификациях.

В рамках данной статьи в этой схеме будет подробно рассмотрена работа блока 3 восстановления магнитных наночастиц (рис. 1).

В качестве основной химической реакции для получения наночастиц предлагается использовать метод Рене Массарта [4], основанный на реакции гидролиза смеси солей железа (II, III) раствором аммиака. Форма, размеры и состав образующихся частиц зависит от типа соли (хлориды, сульфаты, нитраты), соотношения Fe^{2+}/Fe^{3+} , температуры проведения реакции, pH, а также от типа основания и скорости перемешивания [5]. При оптимальном сочетании названных факторов получают наноразмерные частицы магнетита Fe_3O_4 .

Главной задачей регенерации ферромагнитных наночастиц является их очистка от «налипшей» нефти и нефтепродуктов и при этом обязательным является сохранение степени дисперсности, то есть их нано-размеров. Последний аспект обусловлен тем, что полнота извлечения эмульгированных нефтепродуктов из воды неразрывно связана с размерами частиц магнетита [6]. Предлагаемая схема регенерации включает следующие стадии после извлечения из водной фазы.

1) Механическая очистка магнитного сепаратора от «нефте-магнетитной» массы, которую далее подвергают термической обработке для удаления влаги и нефтепродуктов в блоке ВМЧ.

2) Термическое удаление нефтепродуктов при температуре до 700°C. В процессе термической обработки магнетит окисляется и полностью переходит в оксид железа (III).

3) Растворение оксида железа (III) в соляной кислоте с образованием хлорида железа (III).

4) Добавление хлорида двухвалентного железа.

5) Осаждение магнетита раствором аммиака.

Следует отметить, что в данном технологическом решении неизбежной будет наработка FeCl_3 , то есть в каждом новом цикле образуется избыточное количество хлорида железа (III), который также может найти свое применение, в частности в таком методе очистки воды, как электрохимическая коагуляция.

Однако в данной схеме возможно введение узла восстановления железа для получения соли Fe(II) . Это, во-первых, снимет вопрос утилизации хлорида железа (III); во-вторых, отпадет необходимость регулярного добавления новых порций соли двухвалентного железа. То есть цикл регенерации наночастиц для очистки воды будет полностью замкнутым.

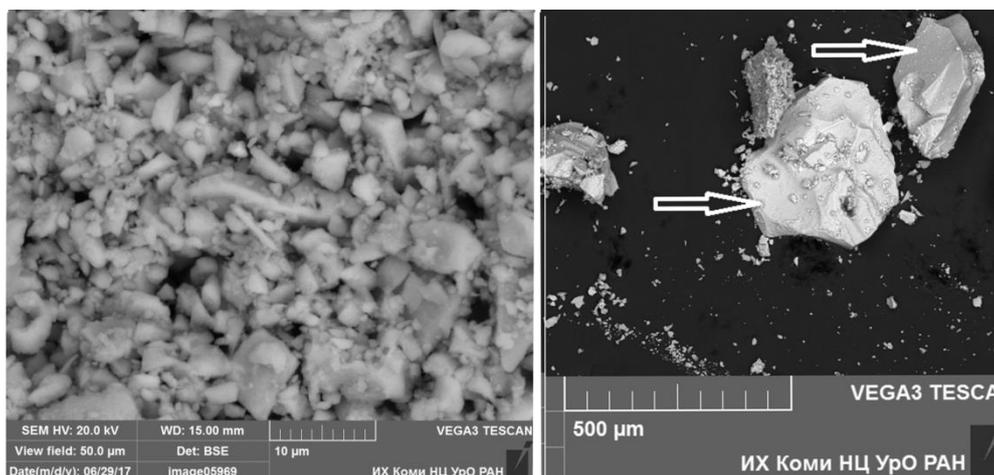
К преимуществам предлагаемой технологической схемы следует отнести также следующий момент. Всякий раз для извлечения эмульгированной нефти будут использованы свежесаженные наночастицы, то есть метод не предполагает хранения магнетита, следовательно, не возникает вопрос о его стабилизации в жидкой фазе. Для поддержания наноразмерности частиц обычно используют поверхностно-активные вещества (ПАВ), как правило, жирные кислоты (например, олеиновую, стеариновую) или их смеси. Введение таких веществ в очищаемую воду стало бы дополнительным фактором ее загрязнения и, следовательно, потребовало бы дополнительных мер очистки.

Авторы работы [5] установили оптимальные концентрации солей железа (0,5% масс.) и раствора аммиака (2% масс.) для получения стабильной водной суспензии магнитных частиц после многократной промывки водой до достижения нейтральной среды. Однако, в предлагаемой технологической схеме столь низкие концентрации реагентов и промывка дистиллированной водой потребуют дополнительные расходы на очистку воды икратно увеличат водооборот. Поэтому методика получения взвеси наночастиц в описываемой серии эксперимента заключалась в следующем. Смесь растворов солей FeCl_2 и FeCl_3 в молярном соотношении 1:2, содержащая избыток HCl , доводили до температуры 50°C и порционно добавляли к ней раствор аммиака (10% масс.) при постоянном перемешивании до появления стойкой нерастворяющейся черной взвеси. В результате получали рабочую жидкость, содержащую в среднем 0,05-0,1 моль Fe_3O_4 на 1 л взвеси. Образующиеся при этом частицы обладают выраженными магнитными свойствами, однако не обладают седиментационной устойчивостью. Однако достижение состояния устойчивой суспензии не являлось задачей при разработке методики в силу упомянутых выше причин.

Для дальнейшего исследования полученные частицы высокодисперсного магнетита извлекали из суспензии, высушивали и исследовали на сканирующем электронном микроскопе типа TescanVega III SBU института химии Коми научного центра УрО РАН. Указанный электронный сканирующий микроскоп (СЭМ) позволяет проводить исследования методом энергодисперсионного анализа на микронном и субмикронном уровне с увеличением до 1000000х. Результаты исследования приведены на рисунках 2-4.

В отсутствие внешнего магнитного поля агрегаты формируются из хаотично ориентированных наночастиц магнетита, образуя микроагрегаты с размером широкого диапазона: от 0,1 до 20 мкм..

При высушивании образца в ходе пробоподготовки происходила вторичная агрегация, в следствии чего микроагрегаты соединялись в более крупные образования - "сверхагрегаты", сохраняя, тем не менее, свою структурную обособленность (рис. 2а).



а)

б)

Рис. 2- Внешний вид агрегированных наночастиц Fe_3O_4 :
 а) "сверхагрегат" из наночастиц Fe_3O_4 ;
 б) внешний вид "монолитных" частиц (указаны стрелкой)

В свою очередь, та доля наночастиц, которые находились в исходной суспензии в свободном (неагрегированном) состоянии, при высушивании пробы образовывала более крупные структуры, которые при небольшом увеличении кажутся фрагментами однородного вещества (рис. 2б).

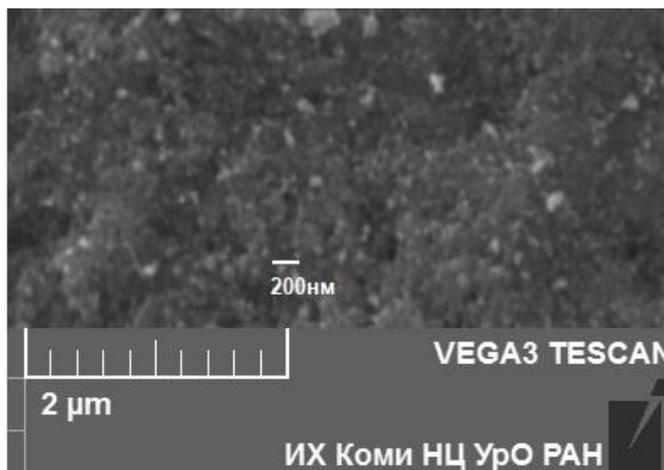


Рис. 3- Электронная микрофотография поверхности "монолитной" частицы

Однако на большем увеличении заметно, что сложены эти "монолиты" из наноструктурных фрагментов, вследствие чего частицы имеют вид "зернистой" поверхности (рис. 3). Размер «зерна», различимого на микрофоторграфии, не превышает 40 нм и, по-видимому, является результатом агрегации более мелких (первичных) наночастиц [5].

Структура частиц, рассмотренных с использованием электронного микроскопа, позволяет охарактеризовать агрегацию наночастиц магнетита, как многоступенчатый, растянутый во времени процесс. Первичная агрегация происходит практически сразу после образования наночастиц и приводит к формированию ассоциатов, не превышающих наноразмеры. Дальнейшее укрупнение наночастиц в отсутствие стабилизатора приводит к образованию макрочастиц.

В магнитном поле агрегирующиеся наночастицы образуют упорядоченные пластинчатые структуры с толщиной стенки порядка 0,3-0,8 мкм. Однако в присутствии в водной системе включений, например, эмульсионных капель, агрегация наночастиц начинается на границе раздела фаз масло-вода, что приводит к формированию сферических агрегатов (рис. 4).

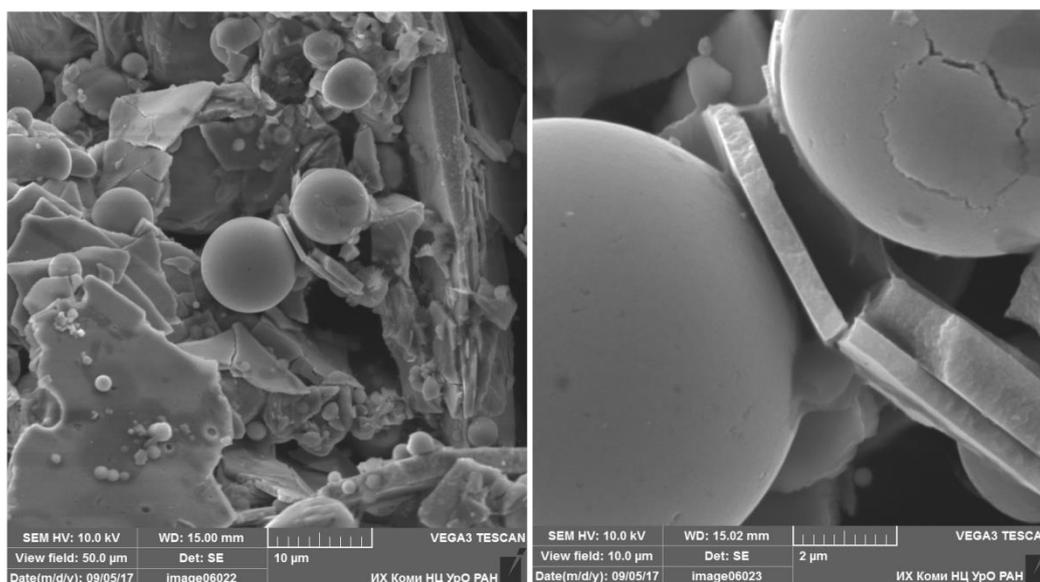


Рис. 4 - Электронные микрофотографии образца агрегатов магнитных частиц, извлеченных из водной суспензии, находившейся под воздействием магнитного поля.

Таким образом, эмульсионная капля "инкапсулируется" внутри образовавшейся сферы. Толщина и плотность стенок такой "капсулы" будет зависеть от относительной концентрации наночастиц, вернее говоря, от соотношения числа эмульсионных капель и наночастиц в системе. Учитывая результаты электронной микроскопии, можно сделать следующие выводы.

1. Наночастицы магнетита, не стабилизированные в водной фазе, неизбежно объединяются в более крупные агрегаты, что снижает эффективность предлагаемого метода очистки воды от нефти. Агрегация наночастиц носит ступенчатый неравномерный характер. Следовательно, оптимальным является их использование в первые минуты после осаждения.

2. Методика получения частиц магнетита в ходе химической регенерации после предварительной термической обработки позволяет обеспечить наноразмерность получаемого продукта, что обуславливает максимальную эффективность разделения водонефтяных эмульсий в процессе водоочистки.

Список литературы

1. *Sullivan A.P., Kilpatrick P.K.* The effect of inorganic solid particles on water and crude oil emulsion stability // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2002. – Vol.41. – P.3389-3404
2. *Лютноев А.А., Смирнов Ю.Г., Ивенина И.В.* Извлечение эмульгированных примесей нефти из воды при помощи высокодисперсных частиц магнетита // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.* – 2014. - №4. – С. 40-45.
3. *Лютноев А.А., Смирнов Ю.Г., Ивенина И.В., Истомина Е.И.* Подготовка магнитных частиц для системы очистки пластовых вод от нефтяных загрязнений // *Проблемы геологии, разработки и эксплуатации месторождений высоковязких нефтей и битумов: матер. всеросс. научно-техн. конф. (с междунар. участием) (2-3 ноября 2017г.)*.– Ухта: УГТУ, 2018.- С.163-166.
4. *Massart, R.* Preparation of aqueous magnetic liquids in alkaline and acidic media // *IEEE Trans. Magn.*, 1981, Mag-17, 2. P. 1247–1248.
5. *Петракова А.В., Урусов А.Е., Костенко С.Н., Придворова С.М., Васильев М.А., Жердев А.В.* Синтез магнитных наночастиц оксида железа для применения в иммуноанализе // *Электронный научный журнал Современные проблемы науки и образования.* – 2013. – № 5. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=10559> (дата обращения: 16.06.2018).
6. *Лютноев А.А., Смирнов Ю.Г., Лютноева Е.А.* Оценка эффективности очистки пластовых вод от эмульгированных нефтепродуктов с применением системы магнитных частиц и магнитного поля // *Известия Коми научного центра Уро РАН № 1(25).* Сыктывкар, 2016. С.68-73.

05.02.00

А.А. Каменских канд. техн. наук, К.С. Крецу

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, anna_kamenskih@mail.ru**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА ЗУБНОЙ ПАРЫ ЧЕРЕЗ
ТРЕХСЛОЙНУЮ КАППУ**

В работе представлены результаты численного моделирования контакта зубов канонической формы без учета и с учетом трехслойной каппы. Выполнен анализ влияния уровня нагрузки на деформирование контактного узла. Установлено понижение уровня максимального контактного давления при использовании зубной шины максимально в 1,2 раза. Максимальный уровень интенсивности напряжений при контакте пары зубов через трехслойную каппу ниже в 1,33 и 1,49 раза в зубах верхнего и нижнего зубного ряда соответственно, чем при контакте без каппы.

Ключевые слова: А-силикон, Ева, трехслойная каппа, контакт.

На протяжении последних десятилетий можно отметить особый интерес отечественных и зарубежных ученых к вопросам биомеханического моделирования задач стоматологии: моделирование начальных перемещений элементов зубочелюстной системы под воздействием ортодонтических нагрузок [1], экспериментальное и численное исследование поведения материалов защитной протетической конструкции [2], численное моделирование прикуса [3], анализ контактного взаимодействия пары зубов с защитной зубной шиной и др.

При этом актуальность проблемы профилактики травм зубочелюстной системы с использованием индивидуальных средств защиты в виде протетических конструкций, которая широко отражена в [4-6] формирует новый класс задач биомеханики зубочелюстной системы. Одним из таких направлений исследования является анализ свойств материалов спортивных зубных шин [2, 5]. А компьютерное моделирование биомеханического поведения, как самих конструкций, так и материалов из которых они изготовлены, позволит выявить качественные и количественные закономерности деформирования элементов зубочелюстной системы под действием штатных и внештатных нагрузок.

В работе выполнена реализация численного моделирования контактного взаимодействия трехслойной каппы с парой зубов канонической геометрии (рис. 1): 1-2 – зуб из верхнего и нижнего зубного ряда соответственно, 3-4 внешние слои каппы из этиленвинилацетата (Ева); 5 – внутренний слой каппы из А-силикона.

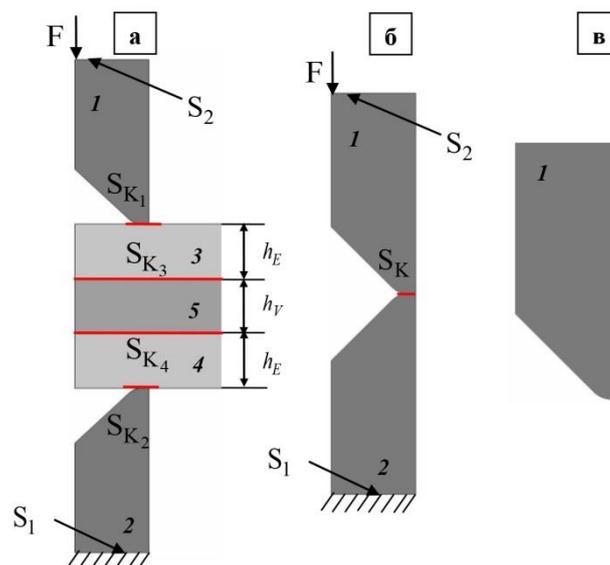


Рис. 1 – Расчетные схемы: а) контакта через трехслойную каппу; б) контакт без учета каппы; в) геометрия зуба-индентора

Рассматривается контакт зубов без учета защитной шины и через трехслойную каппу в упрощенной постановке (рис. 1). Зуб-штамп индентируется постоянной силой F от 10 до 50 Н, высота и ширина зуба составляют $h = 6 \cdot 10^{-3}$ м и $b = 5 \cdot 10^{-3}$ м соответственно. Толщина слоя Eva и А-силикон одинаковая и равна $h_E = h_V = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Зубная эмаль и А-силикона работают в рамках теории упругости с модулями юнга $80,4 \cdot 10^3$ МПа и 0,3 МПа соответственно. Eva проявляет упругопластические свойства, диаграмма $\sigma - \epsilon$ материала показана в [7].

Математическая постановка задачи

Математическая постановка биомеханического контакта пары зубов с учетом и без учета протетической конструкции включает в себя уравнения равновесия, физические и геометрические соотношения. На границах контакта рассматривается три типа контактных состояний и граничных условий [8]: прилипание, проскальзывание, отлипание. Постоянная сила индентирования от 10 до 50 Н действует на границе S_2 , на которой так же запрещен изгиб. На границе S_1 запрещены перемещения по координате y . Коэффициент трения принят постоянным и равен 0,3. При контакте пары зубов через протетическую конструкцию контактная поверхность S_K включает в себя две зоны контакта каппы с зубами верхнего и нижнего зубного ряда S_{K1} , S_{K2} соответственно и две зоны контакта с прослойкой из А-силикона S_{K3} , S_{K4} .

Результаты численного решения задачи

В рамках численного моделирования работы материалов протетических конструкций выполнена оценка изменений уровня и характера распределения контактных параметров на S_{K1} , S_{K2} (рис. 2) и S_{K3} , S_{K4} (рис. 3).

Максимальный уровень контактного давления при контакте зубов через каппу приблизительно в 1,2 раза меньше чем при контакте зубов без учета протетической конструкции.

Пик контактного давления и контактного касательного напряжения наблюдается вблизи острого края зуба-индентора. Уровень контактного касательного напряжения приблизительно в 10 раз меньше, чем уровень контактного давления.

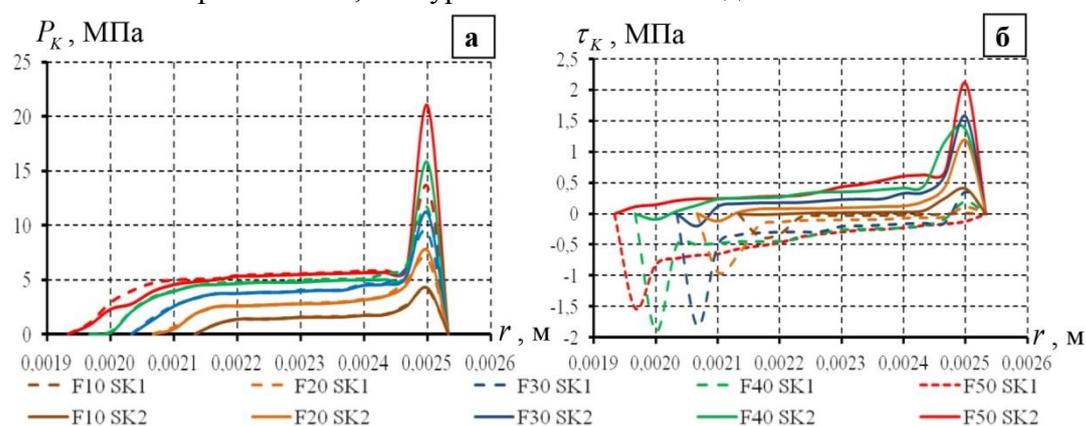


Рис.2 – Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на S_{K1} и S_{K2}

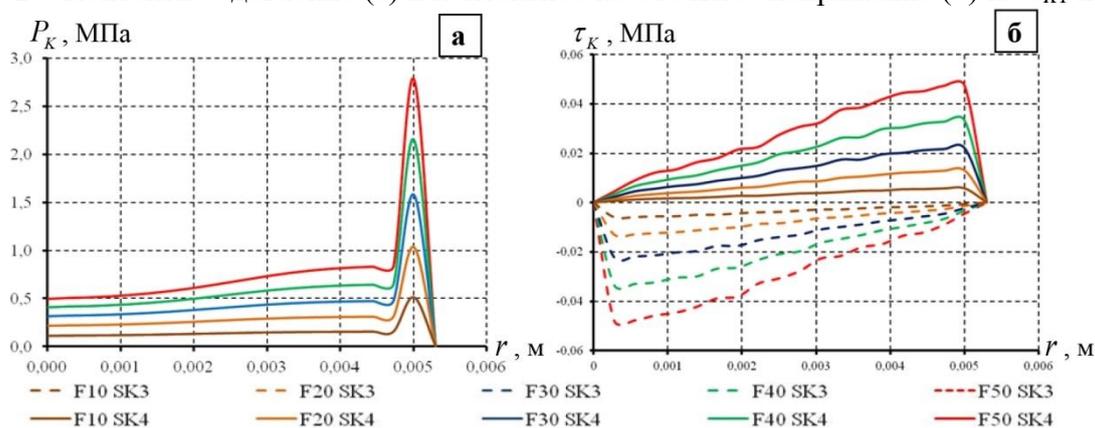


Рис.3 – Контактное давление (а) и контактное касательное напряжение (б) на S_{K3} и S_{K4}

Максимальный уровень контактного давления на S_{K3} и S_{K4} меньше более чем в 7 раз, чем на S_{K1} и S_{K2} . При этом уровень контактного давления на S_{K3} и S_{K4} более чем в 50 раз меньше контактного давления.

Особый интерес представляют поля распределения интенсивности напряжений в зубной эмали (рис. 4).

При нормальном уровне физиологических нагрузок максимальный уровень интенсивность напряжений при контакте через капу в зубе верхнего зубного ряда в 1,33 раз меньше чем при контакте без учета зубной шины, в зубе нижнего зубного ряда в 1,49 раза меньше. Максимальное значение интенсивности напряжений наблюдается вблизи контакта пары зубов с капшой у острого края зубов.

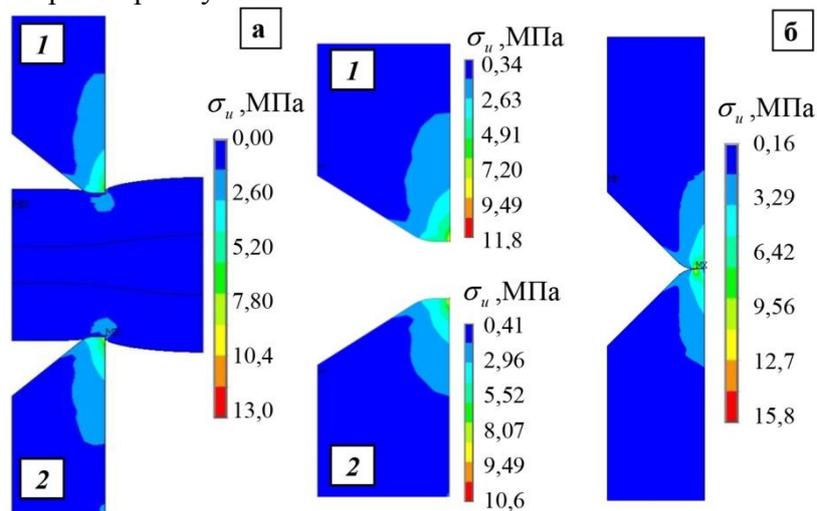


Рис.4 – Интенсивность напряжений контакт с учетом (а) и без учета (б) каппы при $F = 50$ Н

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 17-48-590411 р_а.

Список литературы

1. Арутюнов С.Д., Гаврюшин С.С., Демшикевич Э.Б. Конечно-элементное моделирование ортодонтических перемещений зубочелюстной системы // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Естественные науки. 2014. № 3 (54). С. 108-120.
2. Лохов В.А., Кучумов А.Г., Мерзляков А.Ф., Асташина Н.Б., Ожгихина Е.С., Тропин В.А. Экспериментальное исследование материалов новой конструкции спортивной зубной шины // Российский журнал биомеханики. 2015. Т. 19. №4. С. 409-420.
3. Тверье В.М., Никитин В.Н., Кротких А.А. Уточнение прикуса на основе биомеханического моделирования // Российский журнал биомеханики. 2017. Т. 21. № 1. С. 41-50.
4. Копецкий И.С., Васильев Ю.Л. Роль индивидуальных защитных зубных капп в профилактике спортивного травматизма челюстно-лицевой области // Dental Forum. 2016. № 3. С. 32-34.
5. Севбитов А.В., Ачкасов Е.Е., Канукоева Е.Ю., Борисов В.В., Султанова О.А. Индивидуальные защитные зубные шины для спортсменов, принимающих участие в контактных видах спорта // Спортивная медицина: наука и практика. 2014. № 2. С. 42-46.
6. Ибрагимов Т.И., Хан А.В., Хван В.И. Изучение прочности материалов для изготовления индивидуальных защитных спортивных капп при ударных знакопеременных нагрузках // Стоматология для всех. 2011. № 2. С. 42-44.
7. Каменских А.А., Лесникова Ю.И. Численное моделирование контакта полупространства из этиленвинилацетата с зубом-индентором // Математическое моделирование в естественных науках. 2017. Т. 1. С. 22-26.
8. Каменских А.А., Адамов А.А. Численное исследование сферического контактного узла с полимерной антифрикционной прослойкой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3-2. – С. 48-55.

05.02.00

А.А. Каменских канд. техн. наук, Т.Н. Устюгова

ФГБОУ ВО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, anna_kamenskih@mail.ru

АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТАКТА ЗУБНОЙ ПАРЫ ЧЕРЕЗ ПРОТЕТИЧЕСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ

В работе представлены результаты моделирования контакта пары зубов без учета и с учетом протетической конструкции. Выполнен анализ сходимости численного решения задачи в зависимости от степени дискретизации системы, выбрана оптимальная конечно-элементная сетка с градиентным сгущением к зоне контакта. Проанализировано влияние уровня функциональной нагрузки на напряженно-деформированное состояние контактного узла в целом и зоны контакта в частности. Установлено понижение уровня максимального контактного давления при использовании зубной шины максимально в 3,05 и 2,1 раза в зоне контакта с зубом верхнего и нижнего зубного ряда соответственно.

Ключевые слова: *Eva, зуб, протетическая конструкция, контакт.*

Актуальность проблемы профилактики травм зубочелюстной системы с использованием индивидуальных средств защиты в виде протетических конструкций широко отражена в [1-3 и др.]. Анализ современного состояния области применения защитных протетических конструкций в стоматологии, а также необходимость и особенности применения зубных шин с целью профилактики травматизма подробно рассмотрена в [1]. В работе [2] большое внимание уделено анализу различных вариантов средств индивидуальной защиты в виде зубных шин, изготовленных на основе этиленвинилацетата. Большое количество работ посвящено исследованию влияния использования протетических конструкций на зубочелюстную систему человека и снижение нагрузки на зубной ряд при занятии спортом и тяжелым физическим трудом.

В связи с актуальностью использования защитных конструкций в виде зубных шин с целью профилактики травматизма зубочелюстной системы возникла необходимость в компьютерном моделировании биомеханического поведения, как самих конструкций, так и материалов из которых они изготовлены.

В работе рассмотрена задача численного моделирования контактного взаимодействия для двух расчетных схем (рис. 1): первая – контакт зубов верхнего (1) и нижнего (2) зубного ряда без учета протетической конструкции, вторая – контакт зубной пары через протетическую конструкцию (3). Физико-механические свойства этиленвинилацетата (Eva), материала из которого изготовлена зубная шина были получены по результатам серии экспериментов [4]. Модуль Юнга для упругого участка составил $17,1 \pm 1,58$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,46$.

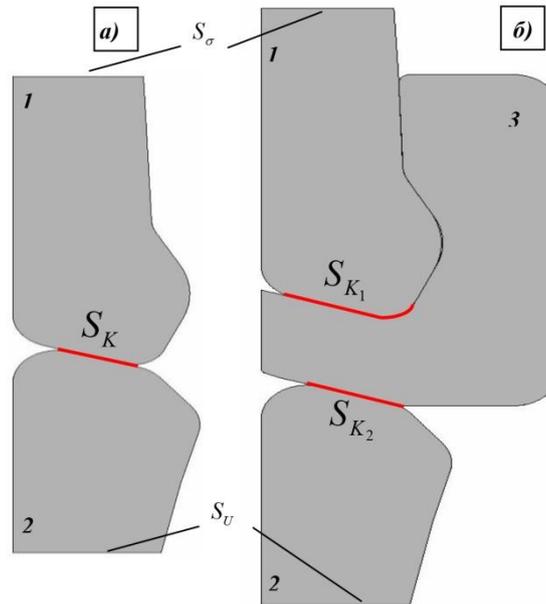


Рис. 1 – Расчетные схемы контакта зубов верхнего и нижнего зубного ряда:
а) без учета и б) с учетом протетической конструкции

Математическая постановка задачи

Математическая постановка биомеханического контакта пары зубов с учетом и без учета протетической конструкции для модели упругого поведения материала включает в себя уравнения равновесия

$$\text{div } \hat{\sigma} = 0, \quad \bar{x} \in V \tag{1}$$

геометрические соотношения

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left(\nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T \right), \quad \bar{x} \in V \tag{2}$$

физические соотношения

$$\sigma = \lambda I_1(\hat{\varepsilon}) \hat{I} + 2\mu \hat{\varepsilon}, \quad \bar{x} \in V \tag{3}$$

где λ и μ – параметры Ламе, $\hat{\sigma}$ – тензор напряжений, $\hat{\varepsilon}$ – тензор деформаций, \bar{u} – вектор перемещений, \bar{x} – радиус-вектор произвольной точки расчетного объема, $I_1(\hat{\varepsilon})$ – первый инвариант тензора деформаций, \hat{I} – единичный тензор, V – расчетный объем ($V = V_1 \cup V_2$ для первой расчетной модели, $V = V_1 \cup V_2 \cup V_3$ для второй расчетной модели), V_1 и V_2 – объем зубов верхнего и нижнего зубного ряда соответственно, V_3 – объем протетической конструкции.

Математическая постановка (1)-(3) дополняется граничными и контактными условиями: на границе S_σ приложена постоянная нагрузка, которая варьируется от 50 до 500 Н и запрещен изгиб; на границе S_U запрещены перемещения по координате y ; на границах контакта $S_{\text{конт}}$ рассматривается контактное взаимодействие с учетом трения по сопрягаемым поверхностям и всеми типами контактного состояния (прилипание, проскальзывание, отлипание) [5].

Наибольший интерес представляют характер контакта в зонах контакта S_K для первой расчетной схемы и S_{K1}, S_{K2} для второй расчетной схемы.

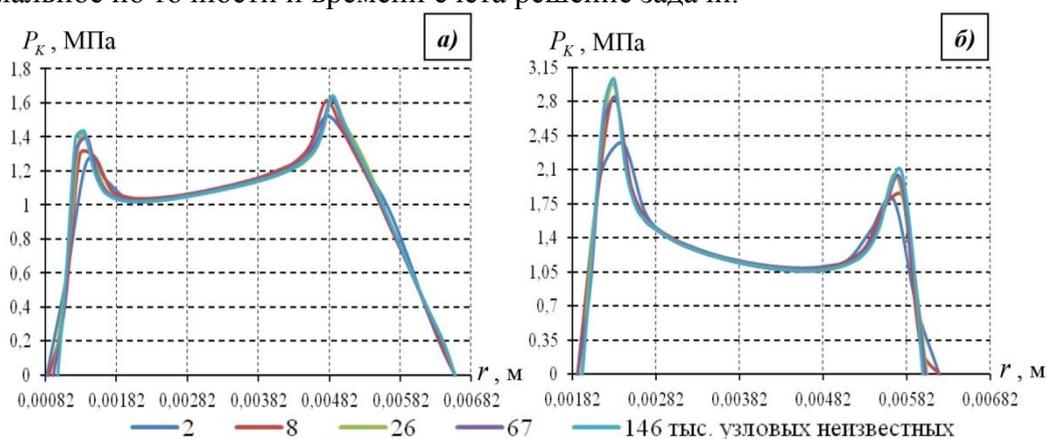
Результаты численного решения задачи

В рамках работы выполнен анализ сходимости численного решения задачи в зависимости от степени дискретизации системы при постоянной силе индентирования 100 Н, характеристики конечно-элементной сетки представлены в таблице.

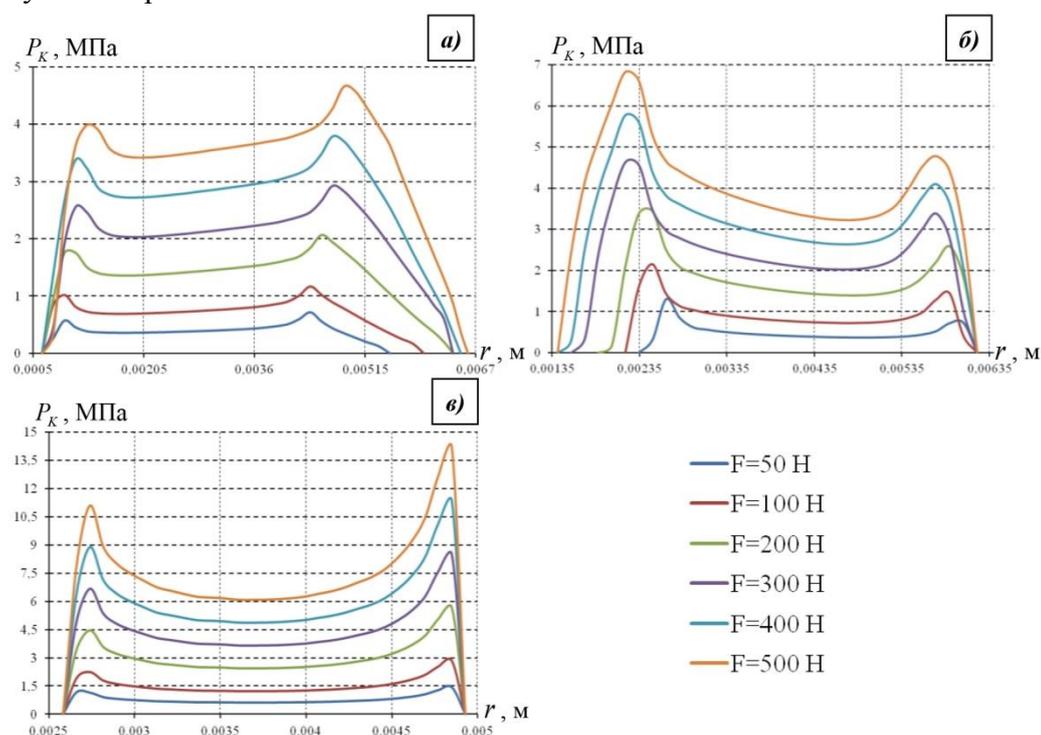
Таблица – Параметры конечно-элементной сетки второй расчетной схемы

№ п/п	Количество узловых неизвестных, тыс.	Количество контактных элементов	Максимальный размер элемента, м	Минимальный размер элемента, м
1	2	114	1,00E-03	2,50E-04
2	8	240	4,50E-04	1,15E-04
3	26	451	2,50E-04	6,25E-05
4	67	715	1,50E-04	3,75E-05
5	146	1127	1,00E-04	2,50E-05

На рис. 2 показано распределение контактного давления на S_{K1} , S_{K2} для второй расчетной схемы. Анализируя результаты численного решения выбрана конечно-элементная сетка с 26 тыс. узловых неизвестных и градиентным сгущением элементов к зонам контакта, которая дает оптимальное по точности и времени счета решение задачи.

Рис.2 – Контактное давление на S_{K1} (а) и S_{K2} (б)

На рис. 3 показана зависимости распределения контактного давления для разного уровня силы индентирования ($F = 50 \dots 500$ Н). На рис. 3 можно наблюдать асимметрию распределения контактного давления для всех расчетных схем, что связано с асимметрией геометрии зубной пары.

Рис.3 – Зависимость P_K от силы индентирования: модель контакта с учетом (S_{K1} (а); S_{K2} (б)) и модель контакта без учета протетической конструкции (S_K (в))

В рамках численной реализации установлено, что при нормальном уровне физиологической нагрузки 50 Н $\max P_K$ при контакте через зубную шину в 2 и 1,1 раза меньше $\max P_K$ модели контакта без каппы для зоны контакта S_{K1} и S_{K2} соответственно. При увеличении силы индентирования различия уровня максимально контактного давления становятся более значительные, при силе индентирования 500 Н $\max P_K$ при контакте через зубную шину в 3,05 и 2,1 раза меньше $\max P_K$ модели контакта без каппы для зоны контакта S_{K1} и S_{K2} соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект № 17-48-590411 p_a.

Список литературы

1. *Копецкий И.С., Васильев Ю.Л.* Роль индивидуальных защитных зубных капп в профилактике спортивного травматизма челюстно-лицевой области // Dental Forum. 2016. № 3. С. 32-34.
2. *Севбитов А.В., Ачкасов Е.Е., Канукоева Е.Ю., Борисов В.В., Султанова О.А.* Индивидуальные защитные зубные шины для спортсменов, принимающих участие в контактных видах спорта // Спортивная медицина: наука и практика. 2014. № 2. С. 42-46.
3. *Ибрагимов Т.И., Хан А.В., Хван В.И.* Изучение прочности материалов для изготовления индивидуальных защитных спортивных капп при ударных знакопеременных нагрузках // Стоматология для всех. 2011. № 2. С. 42-44.
4. *Лохов В.А., Кучумов А.Г., Мерзляков А.Ф., Асташина Н.Б., Ожгихина Е.С., Тропин В.А.* Экспериментальное исследование материалов новой конструкции спортивной зубной шины // Российский журнал биомеханики. – 2015. – Т. 19. – № 4. – С. 409-420.
5. *Каменских А.А., Адамов А.А.* Численное исследование сферического контактного узла с полимерной антифрикционной прослойкой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 3-2. – С. 48-55.

05.02.02

Е.О. Кузнеченков, С.О. Маслов, А.В. Жданов канд. техн. наук

Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,
Владимир, kuznechenkovegor@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В статье рассмотрен способ адаптации системы дополненной реальности в условиях обучения. Ее использование гарантирует максимальное понимание протекающих процессов даже для людей другой сферы деятельности. Так же расписаны шаги создания анимации 3D объектов.

Ключевые слова: *виртуальная реальность, дополненная реальность, развлечения, наука, новшества, проектирование, обучение, инновации, технологии.*

Виртуальная реальность – это воссозданный мир при помощи современных технологий обманывающий средства восприятия человека, зачастую повторяющий физические законы, а иногда в развлекательных целях этим пренебрегающий [1-5]. В нем используются объекты, с которыми можно воздействовать, если это подразумевается при моделировании или не ограничивается функционалом периферийных устройств [6-8]. Многие не понимают различия между дополненной и виртуальной реальностью, хотя они колоссальны. Дополненная реальность это существующий мир с дополнительными данными на очках, таких как карта или время, которые предоставляют пользователю дополнительную информацию и возможность. А виртуальная реальность - это полностью рукотворно созданный мир при помощи вычислительной техники.

Людям, связанным с высокими технологиями, пришлось адаптироваться и внедрять такие возможности в производства или обучение. Но это является сложной задачей так как потребует не малых время затрат, на создание необходимых моделей, а так же его дальнейшего анимирования. Поэтому рассмотрим этот процесс подробнее.

Анимация создается, используя специализированные программы. Первым шагом является работа в 3D редакторе, где воссоздается изделие из эскизов или чертежей, соблюдая размеры и пропорции. В ней задаются свойства материалов, цвета, а при необходимости можно изменить и внешнюю структуру, которая будет видна. Другими словами, в виртуальном мире будут визуально различимы поверхности стали, чугуна, бетона и так далее.

Чтобы была доступна функция анимирования изделия или узла, модель нужно создавать из отдельных маленьких частей, так как в дальнейшем они будут двигаться, имитируя процесс сборки. Далее используя сопутствующие приложения можно задать траектории движения частей. И это будет выглядеть так, как будто появился основной, массивный корпус, а далее к нему подлетают и прикручиваются недостающие компоненты. В итоге собирается искомый внешний вид.

Завершающим этапом является адаптация анимации в приложении для работы с очками дополненной реальности. В ней корректируется масштаб, выбирается конечный внешний вид модели, а так же можно выбрать вариант устройства, на которое будет выводиться изображение с дополнительной информацией.

Таким образом, получается анимация, созданная в виртуальном мире, остается открыть приложение на устройстве и увидеть ее. Для удобства восприятия фон модели используется прозрачный, именно эта особенность является отличием дополненной и виртуальной реальности. Пользователь одевает очки или берет в руки планшет (телефон) и видит лишь конечный результат, зачастую не представляя какие колоссальные силы были затрачены на его создание (рис.1).



Рисунок 1. Применение очков дополненной реальности

Программа проецирует заранее построенный 3D макет на линзы прозрачных очков, а пользователь видит реальный мир и проецируемое изделие. При помощи гироскопа очки понимают пространственное положение смотрящего и корректируют ориентацию модели. В данном случае модель привязана к поверхности стола (рис 2).



Рисунок 2. Анимация сборки двигателя

Для упрощения воздействия с дополненной реальностью, была разработана программа, в которой можно воздействовать с проектируемой моделью. Увеличивать и вращать макет, для детального рассмотрения и более точного представления, так же можно изменять прозрачность. При помощи такой программы можно смотреть 3D анимации и останавливать их в нужный момент, для детального и качественного рассмотрения, как говорилось ранее. Части изделия специально окрашены разными цветами, чтобы не сливались в одну серую картинку и были контрастны по отношению к фону.

Такое приложение позволяет смотреть на объемные изделия в реальном времени. При необходимости с его помощи можно представить, как будет выглядеть постройка в определенном месте. А так же иметь видеть детали конструкции изнутри, не изготавливая её и не тратя материалы на макет. Таким образом, была разработан 3D макет в систему дополненной реальности, в которой можно увидеть детали будущего цеха.

Ранее был описан процесс создания анимации небольших моделей, не стоит забывать, что виртуальным мир не имеет пространственного ограничения, если не считать порога допустимого объема информации конечной модели и изображений. Поэтому, так же можно воссоздать сборку и более сложных изделий и даже процесс работы большого многофункционального центра с его особенностями работы (рис. 3).

При помощи такого приложения с легкостью можно воссоздать любой процесс, показывая который обучаемый с легкостью поймет то, чего раньше приходилось объяснять долгое время. Так как это знание будет зрительным, а для мозга будет считаться личным опытом, пускай даже проделанный не собственными руками.

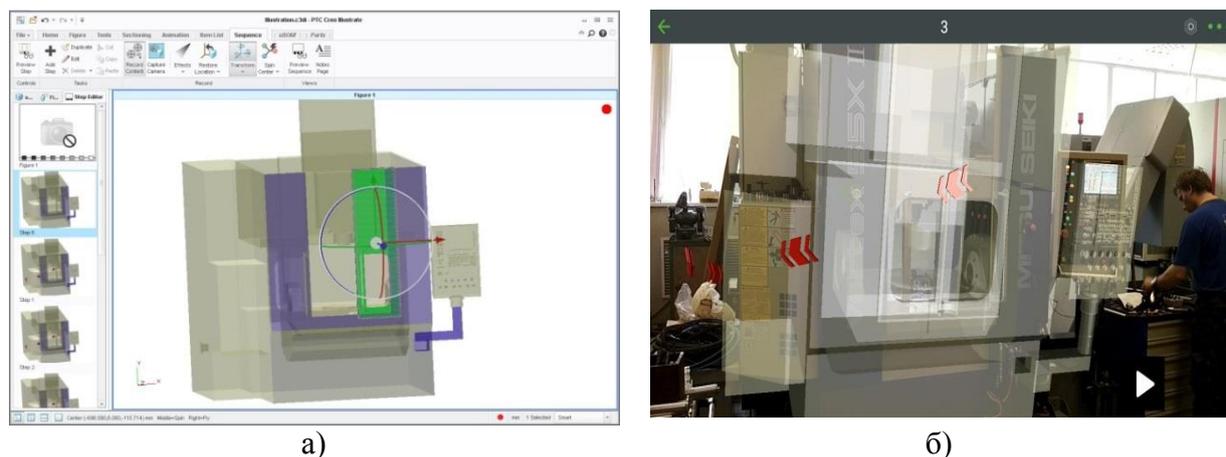


Рисунок 3. Создание дополненной реальности для обрабатывающего центра:
а) 3D-модель анимации б) анимация, расположенная на станке

Возможности приложения ограничиваются возможностями разработчиков и программистов, а также возможностями оборудования. Таким образом, можно считать, что подобные возможности имеют не малые перспективы и такую же необходимость в подобных устройствах в сферах обучения. Учитывая тенденции развития технологий, они долго будут пользоваться спросом и улучшаться из года в год.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 17-20-03084офи_м_РЖД, 16-48-330031 р_a

Список литературы

1. *Алексанова, Л.В.* Возможности и особенности применения технологии дополненной реальности в образовании // Управление инновациями: теория, методология, практика сборник материалов IX международной практической конференции, Новосибирск: ЦРНС, 2014. С. 123-127.
2. *Благовещинский, И.А., Демьянко, Н.А.* Технология и алгоритмы создания дополненной реальности, 2013 г- 130-138с.
3. *Бойченко, И.В., Лежанкин, А.В.* Дополненная реальность: состояние, проблемы и пути решения. // Доклады ТУСУРа, № 1 (21), часть 2. – 2010.
4. *Большаков, В.* Твердотельное моделирование деталей в САД-системах. AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, Creo / В. Большаков, А. Бочков, Ю. Лячек. - М.: Питер, 2015. - 480 с.
5. *Говорухина, М.Ю.* // Виртуализация современного мира: раздвоение реальности. - Екатеринбург, 2004. - 15 с.
6. *Creo Elements/Pro 5.0. Primer Учебное пособие.* – СПб: РТС, 2011.
7. *Creo Parametric 2.0. Основы работы.* – СПб: ООО «Ирисофт», 2013.
8. *Introduction to Finite Element Analysis Using Creo Simulation 1.0 / Randy Shih.* – SDC Publications, 2011. – 424 p.

05.02.00

Л.Н. Лесневский, М.А. Ляховецкий, Д.А. Макарьев, И.А. Николаев, С.Н. Сарбучев

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
кафедра «Технология производства двигателей летательных аппаратов»
Москва, kaf205@mai.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОКРЫТИЙ В СОВРЕМЕННОМ БЕРЕЖЛИВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрена сущность оптимизационных технологий Лин (Lean) на примере производства водоотводных насосов компании «Грундфос». Дана оценка эффективности использования плазменных технологий износостойких твёрдосмазочных покрытий (ТСП), результаты которой могут стать основой для принятия решения о повышении ресурса и надёжности рабочих поверхностей выполненных из чугуна крыльчаток этих насосов, что в свою очередь может привести к снижению потерь и дополнительных расходов на восстановление покрытия или замену крыльчатки целиком.

Ключевые слова: сущность Лин (Lean), бережливое производство, потери, ресурс, износостойкое покрытие, твёрдая смазка, плазменные технологии.

Известно, что бережливое производство (Lean production) берет свои истоки в Японии в компании Тойота и связано с качеством автомобилей, а успехи внедрения производственной системы этой компании привели к тому, что сегодня именно японские автомобили являются флагманами качества. Бережливые Lean-системы после первого успеха в автомобилестроительной отрасли стали повсеместно использоваться и во всех других отраслях, в том числе в энергетике, в общем и транспортном машиностроении, в металлургии, в нефтегазовой промышленности и пр. Основу бережливого производства, как следует из названия, составляет борьба с потерями: т.е. их устранение или уменьшение. Среди потерь особое место занимают дефекты, которые возникают из-за брака, повреждений или некачественного изготовления готовой продукции и её элементов, некачественных полуфабрикатов, исходного сырья, материалов и комплектующих, некачественных инструментов, инвентаря и оснастки, недостаточная эффективность используемых технологических процессов. Дефекты необходимо исправлять (и затрачивать на это ресурсы) либо детали (изделия) с дефектами приходится утилизировать (дополнительные затраты), поставленная клиенту некачественная продукция приводит к рекламациям и дополнительным расходам.

Общий подход к анализу случаев применения Lean-технологий представляет собой цикл из 5 шагов [1], показанный на рис. 1.



Рис. 1 - Подход к оптимизации производства и превращению его в бережливое

Настоящая работа основана на анализе собранных материалов и наработанного опыта в отделе оптимизации и развития производственной системы (Lean production) в инженерном отделе компании «Грундфос» и в магистратуре кафедры «Технология производства двигателей летательных аппаратов» МАИ в отделе «Плазменная технология покрытий».

Компания Grundfos является мировым лидером в производстве передового насосного оборудования и определяет тенденции в области технологий обработки воды. Компания основана в 1945 г. датчанином Полем Дуйенсенем и в настоящее время её доля на мировом рынке циркуляционных насосов составляет более 50%, что делает компанию Grundfos самым большим производителем оборудования данного типа. На заводе Компании в Истринском районе Московской области, эффективно использующем принципы Бережливого производства, собирают несколько типов насосного оборудования: вертикальные, центробежные, консольно-моноблочные насосы с частотно-регулируемыми двигателями, насосные установки повышения давления и пожаротушения и шкафы управления. Технологические линии предприятия оснащены самым современным оборудованием для сборки и контроля качества продукции. Производство сертифицировано по стандарту менеджмента качества ISO 9001 [2].

В качестве объекта исследования и последующих улучшений путём использования инструментов бережливого производства был выбран участок сборки насосов водоотведения компании «Грундфос». В данной статье рассматриваются исключительно центробежные насосы. Как следует из типовой конструктивной схемы насоса, показанной на рис. 2, жидкость через входное отверстие попадает в центр вращающегося рабочего колеса, откуда она отбрасывается на периферию. Насосы, работающие с жидкостями, содержащими включения, как, например, насосы для отведения сточных вод, оснащены насосным колесом, имеющим особую конструкцию для предотвращения застревания объектов внутри насоса. В такой конструкции при наличии в системе перепада давления при неработающем насосе, жидкость всё равно сможет проходить через насос благодаря его открытой конструкции. Однако крыльчатки этих насосов близки по конструкции и отличаются в основном размерами.

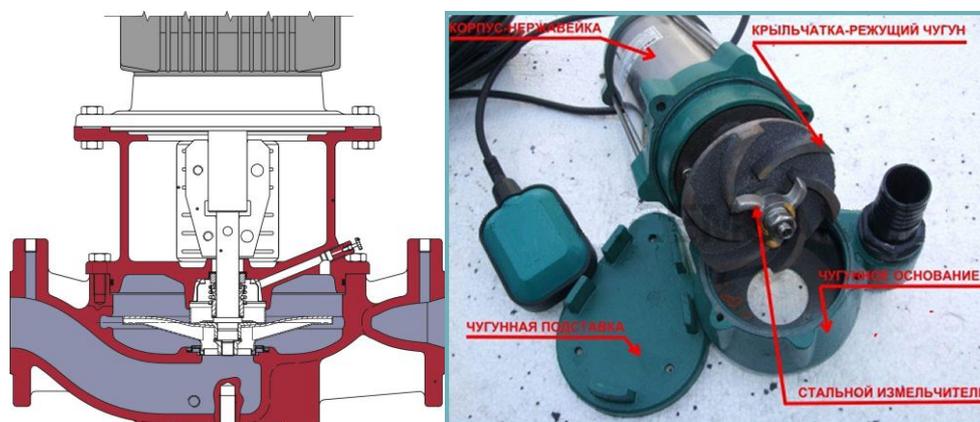


Рис. 2 - Конструктивная схема и используемые материалы насоса.

В ходе анализа качества выпускаемой продукции было установлено, что основной проблемой, влияющей на ресурс и надёжность таких насосов, является проблема абразивного износа рабочих поверхностей лопастей крыльчаток, выполняемых из чугуна. Известен целый ряд методов, используемых для защиты от абразивного износа, каждый из которых имеет серьезные недостатки и ограниченное применение:

- *Наплавка или напыление твердых материалов* (например, керамических или металлокерамических покрытий). По мнению [3], недостаток этого метода заключается в том, что более твёрдые абразивные материалы обычно тверже, чем металл или сплав детали и по этой причине твердая поверхность легко изнашивается вновь.

- *Восстановление изношенной детали и ее защита от абразива с помощью эпоксидно-керамических материалов.* Однако, недостаток у них все тот же: твердая поверхность быстро изнашивается и приходится снова восстанавливать деталь и защищать ее от абразивного износа.

- *Замена детали на новую.* На первый взгляд, новая деталь имеет большой ресурс, отбалансирована, произведена по тем же стандартам, что и заменяемая деталь, обеспечена антиабразивной защитой. Однако, высокая стоимость оригинальной детали для импортного оборудования и сроки поставки могут приводить к простоям производства и недополученной прибыли.

- *Футеровка резиной или полиуретаном.* Эти материалы обеспечивают лучшую защиту от абразивного износа, чем твердые защитные материалы, однако серьезные ограничения применения такой футеровки, связаны со сложной геометрией деталей и использованием её в труднодоступных местах рабочих колес насосов.

- *Использование абразивостойких двухкомпонентных эластомеров холодного напыления.* Компания MetaLine, GmbH предлагает этот метод [4] в качестве нового решения в сфере технологий защиты от абразивного и гидроабразивного износа. И хотя по сравнению с обычными резинами и полиуретаном эти эластомеры и обладают более высокой устойчивостью к износу, но они не лишены известных недостатков, присущих футеровке.

В ходе анализа и оптимизации качества выпускаемой продукции (рис. 1) основное внимание было уделено повышению эффективности упрочняющей обработки путём нанесения твёрдых смазочных покрытий (ТСП) рабочих поверхностей лопастей крыльчаток насосов, выполняемых из чугуна, и связанной с повышением их износостойкости. *Износостойкие чугуны*, легированные никелем (до 5 %) и хромом (0,8 %), чаще всего применяют для изготовления деталей, работающих в абразивных средах, но и их износостойкость в абразивной среде, как показал опыт их использования, недостаточна [5]. Анализ областей применения износостойких твёрдых смазочных покрытий (ТСП) [6] показал, что их основные преимущества заключаются в том, что они могут быть использованы при высоких нагрузках, обеспечивают стабильное и длительное хранение и функционирование с большими интервалами, такие покрытия отличает хорошая стабильность во вредной окружающей среде. Проведённый в работах [7] анализ материалов, используемых в составе износостойких ТСП для различных целей, но близких к рассматриваемым условиям эксплуатации, показал, что поведение покрытий определяется не только материалом и технологией их получения, но и конструкцией, проектирование которой должно осуществляться с учётом условий работы покрытия и возможностей обоснованно выбранного метода формирования покрытия. Поэтому на основании этого анализа в качестве материалов ТСП, наносимых на поверхность чугунного образца, моделирующего материал крыльчатки насоса (далее «подложка») для формирования покрытия (однослойного и трёхслойного) было принято последовательно по слоям использовать:

- Ni₅Al (марка M45ONS по каталогу компании Sulzer) – в качестве материала, обеспечивающего высокую адгезию покрытий к подложке (общий подслоя для трёхслойных покрытий);

- ZrO₂·8Y₂O₃ (марка MetcoB-NS по каталогу компании Sulzer) – в качестве температурного теплозащитного материала (для случая работы в нагретых смесевых средах), использован в качестве промежуточного, среднего слоя - трёхслойное покрытие Ц;

- Al₂O₃ (марка Metco 105 NS по каталогу компании Sulzer) – в качестве основного керамического слоя, износостойкого и препятствующего схватыванию, использован в качестве промежуточного, среднего слоя – трёхслойное покрытие А;

- Mo 99,5 (марка Metco 56C-NS по каталогу компании Sulzer) – в качестве износостойкого слоя твёрдой смазки, обеспечивающего антифрикционность и прирабатываемость при работе в «сухую» (критический вариант работы крыльчатки) и с органической смазкой малым количеством жидкости, использован в качестве третьего и единственного внешнего рабочего слоя для всех покрытий.

Наличие верхнего слоя из молибдена Мо благодаря своим известным особым свойствам обеспечивает высокую коррозионную стойкость поверхности и высокую химической стойкостью к действию серной, соляной, фосфорной и других кислот. Молибденовые покрытия отличаются высокой твердостью (400...900HV), износостойкостью и стойкостью к

абразивному воздействию и эрозии [8]. В испытаниях использовались 5 типов образцов диска, три из которых были с покрытиями, а два других без покрытия, все они были изготовленные из чугунов марок СЧ 20 (серый чугун) и ИЧГ-33М (чугун, легированный со специальными свойствами).

В качестве основных технологий формирования покрытий выбраны методы газотермического напыления, обладающими широкими технологическими возможностями: WASP (wire-arc spray process) – дуговая металлизация из проволоки молибдена Мо и PS (plasma spraying) – плазменное напыление из порошков Ni_5Al , $ZrO_2 \cdot 8Y_2O_3$ и Al_2O_3 .

Для исследований износостойкости и трения были рассмотрены возможности однослойной и многослойной конструкций покрытия с использованием материалов, обоснование выбора которых представлен выше. Покрытия должны были иметь высокую износостойкость, низкий коэффициент трения, адгезионную прочность, обеспечивающие ресурс контактной пары не менее 3000 часов. Для определения износных характеристик была спроектирована специальная установка, реализующая классическую схему трения типа «палец-диск».

Принцип действия установки основан на истирании пары трения, которая представляет собой неподвижный сегмент кольца (модель крупного элемента твёрдой примеси в перекачиваемой насосом среде), прижимающийся к торцевой плоскости вращающегося диска (модель поверхности крыльчатки) с выбранным усилием (F , Н). Скорость диска (V , м/с) и радиус, по которому осуществляется сопряжение (r , мм) с сегментом кольца, определялись условиями испытаний. Контртело (сегмент кольца) устанавливалось перпендикулярно движению вращения диска.

Схема трибометра приведена на рис. 3 и включает в себя: узел нагружения и позиционирования (1); держатель образцов (2); тензометрический датчик измерения силы трения (3); привод вращения диска (4). Указанные узлы смонтированы на массивной чугунной станине (5), которая исключает возникновение паразитных вибраций. Также на корпусе станины расположены органы управления вращением привода (6), позволяющие регулировать частоту вращения диска в диапазоне от 75 до 1500 об/мин. Вращение диска от привода обеспечивается ременной передачей. Биение плоскости планшайбы (7), на которой закреплялся диск (8), не превышало 0,01 мм.

Сегмент кольца зажимался в цангу и устанавливался в каретку, обеспечивающую перемещение по рычагу системы нагружения и позиционирования (1), что позволяло регулировать радиус установки (r , мм) сегмента на поверхности диска. Для точного нагружения контакта трения рычаг уравнивается отвесом (9), установленным на другом его конце.

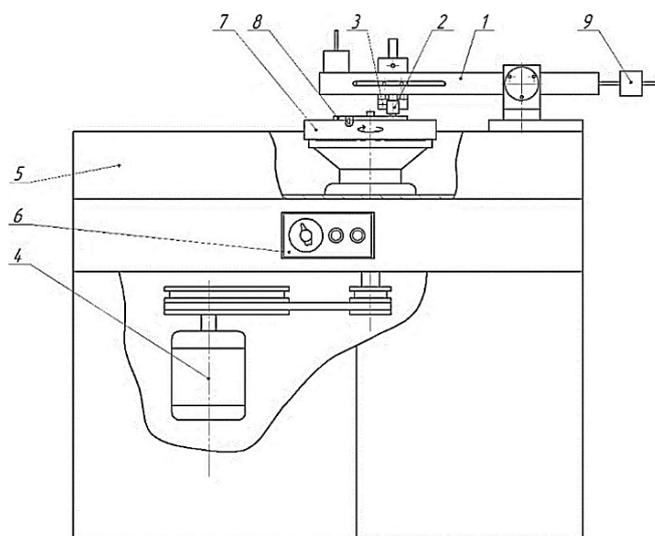


Рис. 3 – Схема установки по измерению износа и трения

1-узел позиционирования и нагружения; 2-держатель образцов; 3-датчик измерения сил трения; 4-привод вращения диска; 5-чугунная станина-основание; 6-органы управления вращением диска; 7-планшайба; 8-диск; 9-отвес.

Образец с покрытием представлял собой диск диаметром 30-100 мм и толщиной 2-10 мм. Контактная поверхность сегмента кольца, также выполненного из чугуна, была покрыта электролитическим хромом. Шероховатость образцов была на уровне $Ra = 0,8$ мкм. Во время испытаний регистрировались две группы параметров: основные – нагрузка на контакт (Н), линейная скорость движения контртела (м/с), путь трения за весь цикл эксперимента (м); температура трущихся образцов и области, расположенной в непосредственной близости с контактом трения ($^{\circ}C$) и дополнительные – коэффициент трения и величина сближения образцов в процессе их истирания. Перед началом эксперимента проводились: измерение геометрических размеров образцов с точностью не хуже 2,5 мкм. Были выбраны следующие режимы испытаний:

1) $F = 5Н$, $V = 0.25$ м/с, $f = 250$ об/мин, $n = 10^4$ циклов.

2) $F = 2Н$, $V = 4$ м/с, $f = 1000$ об/мин, $n = 10^4$ циклов.

Режим (1) был реализован с увеличенной нормальной нагрузкой и малой скоростью перемещений, режим (2) - с малой нормальной нагрузкой и высокой скоростью перемещения образца. Для каждого режима испытаний и типа покрытия проводилось по три эксперимента.

Объемный износ ($мм^3$) определялся для каждого образца отдельно геометрическим способом. Для геометрического способа проводилось профилографирование тех частей образцов, которые были повреждены износу. Для диска профилографирование проводится в трех равноудаленных от друг друга точках перпендикулярно линии износа. Суммарный износ вычисляется аппроксимацией его по всей окружности диска. Для образца-сегмента профилографирование проводилось в нескольких плоскостях, расстояние между которыми составляло от 0,05 до 0,1 мм. Полученные таким образом сечения позволяли вычислить объемный его износ по специально разработанной методике.

Регистрация коэффициента трения в процессе испытания позволила интерпретировать механизмы изнашивания и взаимодействия материалов образцов, переходы между трением различных слоев материала покрытий.

Для всех образцов и режимов измерялся коэффициент трения модельного контакта, результаты этих измерений приведены на рис.4. Как видно из полученных результатов минимальным коэффициентом трения ($\sim 0,38$) обладают два покрытия: М и А, а максимальным – Ц ($\sim 0,75$). Коэффициент трения чугунов (СЧ и ИЧГ) имеет промежуточное значение $\sim 0,55$. Низкое значение коэффициента сухого трения покрытий М и А обусловлено наличием твердой смазки в виде оксида MoO_3 , присутствие которого стимулируется разогревом пятна контакта трущихся поверхностей в случае покрытия из одного молибдена и покрытия с промежуточным слоем из «теплопроводного» оксида Al_2O_3 . Окисление молибдена и снижение коэффициента трения способствует снижению износа. Повышение температуры в контакте трения для металлических пар, напротив, может приводить к процессам схватывания и заедания, т.е. возникновению адгезионного изнашивания, что может сказаться на ресурсе поверхности.

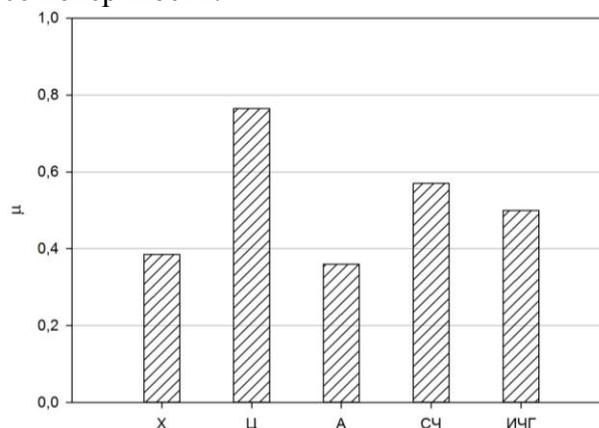


Рис. 4 – Коэффициенты трения различных покрытий с контртелом

Для режима (1) были проведены испытания и измерены объемный износ дисков и массовый износ контртел. Полученные результаты представлены на рис.5.

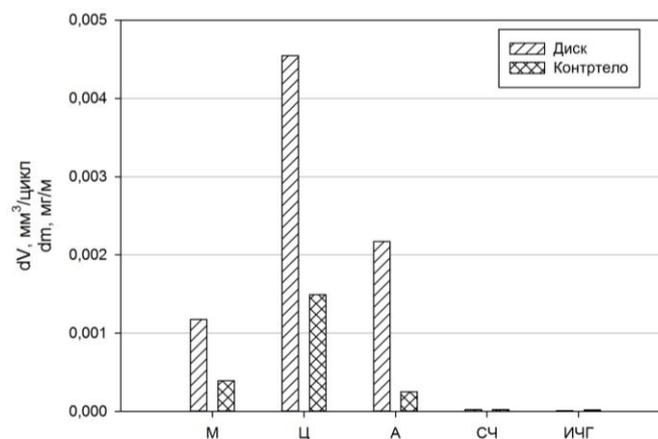


Рис. 5 – Объемный и массовый износ диска с покрытием и контртела, соответственно, при $F = 5 \text{ Н}$, $V = 0.25 \text{ м/с}$, $f = 250 \text{ об/мин}$, $n = 10^4$ циклов

Для режима (2) характер результатов измерения износа резко изменяется (рис. 6). Износ дисков без покрытия резко возрастает и концу испытаний их значение превышает значение объемного износа покрытий М и А в два и более раз. При этом надо отметить, что характер износа контртел остается на том же уровне.

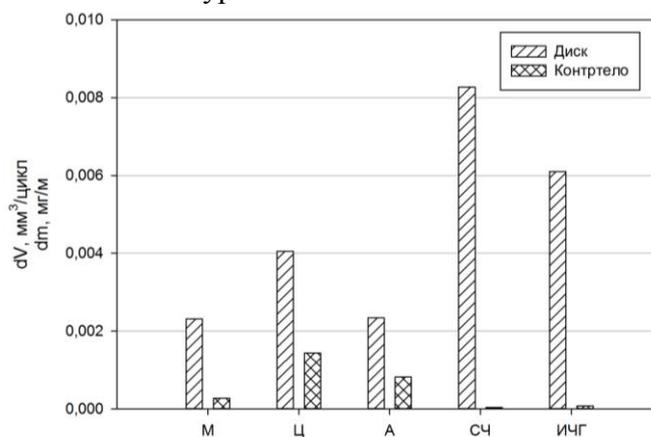


Рис. 6 – Объемный и массовый износ диска с покрытием и контртела, соответственно, при $F = 2 \text{ Н}$, $V = 0.4 \text{ м/с}$, $f = 1000 \text{ об/мин}$, $n = 10^4$ циклов

Таким образом, наблюдается тенденция увеличения изнашивания материалов без защитных покрытий с увеличением скорости скольжения трущихся тел. Повышенный износ контртела для образцов с покрытиями по сравнению с образцами без покрытия объясняется повышенными давлениями в месте контакта.

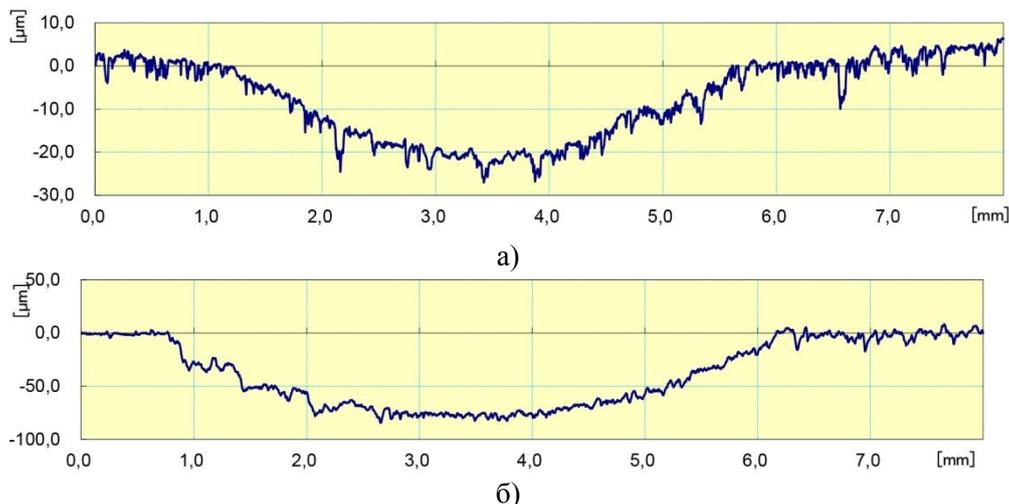


Рис. 7 – Профилограммы износа дисков с покрытиями М (а), Ц(б), А (в) и чугунов СЧ (г), ИЧГ (д), полученные при $F = 2 \text{ Н}$, $V = 0.4 \text{ м/с}$, $f = 1000 \text{ об/мин}$, $n = 10^4$ циклов

Измерения глубины износа и анализ полученных профилограмм образцов с покрытиями (рис.7) показал, что изношенным оказался лишь внешний слой – молибден. Также было отмечено, что оксид алюминия в композиции с молибденом показывает лучшие триботехнические характеристики по сравнению с однослойным покрытием из молибдена (рис. 5 и 6): увеличение скорости скольжения тел приводит к увеличению износа М покрытия, тогда как износ покрытия А остается практически на том же уровне. Но при этом разрушение контртела с хромовым покрытием несколько увеличивается за счет высокой твердости оксидной матрицы.

Исследование морфологии и элементного состава поверхности покрытий проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss EVO-40 с приставкой для элементного микроанализа INCA (Oxford instr.).

На рис. 8 представлена фотография поверхности покрытия, состоящей из молибденового слоя, полученная с помощью детектора обратно отраженных электронов (BSD), хорошо передающий рельеф поверхности. На фотографии видно, что поверхность образована частицами величиной ~ 30 – 60 мкм. Пористое плазменное покрытие было отшлифовано, поэтому на фотографии видны как участки плоских отшлифованных площадок (А), так и участки поверхности покрытия (Б), не подвергавшихся механической обработке с сохраненным рельефом напыленных частиц.

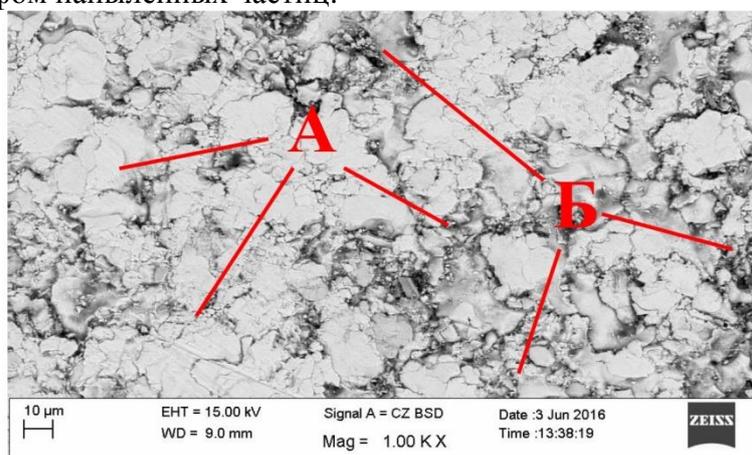


Рис. 8 - Изображение поверхности молибденового слоя, полученное с помощью СЭМ на детекторе обратно отраженных электронов (BSD)

Элементный анализ поверхности образцов показал (рис.10), что она состоит из молибдена (89% ат. дол.) и кислорода (10% ат. дол.), а также присутствует небольшое количество углерода.

Для определения толщины слоев покрытий и их состава были изготовлены шлифы поперечного сечения образцов с покрытиями. На рис.9 показано изображение покрытия М со слоем молибдена.

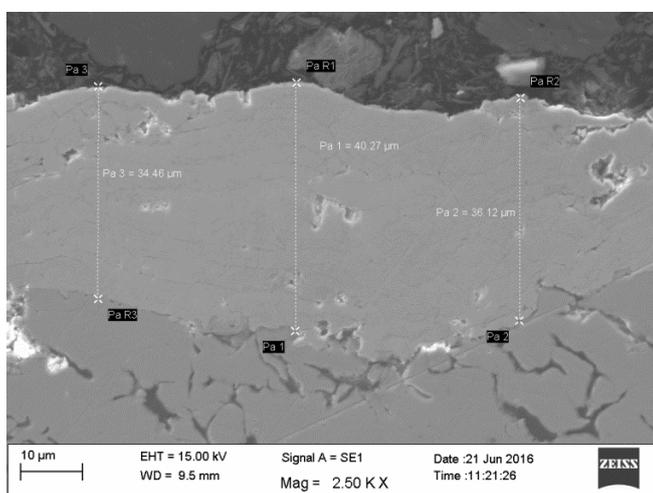


Рис. 9 - Изображение СЭМ покрытия М со слоем молибдена

Установлено, что средняя толщина покрытия составляет ~ 35 мкм. В покрытии присутствуют крупные поры величиной до 3 мкм, а также хорошо видна слоистая структура, как результат послойного осаждения разогретых частиц порошка молибдена. Элементный анализ поперечного сечения показал, что содержание молибдена и кислорода такое же, как и на поверхности покрытия, но без присутствия углерода. Поперечное сечение покрытия со средним слоем из окиси алюминия (А) представлено на рис.10.

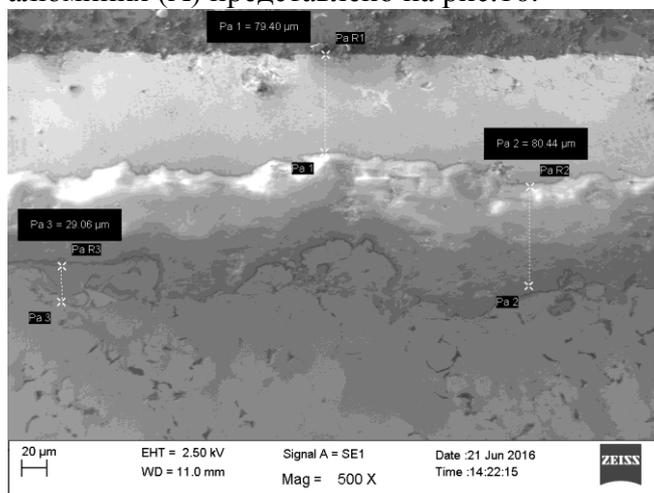


Рис. 10 - Изображение СЭМ покрытия А

Из рис. 10 следует, что толщина внешнего слоя (1) из молибдена составляет ~ 80 мкм, среднего оксидного слоя (2) ~ 60 мкм, а переходного NiAl (3) $\sim 10-15$ мкм. Таким образом, полная толщина покрытия составила ~ 150 мкм.

Таким образом, проведенные исследования показали перспективность использования износостойких плазменных покрытий типа твердая смазка в качестве улучшающих триботехнические свойства рассматриваемой пары трения. Удалось снизить коэффициент трения с 0,55 до 0,38 для образцов из чугуна ИЧГ-33М и образцов с покрытием из молибдена (М) и трехслойным покрытием (А) композиции NiAl-Al₂O₃-Mo

Таким образом, плазмонапылённое износостойкое покрытие, использующее молибден в качестве стойкой к износу твёрдой смазки, можно использовать для защиты рабочих поверхностей лопастей чугунных крыльчаток вместо используемых быстроизнашиваемых покрытий, и уменьшить в условиях бережливого производства потери, связанные с необходимостью их восстановления.

Список литературы

1. Азбука Lean, lean.center.ru, 6 с, (Дата обращения 23.02.2018).
2. Информация о компании «Grundfos» <http://ru.grundfos.com/about-us.html> (Дата обращения 23.02.2018).
3. Насосы для водоотведения и канализации, rmbteplo.ru, 28 с. (Дата обращения 23.02.2018).
4. METALINE – футеровка – гуммирование – восстановление – ремонт www.metaline.com.ru (Дата обращения 27.02.2018)
5. Путинцев С.В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчёта и испытаний. Электронное учебное пособие. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 288 с.
6. Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н. Трение и износ в экстремальных условиях. Справочник. – М.: Машиностроение, 1986. – 244 с.
7. Donnet C., Erdemir A. Historical development and new trends in tribological and solid lubricant coatings // Surface and Coatings Technology, 2004. №180-181. – pp. 76-84
8. Зеликман А.Н. Молибден. М.: Металлургия, 1970. - 440 с.

05.02.22

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

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

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРИМЕРЕ ПТОЛ СЕДЕЛЬНИКОВО

Для решения вопроса организации технического обслуживания грузовых электровозов постоянного тока различной секционности основным является расчет суточной и годовой программы технического обслуживания. В статье приведена методика для определения программы ТО-2 и экипировки. Выполнен расчет на примере ПТОЛ Седельниково.

Ключевые слова: электровоз, постоянный ток, груз, обслуживание, техническое, пример, методика, производство, организация.

Участки (направления), прилегающие к Свердловскому узлу на которых обращаются поезда с электровозами ВЛ10, ВЛ11 и 2ЭС6 показаны на рисунке.

Ст. Екатеринбург-Сортировочная является местом изменения тягового обеспечения поездов. Для пропуска транзитного грузопотока построен Южный обход Свердловского узла: Арамиль – Седельниково – Решеты – Макарецево, ст. Седельниково является местом изменения тягового обеспечения поездов на Южном обходе. В настоящее время техническое обслуживание (ТО-2) выполняется на ПТОЛ Инская, Войновка, Свердловск-Сортировочный «Юго-Восток» 2-х секционными электровозами ВЛ10, ВЛ11 и 2ЭС6 объединенного парка трех дорог (Свердловской, Южно-Уральской и Западно-Сибирской); Пермь-Сортировочная и Свердловск-Сортировочный «Запад» локомотивами 1,5ВЛ11 Свердловской ж.д. Восстановление работы ПТОЛ Седельниково позволяет: увеличить транзитный поток через ст. Тюмень и Пермь-Сортировочная за счет исключения отцепок локомотивов от поездов из-за необходимости проведения ТО-2 и экипировки; исключить пересылку локомотивов со ст. Седельниково (и обратно) для проведения ТО-2 и экипировки на ст. Екатеринбург-Сортировочная (пересылка остается по регулировке из-за разницы в количестве поездов в четном и нечетном направлениях); ликвидировать затраты на покрытие условных потерь неиспользования локомотивов во время перегонки; прекратить выполнение ТО-2 на ст. Пермь-Сортировочная электровозам 1,5ВЛ11, обслуживающих участки Чепца (Балезино) – Свердловск (Седельниково); закрыть ПТОЛ Каменск-Уральский.

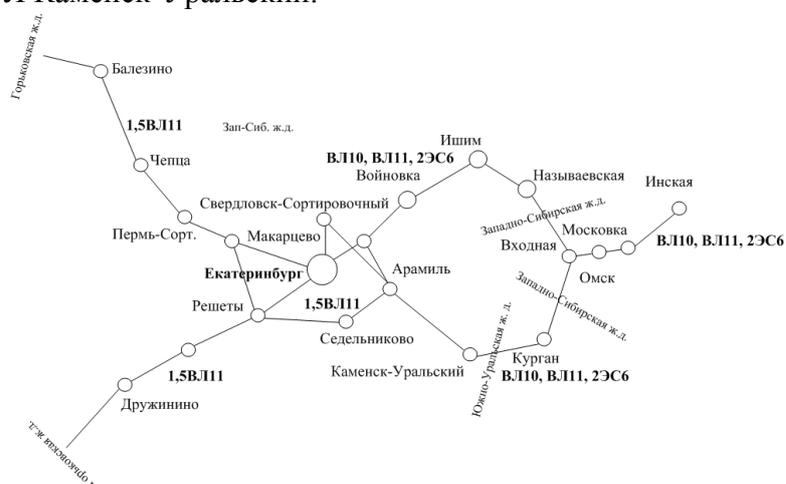


Рисунок. Участки, прилегающие к Свердловскому узлу на которых обращаются поезда с электровозами ВЛ10, ВЛ11 и 2ЭС6

Пункт технического обслуживания ст. Седельниково предназначен для ТО-2 и экипировки электровозов работающих на следующих участках: Седельниково – Курган – Входная;

Седельниково – Инская; Седельниково – Дружинино; Седельниково – Чепца – Балезино.

Для организации производства технического обслуживания ТО-2 на ПТОЛ Седельниково необходимо: 1) выполнить анализ наличия и состояния существующей технической и технологической базы ПТОЛ Седельниково; 2) рассчитать программу обслуживания ТО-2 грузовых электровозов по данным ЦО-4 на 01.06.2018 г.; 3) рассчитать необходимое количество стойловых участков и их размеров для обслуживания ТО-2 электровозов ПТОЛ Седельниково; 4) определить мощность (производительность) ПТОЛ Седельниково. Основным из перечисленных выше является второй этап [1].

Годовая программа технического обслуживания ТО-2, $N_{\text{ТО-2}}$, определяется по формуле:

$$N_{\text{ТО-2}} = \frac{S_{\text{год}}}{L_{\text{ТО-2}}} \cdot \left(1 - \frac{L_{\text{ТО-2}}}{L_{\text{ТР-1}}} \right), \quad (1)$$

где $L_{\text{ТО-2}}$ – установленная норма пробега между ТО-2, км; $L_{\text{ТР-1}}$ – установленная норма пробега для очередного, высшего по характеру ремонта (ТР-1), км; $S_{\text{год}}$ – годовой пробег обслуживаемых электровозов.

В соответствии с указанием ОАО «РЖД» от 04.04.2007 г. № ВГ-3556 установлена периодичность проведения технического обслуживания ТО-2 – 2300 км, но не более 96 ч.

Годовой пробег рассчитывается по формуле:

$$S_{\text{год}} = S_{\text{сут}} \cdot 365. \quad (2)$$

Общий суточный пробег по участкам определяется суммированием суточного пробега по каждому участку по выражению:

$$S_{\text{сут}} = \sum_{i=1}^n S_i, \quad (3)$$

где $S_{\text{сут}}$ – общий пробег по заданным участкам, км; n – количество участков; S_i – суточный пробег по i -му участку, км.

Суточный пробег для каждого i -го участка определяется следующим образом [2, 3]:

$$S_{\text{сут}i} = \sum_{i=1}^m m \cdot l_i \cdot n_i, \quad (4)$$

где m – число тяговых плеч, обслуживаемых электровозами, $m = 2$; n_i – число пар поездов; l_i – длина тягового участка, км.

Среднее число пар поездов по участку составит:

$$n = \frac{n_{\text{чет}} + n_{\text{нечет}}}{2}, \quad (5)$$

где $n_{\text{чет}}$ – количество пар поездов в четном направлении; $n_{\text{нечет}}$ – количество пар поездов в нечетном направлении.

Рассчитанное количество технических обслуживаний ТО-2 в год и за сутки по 4-м участкам сведено в табл. 1.

Таблица 1. Данные и результаты расчета суточной программы ТО-2 и экипировки 3-х секционных ВЛ11 обращающихся на полигоне Чепца – Свердловск (Седельниково) – Дружинино

Участок	l_i , км	n , пар	S_i сут, ЛОК.-км	S_i год, ЛОК.-км	$N_{\text{ТО-2год}}$, ед.	$N_{\text{ТО-2сут}}$, ед.	$n_{\text{эк}}$ (без ТО-2), ед.
Чепца – Седельниково	654	12	15696	5729040	2262	7	17
Дружинино – Седельниково	101	30	6060	2211900	1059	3	7
Дружинино – Свердловск	75	46	6900	2518500	995	3	8
Чепца – Свердловск	614	43	52804	19273460	9229	26	56
Итого:					13545	39	88

Суточная программа ВЛ11 в 3-х секционном исполнении составит:

- количество ТО-2 с экипировкой $N_{ТО-2сут\ 2018} = 39$ ед.;
- количество экипировок (без ТО-2) $n_{эк\ сут\ 2018} = 88$ ед.

Таким образом, в сутки требуется выполнять 39 технических обслуживаний ТО-2 3-х секционных электровозов ВЛ11 и 22 ТО-2 2-х секционных электровозов ВЛ10, ВЛ11 и 2ЭС6, кроме того, дополнительно требуется проведение экипировки песком 88 электровозов в 3-х секционном исполнении.

Для определения программы технического обслуживания ТО-2 на ПТОЛ Седельниково 3-х секционных локомотивов ВЛ11 в расчете использованы следующие прогнозируемые данные участков: Седельниково – Дружинино; Седельниково – Чепца (Балезино).

Суммарное количество технических обслуживаний ТО-2 на ПТОЛ Седельниково $N_{ТО-2год}$ (Седельниково) и $N_{ТО-2сут}$ (Седельниково) по 2-м участкам составит (без учета экипировки):

$$N_{ТО-2год\ (Седельниково)\ 2018} = 2262 + 1059 = 3321 \text{ ед.}$$

$$N_{ТО-2сут\ (Седельниково)\ 2018} = 3321 / 365 = 9,098 \approx 10 \text{ ед.}$$

Аналогично определена суточная программа экипировки между техническим обслуживанием ТО-2 на ПТОЛ Седельниково. В качестве нормы пробега между экипировками принято расстояние 671 км.

Годовая программа экипировки $N_{экип}$, определяется по формуле [4]:

$$N_{экип} = \frac{S_{год}}{L_{н3}} \cdot \left(1 - \frac{L_{н3}}{L_{ТО-2}} \right), \tag{6}$$

где $L_{ТО-2}$ – установленная норма пробега между ТО-2, $L_{ТО-2} = 2300$ км; $L_{н3}$ – рассчитанное расстояние между пунктами экипировки, $L_{н3} = 671$ км; $S_{год}$ – годовой пробег обслуживаемых электровозов.

Суточная программа ВЛ11 на ПТОЛ Седельниково в 3-х секционном исполнении на 01.06.2018 г. составит: $N_{ТО-2сут\ 2018} = 10$ ед.; $n_{эк\ сут\ 2018} = 24$ ед.

Данные и результаты расчета суточной программы ТО-2 и экипировки для 3-х секционных ВЛ11 на ПТОЛ Седельниково сведены в табл. 2.

Таблица 2. Данные и результаты расчета суточной программы ТО-2 и экипировки 3-х секционных ВЛ11 на ПТОЛ Седельниково

Участок	l_i , км	n , пар	$S_i\ сут$, лок.-км	$S_i\ год$, лок.-км	$N_{ТО-2год}$, ед.	$N_{ТО-2сут}$, ед.	$n_{эк}$ (без ТО-2), ед.
Чепца – Седельниково	654	12	15696	5729040	2262	7	17
Дружинино – Седельниково	101	30	6060	2801740	1059	3	7
Итого:					3321	10	24

Список литературы

1. Буйносов А.П., Цихалевский И.С. Повышение уровня организация технологического процесса текущих ремонтов электровозов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 4. С. 33-35.
2. Буйносов А.П., Цихалевский И.С. Совершенствование организации системы технического обслуживания и ремонта локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 5. С. 78-81.
3. Буйносов А.П., Пышный И.М., Тихонов В.А. Ремонт локомотивов без прекращения их эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. Т. 60. № 1. С. 85-91.
4. Цихалевский И.С., Кудаяров М.М. Оптимизация организации ремонта локомотивов на полигоне Свердловской железной дороги // Транспорт Урала. 2008. № 1. С. 110-113.

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

05.11.16

Н.Н. Беспалов канд. техн. наук, А.В. Зорькин, П.М. Дёмкин

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ
ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ИСТОЧНИКОМ НАПРЯЖЕНИЯ
ЧЕРЕЗ ДЛИННУЮ ЛИНИЮ НА ОСНОВЕ ВИТОЙ ПАРЫ**

В данной статье приведено исследование прохождения электрических управляющих импульсов, формируемых импульсным источником напряжения, через длинную линию на основе витой пары при применении в устройствах силовой электроники.

Ключевые слова: *источник напряжения, импульс, витая пара, Multisim.*

Введение. В настоящее время системы передачи управляющих импульсов являются неотъемлемой частью любого электронного и электротехнического устройства. Одним из основных требований, предъявляемых к системам передачи управляющих сигналов, является обеспечение прохождения сигнала по длинной линии с минимальными искажениями. Существует множество технических решений систем передачи управляющих сигналов, различие которых состоит в стоимости используемых комплектующих и сложности поставленной задачи [1, 2].

Самыми простыми и распространёнными техническими решениями являются системы передачи управляющих сигналов в нагрузку через длинную линию на основе витой пары, формируемых импульсными генераторами, выполняемыми на основе импульсных источников напряжения. Витая пара за счет своей универсальности является одной из наиболее применяемых линий передачи сигналов. Она представляет собой изолированную пару проводников, скрученную с небольшим числом витков на единицу длины, что уменьшает воздействие внешних и перекрестных наводок на проходящий сигнал [3].

На рис. 1 представлена структурная схема подобной системы передачи управляющего сигнала.



Рисунок 1. Структурная схема системы передачи управляющего сигнала

На основе выше представленной структурной схемы в программной среде Multisim была разработана схема моделирования системы передачи управляющих импульсных сигналов в нагрузку R_n на основе генератора импульсного напряжения. Визуализация схемы моделирования представлена на рис. 2.

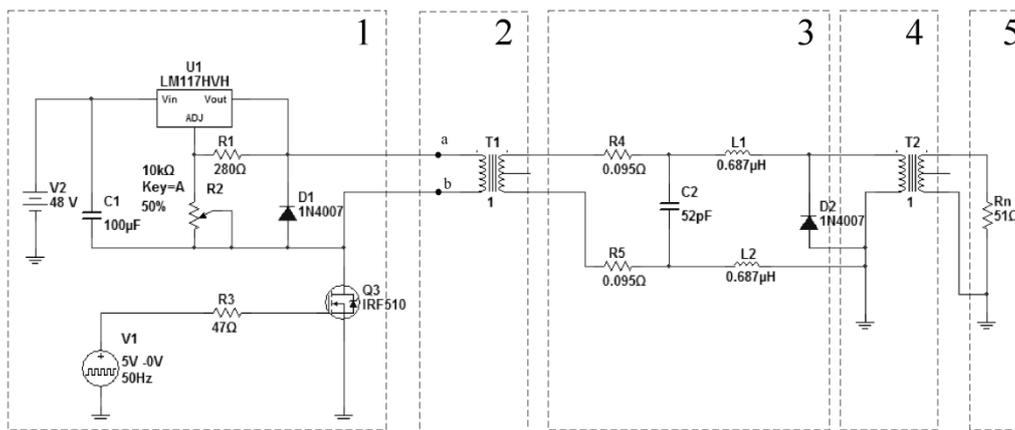


Рисунок 2. Визуализация схемы моделирования в программной среде Multisim системы передачи управляющих импульсных сигналов при использовании генератора на основе импульсного источника напряжения

Исследовались изменения амплитуды и длительности переднего фронта импульсов в нагрузке относительно входного сигнала.

Модель представляет собой систему передачи управляющих импульсных сигналов, состоящую из генератора импульсов 1, гальванической развязки 2 и 4 (соответственно, согласующие трансформаторы $T1$ и $T2$), витой пары 3 и активной нагрузки 5.

Генератор 1 через трансформатор $T1$ формирует на входах длинных линий 2 импульсы напряжения. Генерируемые импульсы имеют следующие параметры: длительность 10 мкс, длительность переднего фронта $\tau_{\text{вх}} = 100$ нс. Длительности передних фронтов всех импульсных сигналов отсчитывались по уровням 0,1 и 0,9 амплитудного значения импульса.

Сформированные импульсы через согласующий трансформатор $T1$, витую пару 2 и согласующий трансформатор $T2$ передаются в нагрузку R_n .

На рис. 2, в блоке под цифрой 3 выделена эквивалентная схема замещения длинной линии на основе витой пары. При моделировании предварительно рассчитывались и устанавливались значения её распределённых параметров при длине линии от 0,1 м до 100 м.

Эквивалентная схема замещения витой пары представляет собой сопротивление металла проводника, его индуктивность и ёмкость между проводниками. В [2] указывается, что отрезок витой пары длиной 1 метр имеет следующие значения параметров:

- последовательное сопротивление одного проводника $R4, R5 = 95$ мОм;
- ёмкость между проводниками $C2 = 52$ пФ;
- последовательная индуктивность одного проводника $L1, L2 = 687$ нГн.

Прошедший через витую пару импульсный сигнал поступает на активную нагрузку R_n . Для проведения исследований в качестве активной нагрузки R_n были выбраны резисторы с номиналами 51 Ом и 1 кОм.

Рассмотрим подробнее результаты проведенных исследований для системы передачи управляющих сигналов на основе импульсного источника напряжения.

Рис. 3 иллюстрирует осциллограммы сигналов переданных системой через витую пару длиной 0,1 м и 100 м в нагрузку $R_n = 51$ Ом и 1 кОм при использовании генератора на основе импульсного источника напряжения.

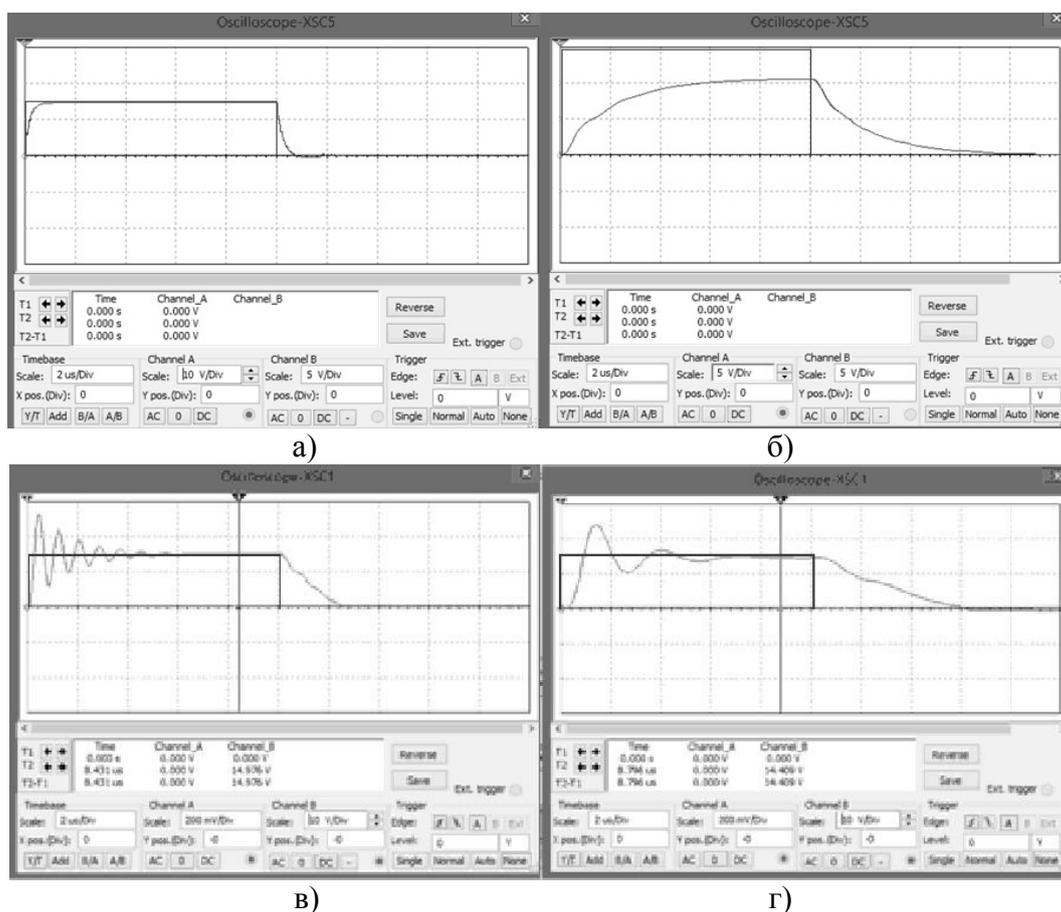


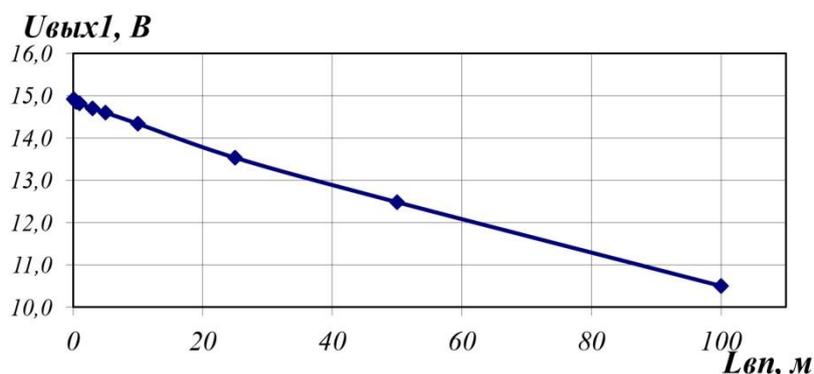
Рисунок 3. Осциллограммы импульсов напряжения на нагрузке R_n величиной 51 Ом при передаче сигнала через витую пару длиной 0,1 м (а) и 100 м (б)

Осциллограммы импульсов напряжения на нагрузке R_n величиной 1 кОм при передаче сигнала через витую пару длиной 0,1 м (в) и 100 м (г)

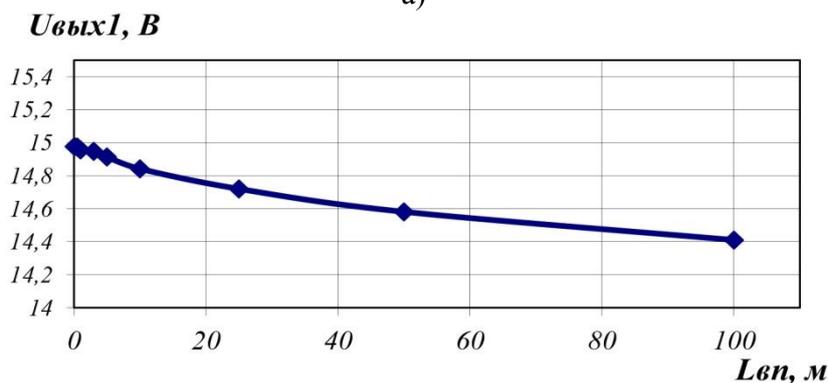
Из рис. 3, а видно, что при длине витой пары $L_{вп} = 0,1$ м и $R_n = 51$ Ом, длительность переднего фронта выходного сигнала $\tau_{бых1}$ составляет 500 нс, что в 5 раз больше длительности переднего фронта входного сигнала $\tau_{вх}$. При длине витой пары $L_{вп} = 100$ м и $R_n = 51$ Ом (рис. 3, б) длительность переднего фронта $\tau_{бых1}$ составляет 4 мкс, что больше длительности переднего фронта входного сигнала $\tau_{вх}$ уже в 40 раз.

Из рис. 3, в видно, что при длине витой пары $L_{вп} = 0,1$ м и $R_n = 1$ кОм длительность переднего фронта выходного сигнала $\tau_{бых1}$ составляет 200 нс. При этом эта величина больше длительности переднего фронта входного сигнала $\tau_{вх}$ в 2 раза, причём после переднего фронта на вершине импульса наблюдается колебательный процесс. Это может привести к ошибкам в работе принимающего данный сигнал устройства. При длине витой пары $L_{вп} = 100$ м и $R_n = 1$ кОм длительность переднего фронта $\tau_{бых1}$ составляет 750 нс, что превышает длительность переднего фронта входного сигнала $\tau_{вх}$ в 7,5 раз. Также как и при длине $L_{вп} = 0,1$ м на вершине импульса выходного напряжения появляется колебательный процесс, но с большим периодом колебаний. Это также может привести к ошибкам в работе принимающего данный сигнал устройства.

На рис. 4 изображены зависимости амплитуды выходного импульса напряжения $U_{бых1}$ на нагрузке R_n 51 Ом и 1 кОм от длины витой пары $L_{вп}$, построенные по данным моделирования.



а)



б)

Рисунок 4. Зависимость амплитуды напряжения выходного импульса $U_{вых1}$ управляющего сигнала на нагрузке $R_n = 51 \text{ Ом}$ (а) и на нагрузке $R_n = 1 \text{ кОм}$ от длины витой пары $L_{вп}$

Из рис. 4, а видно, что при длине витой пары $L_{вп} = 100 \text{ м}$ амплитуда напряжения выходного импульсного сигнала уменьшается относительно амплитуды входного импульса напряжения в 1,4 раза с 15 В до $10,5 \text{ В}$. Из рис. 4, б видно, что при длине витой пары 100 м амплитуда напряжения $U_{вых1}$ выходного сигнала уменьшается незначительно.

Заключение. Проведённые исследования показывают, что в системе передачи данных от импульсного источника напряжения через витую пару в активную нагрузку, минимальные искажения исследуемых параметров импульсов в нагрузке наблюдаются при применении относительно низкоомной нагрузки R_n в 51 Ом и при относительно небольших длинах витой пары (до нескольких метров). Это обуславливает повышение расхода энергии при передаче данных, а также ограничивает применение таких систем при передаче данных через линии повышенной длины. При этом возможно возникновение колебательных процессов на фронтах передаваемых сигналов и подавление амплитуды напряжения передаваемого сигнала, что обуславливает возникновение ошибок в работе устройства принимающего данный сигнал.

Список литературы

1. Ремпен И. С. Исследование длинной линии / И. С. Ремпен – Учебно-методическое пособие. – Саратов, – 2010, – С. 20.
2. Иваницкий А. М. Экспериментальное исследование витой пары при экспофункциональных воздействиях / А. М. Иваницкий, М. В. Рожновский. – ЦИФРОВІ ТЕХНОЛОГІІ, – Одесса, – 2011, – С. 135 – 142.
3. Основы локальных сетей [Электронный ресурс]: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; ред. Кондратенко С., Новиков Ю. Режим доступа: <https://www.intuit.ru/studies/courses/57/57/info>.

05.11.01

С.В. Ершов, Д.В. Гилев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра конструирования и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru, d.gilev1@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Вулканизованная резина получила широкое применение в качестве изоляции и различных защитных покрытий в кабельной промышленности. Экспериментальное исследование процесса вулканизации резиновой смеси и сравнительный анализ различных вулканизирующих агентов помогают существенно минимизировать временные и материальные затраты на производстве. В работе был проведен сравнительный анализ различных смесей резины. Так же представлены результаты исследования влияния температуры на скорость вулканизации, полученные на ротационном реометре DiscoveryHR-2 производства TA Instrument.

Ключевые слова: *вулканизация; резиновая смесь; изоляция; реология; время вулканизации; вулканизирующий агент.*

В настоящее время в кабельной промышленности используются разные смеси резины, состоящие из каучуков и различных вулканизационных агентов, используемых для сшивки. Сам процесс сшивки заключается в следующем – под действием высокой температуры происходит связывание линейных макромолекул в единое целое, при этом происходит увеличение модуля упругости. Для определения данного параметра в работе использовался ротационный реометр DHR-2 (см. рис. 1).



Рис.1– Реометр серии DHR

Реометр состоит из двух частей, измерительного блока и блока управления. Отличительная особенность прибора заключается в том, что в нем используются два вида подшипников: магнитный (по вертикали) и воздушный (по горизонтали). Данная конструкция позволяет снизить трение между подвижными частями и повысить точность измерения.

Методика эксперимента заключается в том, что образец испытуемой резиновой смеси помещался между двумя параллельными пластинами диаметром 25 мм, и подвергался синусоидальной осциллирующей деформации, за счет вращения верхней плоскости.

На рисунке 2 показана используемая измерительная система «плоскость-плоскость», которая характеризуется радиусом R , равным 12,5 мм и расстоянием между плоскостями h .

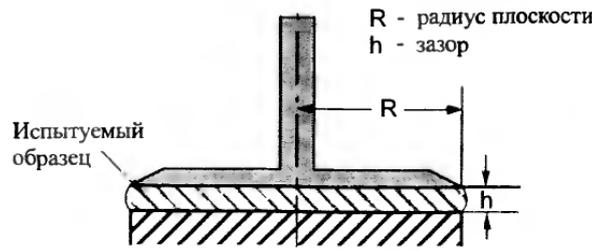


Рис. 2– Измерительная система «плоскость-плоскость»

В процессе проведения эксперимента жесткость образца возрастает по мере вулканизации резиновой смеси. При достижении полной сшивки крутящий момент достигает максимального значения. Время вулканизации в минутах определяется по следующей формуле:

$$S = \left[M_L + \frac{x(M_H - M_L)}{100} \right] \quad (1)$$

где M_L – минимальный крутящий момент; M_H – максимальный крутящий момент, достигаемый в течение определенного промежутка времени при постоянно возрастающем модуле упругости.

На первом этапе было проведено экспериментальное исследование процесса вулканизации трех смесей резины, марок: ЭПО-45 ВГ, ЭПН-40, ИШМ-30 ВГ. Температура измерительной системы была одинаковой для всех образцов и составляла 180°C. Результаты полученных экспериментальных зависимостей крутящего момента от времени приведены на рисунке 3.

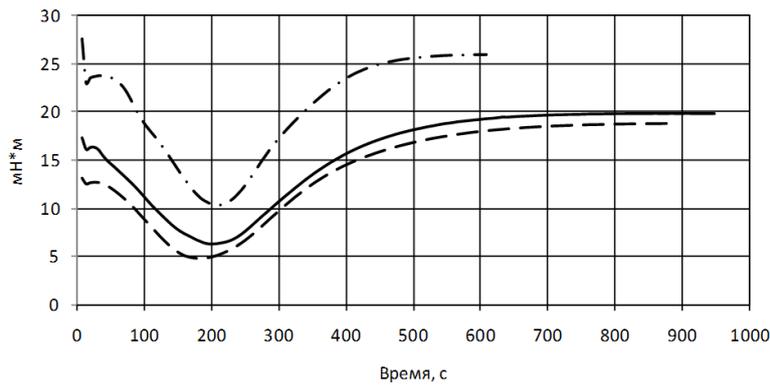


Рис. 3– График зависимости крутящего момента от времени вулканизации.

— · — ИШМ-45 ВГ; - - ЭПО-45 ВГ; — ЭПН-40

Из рисунка видно, что резина, марки ИШМ-45 ВГ вулканируется быстрее, и полная сшивка происходит за 320 секунд, это означает, что в данной смеси используется более активный вулканизирующий агент, чем в двух других составах.

На втором этапе исследования была проведена оценка влияния температуры на скорость вулканизации. Эксперименты проводилось при трех различных температурах 170, 180, 190°C. На рисунке 4 представлены кривые для смеси марки ЭПО-45 ВГ.

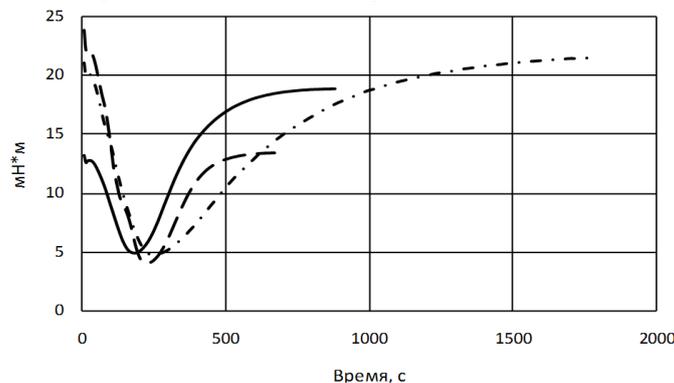


Рис. 4– График зависимости крутящего момента от времени для резины марки ЭПО-45 ВГ при температуре: — · — 170 (°С); — 180 (°С); - - 190 (°С)

Анализируя полученные результаты можно отметить, что процесс вулканизации при температуре 190°C происходит быстрее на 1170 секунд чем при 170°C. Однако, данная температура может подходить не для всех смесей резины, так как перегрев может привести к началу термической деструкции некоторых компонентов, входящих в ее состав. В то же время, использование достаточно низкой температуры при наложении изоляции может привести к недовулканизации резины и как следствие к снижению эксплуатационных характеристик готового изделия.

Аналогичные результаты были получены для двух других смесей резины, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1– Зависимость времени вулканизации от температуры.

Материал	Время вулканизации, с		
	170°	180°	190°
ЭПН-40	1260	570	310
ЭПО-45 ВГ	1580	620	410
ИШМ-30 ВГ	790	320	145

Исходя из полученных значений времени вулканизации при разных температурах, можно сделать вывод, что меньше всего данный параметр влияет на время сшивки в случае материала марки ИШМ-30 ВГ. Снижение температуры приводит к увеличению времени вулканизации на 18,35%. Две другие марки резины (ЭПО-45 ВГ и ЭПН-40) имеют достаточно близкие значения времени сшивки, и при снижении температуры на 20°C время вулканизации для них увеличивается на 26%.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод о том, что данный метод позволяет произвести сравнительную оценку различных вулканизирующих агентов резиновых смесей, а так же определить время, температуру и достаточную степень сшивки для достижения необходимых механических характеристик готового изделия. Кроме этого, экспериментальное исследование процесса вулканизации позволяет сократить временные и материальные затраты на производстве при подборе оптимального технологического режима наложения изоляции и защитных покрытий.

Список литературы

1. ГОСТ 54547-2011 Определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров
2. Рагулин В. В. Технология шинного производства. М.: Высшая школа, 1977. 216 с.
3. Карпов В. Н. Оборудование предприятий резиновой промышленности. М.: Химия, 2007. 336 с.
4. Ю. О. Аверко-Антонович, Р. Я. Омельченко, Н. А. Охотина, Ю. Р. Эбич. Технология резиновых изделий: учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1991. 352 с.
5. В.С. Шеин, Ю.Ф. Шутилин, А.П. Гриб. Основные процессы резинового производства. Л.: Химия, 1988. 159 с.
6. James L. White. Rubber Processing: Technology, Materials, and Principles. Hanser Publishers, 1995. 586 p.

05.11.01

С.В. Ершов, С.В. Фоминых

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра конструирования и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru, quill5953@gmail.com.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ

В настоящее время полимерные композиции на основе полиолефинов имеют широкое применение при производстве различных изделий. В процессе переработки эти материалы особенно сильно подвержены окислению. В статье приведены экспериментальные исследования окислительной индукции различных полимерных композиций на основе полиэтилена. Исследования производились на дифференциальном сканирующем калориметре DSCQ2000, производства TA Instruments. В результате были получены кривые зависимости теплового потока от температуры исследуемых полимерных композиций, а также зависимости времени окисления от температуры.

Ключевые слова: полимерные композиции, полиэтилен, дифференциальная сканирующая калориметрия, время окислительной индукции, температура окислительной индукции.

Полиолефины имеют уникальные свойства из-за наличия асимметричных атомов углерода. Полиэтилен является старейшим и простейшим по строению кристаллизирующимся полиолефином [1]. Полимерные композиции на основе полиолефинов сильно подвержены окислению. Это внешнее воздействие приводит к преждевременному старению органических материалов, что может существенно повлиять на их эксплуатационные характеристики или даже привести к разрушению готового изделия. При переработке полиэтилена в экструдере температура может достигать 250 °С, что при процессе наложения и охлаждения, может привести к началу процесса окисления. Для оценки устойчивости полимерных композиций к воздействию кислорода определяют следующие параметры: температура окислительной индукции (ТОИ) и время окислительной индукции (ВОИ).

ТОИ – это относительный показатель сопротивления стабилизированного материала окислительной деструкции, определенный калориметрическим измерением температуры начала экзотермического окисления материала, который нагревается с заданной скоростью в атмосфере воздуха или кислорода. [2]

ВОИ – это условный показатель, характеризующий сопротивление стабилизированного материала окислительной деструкции, определенный калориметрическим измерением временного интервала до начала экзотермического окисления материала при заданной температуре в атмосфере воздуха или кислорода. [2]

В ГОСТ Р 56759-2015, изложен метод по определению времени и температуры окислительных индукций. Полученные в результате данные в свою очередь позволяют оценить качество антиоксидантной стабилизирующей добавки, присутствующей в материале. Таким образом, время или температура окислительной индукции представляет собой оценку уровня (или степени) стабилизации полимерной композиции.

Для определения ВОИ и ТОИ исследуемых образцов полимеров использовался дифференциальный сканирующий калориметр DSC Q2000 производства TA Instruments (см. рис.1). Метод дифференциальной калориметрии основан на непрерывной регистрации разности теплового потока от образца и эталона или к образцу и эталону (изменения энтальпии) как функции температуры или времени при нагревании образцов в соответствии с определенной программой эксперимента. На рисунке 2 представлена схема измерительной камеры ДСК, состоящая из двух ячеек: в одну помещается исследуемый образец (S), а в

другую – эталон (R). Для экспериментального определения тепловых эффектов превращения исследуемого материала, измеряется разница температур между ячейкой с образцом и ячейкой сравнения[3].



Рис.1– DSC Q2000

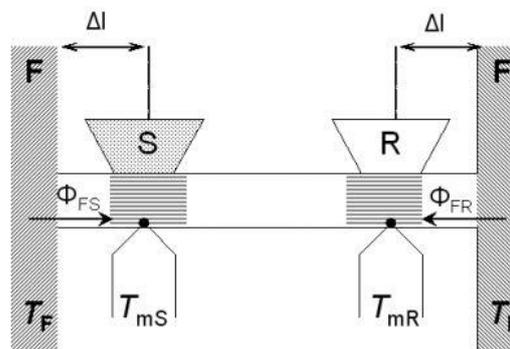


Рис.2– Схема измерительной камеры ДСК

В работе проводились экспериментальные исследования трех полимерных композиций на основе полиэтилена, следующих марок: PE153-10К, Borealis ME6052, PE 273-81К. На первом этапе была определена температура начала процесса окислительной индукции (ТОИ). Полимерные материалы помещались в специальные алюминиевые тигли, в качестве эталона в ячейку сравнения устанавливался такой же пустой тигель. Измерения производились в атмосфере воздуха (скорость продувки измерительной ячейки составляла 50 мл/мин). Нагрев образца начинался от 40°C и продолжался до момента, который характеризует точку максимального значения теплового эффекта реакции окисления. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин. На рисунке 3 представлены экспериментальные кривые зависимости теплового потока от температуры для исследуемых полимерных композиций.

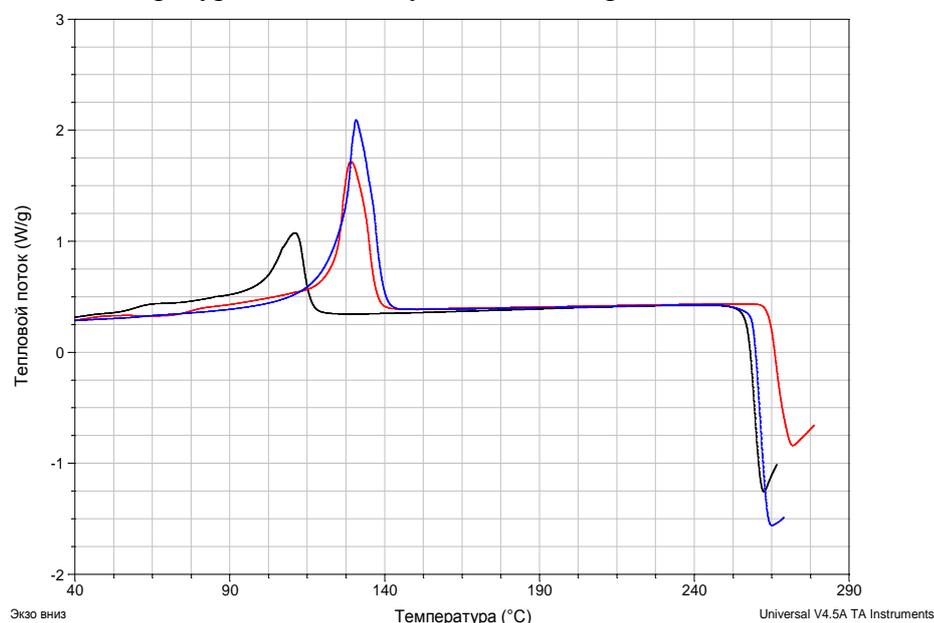


Рис.3– Зависимости теплового потока от температуры полимерных композиций:
 — PE 153-10К; — Borealis ME 6052; — PE 273-81К

После анализа полученных зависимостей были определены ТОИ методом касательных. Из полученных данных можно сделать вывод, что наибольшая температура начала окислительного индукции наблюдается у полимера марки Borealis ME 6052 и составляет 263,97 °С. У полимерных композиций отечественного производства, марок 273-81К и 153-10К, температуры начала окисления достаточно близки и составляют 258,86 °С и 257,04 °С соответственно.

На втором этапе было проведено исследование влияния температуры на время окислительной индукции. Выбор температуры изотермического режима производился исходя из данных рисунка 3. Нагрев материала производился от начальной температуры 50 °С со скоростью 10 °С/мин до достижения температуры изотермы. После этого нагрев прекращался, и в течение 3 минут происходила стабилизация температуры исследуемого образца и измерительной ячейки ДСК. По истечении указанного времени азот заменялся воздухом и начинался отсчет времени до начала процесса окисления. Затем уменьшалось значение температуры изотермы, и эксперимент повторялся, до момента, пока время окислительной индукции не превысит 10 минут. Анализ кривых так же производился методом касательных. На рисунке 4 приведены полученные результаты.

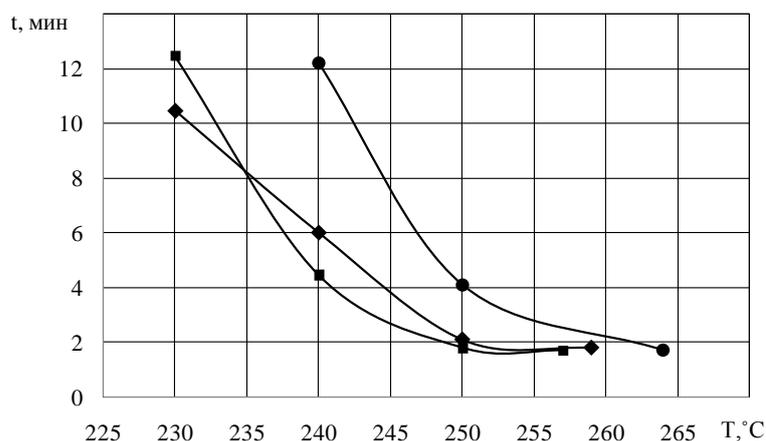


Рис.4– Зависимости времени от температуры для полимерных композиций:
● – Borealis ME6052; ◆ – PE273-81K; ■ – PE153-10K

Из полученных кривых, можно видеть, что полимерная композиция на основе полиэтилена низкой плотности, марки PE153-10K имеет самое большое время окислительной индукции (12 мин. 45 с.) при температуре 230 °С. При этом увеличение температуры приводит к существенному снижению данного параметра. Материал марки PE273-81K имеет самое низкое значение времени начала окисления, и более пологую кривую зависимости от температуры.

Подводя итог, можно сделать вывод, что использование данной методики для определения температуры и времени окислительной индукции позволяет произвести сравнительную оценку различных антиоксидантов, входящих в состав полимерных композиций и подобрать наиболее подходящую.

Список литературы

1. Уайт Дж., Чой Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины. – СПб.: Профессия, 2006. 256 с.
2. ГОСТ Р 56756-2015. Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия. Часть 6. Определение времени окислительной индукции и температуры окислительной индукции.
3. Емелина А.Л. Дифференциальная сканирующая калориметрия. – М.: Лаборатория химического факультета МГУ, 2009. 42с.

05.11.14

Т.В. Карасева канд. техн. наук, И.А. Туряева, А.Н. Долгов канд. техн. наук

ФГБОУ ВО Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева,
Арзамасский политехнический институт (филиал),
кафедра “Авиационные приборы и устройства”,
Арзамас, aru@apingtu.edu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА БЕЗМАСОЧНОЙ ЛИТОГРАФИИ НА КАЧЕСТВО ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ

В работе представлены результаты исследования качества тестовых образцов при безмасочной литографии. Проведен подбор оптимальных режимов экспонирования при данной литографии на подложках из разного материала с различной толщиной нанесенного фоторезиста.

Ключевые слова: *микроэлектроника, безмасочная литография, фоторезист, оптимальные параметры экспонирования.*

Современные технические изделия микро и нанoeлектроники представляют собой сложные системы, включающие в свой состав большое количество разнородных подсистем. Поэтому производство таких изделий является задачей чрезвычайно ответственной и непосредственно включает в себя стадии конструирования микроэлектронных изделий, разработку технологии производства, а также создание новых производственных модулей или внедрение на уже существующие производства [1].

Необходимость дальнейшей миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры и микромеханических систем, повышения функциональной сложности, быстродействия и надежности при одновременном уменьшении массогабаритных показателей, стимулирует развитие новых направлений конструктивно-технологического исполнения изделий микроэлектроники.

Параметры микроэлектромеханических приборов и систем зависят не только от конструкции, но и от выбора материалов и технологии, которые используются для их получения. Разработка технологических процессов изготовления таких приборов и устройств, с применением традиционных и перспективных материалов, является актуальной задачей в приборостроении для военных и космических нужд.

За последнее десятилетие появилось оборудование, которое может производить новые, ранее не существующие, операции технологического процесса. Примером такого оборудования, может быть генератор изображений, рисующий заданную топологию непосредственно на подложке выбранного материала, применяемый в безмасочной литографии.

Технология безмасочной литографии, благодаря отсутствию необходимости использования фотошаблонов дает экономический эффект для экспериментальных и мелкосерийных производств. Для серийного производства фотошаблоны применяются как промежуточные заготовки в последующей фотолитографии, а для мелкосерийного производства их использование усложняет технологический процесс, решением которого является применение безшаблонной литографии при изготовлении топологии плат и МЭМС-структур в рамках отработки технологии изготовления.

На качество изображения, полученного с помощью безмасочной литографии, оказывают большое влияние параметры технологического процесса. В рамках проводимых исследований использовался отечественный позитивный резист ФП9120-1, который при масочной литографии обеспечивает необходимую разрешающую способность. В наибольшей степени влияют толщина фоторезиста, которая зависит от скорости центрифуги при его нанесении, и режимы экспонирования.

Основной задачей исследования является определение оптимальных режимов экспонирования при различной толщине нанесенного фоторезиста при безмасочной литографии. В производстве МЭМС-структур могут использоваться различные материалы для подложки: поликор, нитрид алюминия, кремний и т.д. Тип применяемой подложки влияет на технологические режимы производственной линейки.

Работы проводились на установке DWL 66 Plus [2] производства Heidelberg Instruments Mikrotechnik GmbH (Германия) с использованием подложек из поликора (группа образцов №1 и №2), из нитрида алюминия (группа образцов №3 и №4) с нанесенным фоторезистом. Определение режимов экспонирования осуществлялось на образцах размером 48x60 мм с односторонним нанесением пленки фоторезиста позитивного ФП9120-1 при скоростях вращения центрифуги 1000 (формируется большая толщина) и 3000 об/мин:

- группа №1, 3 - 1000 об/мин;
- группа №2, 4 - 3000 об/мин;

В идеале чем меньшую толщину имеет фоторезист, тем выше разрешающая способность. Однако в этом случае неравномерность нанесения в относительных величинах будет больше.

DWL 66 Plus – современная высокотехнологичная система высокопрецизионной литографии с использованием лазерного излучения. Может использоваться для изготовления фотошаблонов или прямого экспонирования на любой плоской поверхности, покрытой фоторезистом.

Формирование рисунка выполняется с использованием растровой сканирующей технологии. Подложки механически перемещаются под пишущей линзой в одной плоскости, пока луч сканирует в поперечном направлении. Из-за особенности формирования время экспонирования зависит не от топологии рисунка, а от размера.

На установке в режиме безмасочной литографии каждый из образцов поликора и нитрида алюминия с нанесенным фоторезистом последовательно был проэкспонирован набором тестовых геометрических элементов, которые определяли топологию.

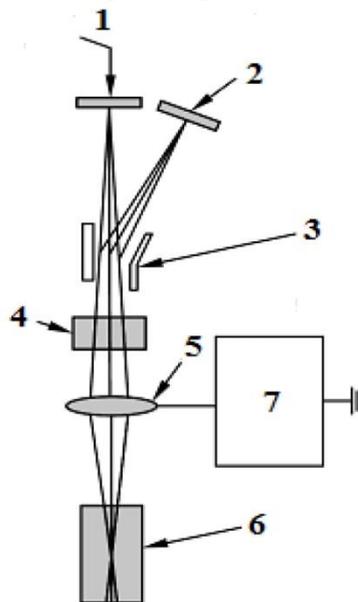


Рис. 1 Схема экспонирования

Схема экспонирования представлена на рис. 1. Основной лазер 1 формирует поток света проходящий через модулятор 3, затем через дефлектор 4 попадает в систему линз 5, которая в свою очередь сводит поток в световое пятно малой площади на поверхности фоторезиста подложки 6. Время экспозиции фиксировано и определяется скоростью сканирования поверхности. Энергия экспонирования зависит от мощности питания лазера (параметр «мощность» в настройках установки, не все модели лазера поддерживают) и степени пропускания света модулятором (параметр «интенсивность»). Предусмотрена ручная фокусировка системы линз (параметр «фокус»). Возможно также использовать автоматическую фокусировку. Для этого используется вспомогательный инфракрасный

источник света 2 малой мощности. Размеры светового пятна на поверхности фоторезиста подложки от источника 2 контролируются и поддерживаются в заданных пределах с помощью блока управления системы линз 7. Поскольку 1 и 2 используют общую оптическую систему, таким образом достигается также фокусировка основного луча. Автоматический режим позволяет учесть неравномерность нанесения фоторезиста. Ручной – обеспечивает более «тонкую» регулировку.

Требуемая интенсивность излучения зависит от типа фоторезиста, от его толщины, а также от типа подложки.

В рамках исследования вышеуказанные параметры регулировались в следующих пределах:

- фокус: от +10 до -40 с шагом -10;
- мощность: от 60 до 100 мВт с шагом 5 мВт;
- интенсивность: от 20 до 100 % с шагом 10 %.

Поскольку лазер, используемый в установке, позволяет регулировать мощность, то, согласно рекомендациям изготовителя, регулировку энергии экспонирования желательно осуществлять за счет нее, а «интенсивность» поддерживать максимальной.

После экспонирования, для проявления тестовых структур геометрических элементов, образцы были подвергнуты химической обработке.

Графические изображения для проверки качества готовых образцов были получены с помощью видеомикроскопа высокого разрешения HIROX KH-7700 (увеличение 200).

Критериями для определения оптимальных режимов экспонирования на установке безмасочной литографии DWL 66 Plus являются следующие факторы:

- минимальный топологический элемент – 2 мкм, равномерность ширины линии – 220 нм, неровность края – 120 нм;
- четкое, достаточно резкое очертание границ геометрического элемента;
- отсутствие слияния контуров соседних элементов;
- отсутствие непроявленных участков топологии.

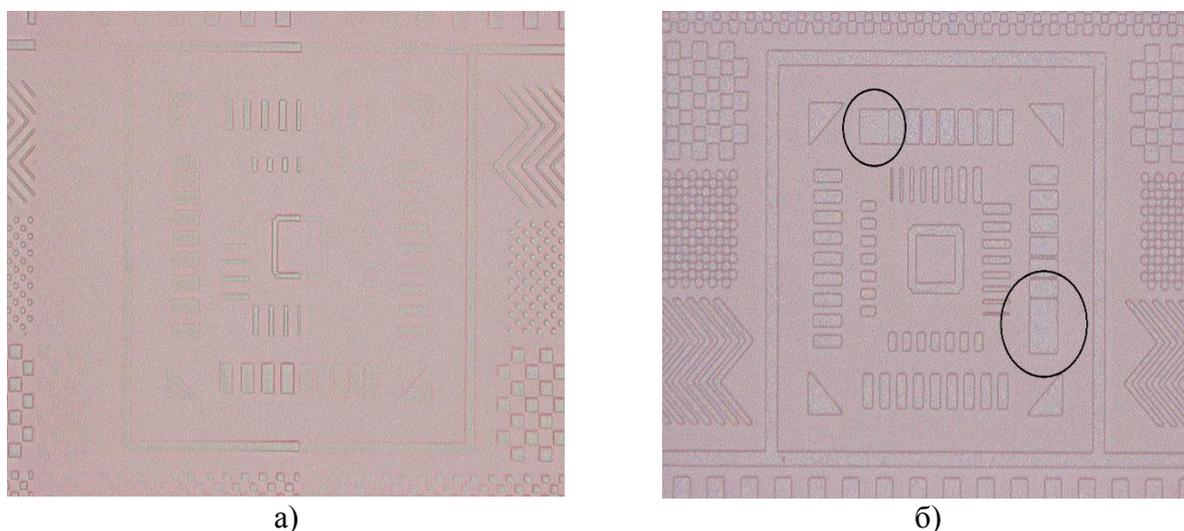


Рис. 2 – а) недопроявленные элементы топологии; б) слияние соседних элементов, размыты контуры, углы скруглены

Во время проведения исследования и подбора параметров экспонирования были получены рисунки (Рис. 2) несоответствующие критериям (неоптимальные параметры экспонирования).

Анализируя полученные образцы с различными сочетаниями параметров экспозиции были определены оптимальные режимы засветки лазерным излучением для каждой группы образцов.

Для группы №1, №3: оптимальные параметры экспозиции: фокус - 40, мощность 90 мВт, интенсивность 100%.

Однако при этом во всех вариантах изменения параметров экспонирования на данном образце отсутствует минимальный элемент (Рис. 3). Другими словами, при большей толщине фоторезиста (при скорости центрифуги 1000 об/мин) разрешающая способность недостаточна. Тип подложки не оказал влияния на параметры экспозиции.

Для группы образцов №2: оптимальные параметры экспозиции: фокус - 40, мощность - 90 мВт, интенсивность 100% (Рис. 4).

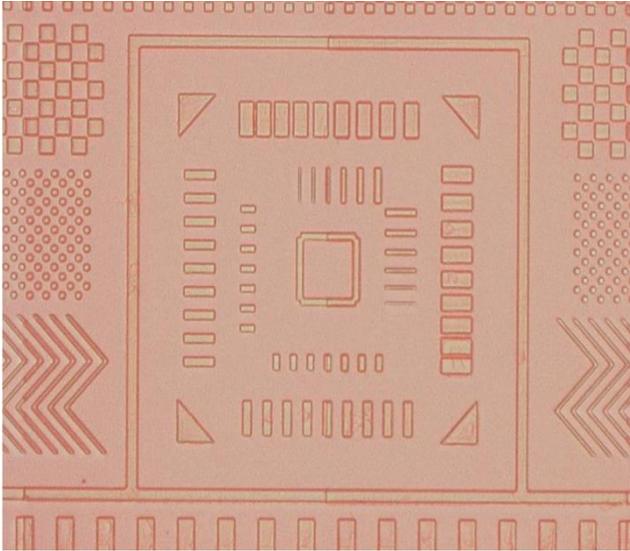


Рис. 3 – Образцы группы №1, №3 тестовая структура, полученная с оптимальными параметрами экспозиции

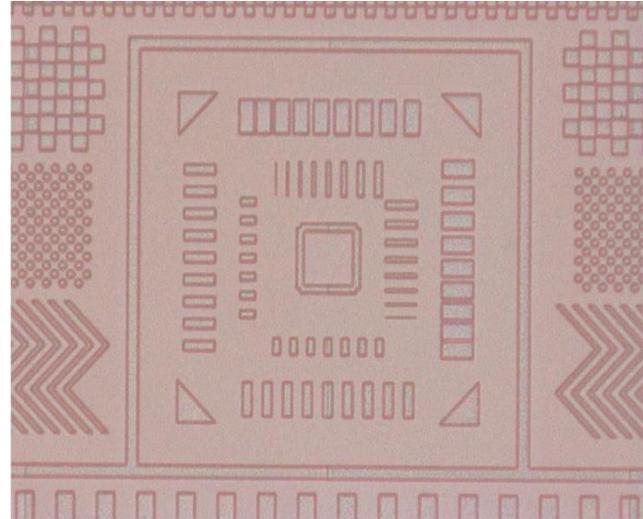


Рис. 4 – Образцы группы №2, №4 тестовая структура, полученная с оптимальными параметрами экспозиции

Для группы образцов №4: оптимальные параметры экспозиции: фокус - 40, мощность 75 мВт, интенсивность 100% (Рис. 4).

Анализируя результаты по группам 2 и 4, можно сделать вывод, что разрешающая способность будет достаточной и параметры экспозиции определялись и типом подложки.

Список литературы

1. Болонин В.Е., Ивашов Е.Н., Корпачев М.Ю., Костомаров П.С. Методика разработки комплексных производственных модулей в современном микроэлектронном производстве. Успехи современного естествознания. 2014. № 5 (часть 1). С. 137-145
2. HEIDELBERG INSTRUMENTS DWL 66FS User Guide, Copyright © 2007 by Heidelberg Instruments.

05.11.00

А.В. Кутина¹, Б.Г. Свердлов² канд. техн. наук

¹АО «Научно-производственное объединение «Лианозовский электромеханический завод»
Москва, ann.v.kutina@gmail.com

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
Москва, sverdlovbg@rambler.ru

ИНФОРМАТИВНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ ПРИЗНАКИ БПЛА И ПТИЦ

В статье представлены некоторые радиолокационные признаки, свойственные таким типам целей, как БПЛА и птицы. Приведены результаты обработки и анализа их доплеровских спектров, полученных в результате эксперимента.

Ключевые слова: *БПЛА, птицы, распознавание, сигнальные признаки, методы «сверхразрешения».*

Среди задач, решаемых с помощью радиолокации, присутствует задача распознавания целей. Современные достижения в этой области позволяют соотносить цели с определёнными классами при условии наличия у них различных физических и скоростных особенностей, определяемых параметрами отражённых от них радиосигналов.

Уже существующие предложения по решению этой задачи рассматривают различные методы, как традиционные статистические, так и с использованием адаптивных алгоритмов, в частности, искусственных нейронных сетей [1].

Эффективность статистических методов в основном зависит от качества подбора признаков, на основе которых принимается решение о классе цели.

По своей физической природе признаки радиолокационного распознавания обычно разделяются на траекторные и сигнальные [2]. Траекторными признаками являются скорость, ускорение, дальность, высота и направление полёта. К сигнальным признакам относятся ЭПР, спектральные и поляризационные признаки, дальностный портрет цели.

В статье рассматривается задача классификации двух типов целей: птиц и БПЛА. При этом большинством целей, обнаруживаемых РЛС при обзоре на малых дальностях (до 20 км) и высотах (до 1,5 км), являются летающие птицы.

В условиях выбора между этими двумя классами в нашем случае важно уже на этапе первичной обработки, то есть после приема пачки эхо-сигналов от цели, получить оценки принадлежности цели заданным классам с достаточно высокой степенью вероятности. В статье проверяются на информативность некоторые сигнальные признаки.

Плотности распределения некоторых сигнальных признаков

Принятие отражённых от целей сигналов на двух поляризациях позволяет использовать для обработки матрицы рассеяния, которые могут служить источниками информации о физических размерах, формах, диэлектрических свойствах целей [3]. Элементами этой матрицы служат значения комплексных амплитуд принятых сигналов. На главной диагонали расположены амплитуды, принятая поляризация которых соответствует излучённой, а на побочной – так называемые кросс-поляризационные коэффициенты, то есть значения амплитуд, чьи поляризации при приёме ортогональны излучённым. Особенности работы используемой в экспериментах РЛС позволяют реализовать сравнение только между коэффициентами главной диагонали. Тем не менее, учет даже этих поляризационных свойств, согласно теории, в некоторых случаях может приводить к хорошим результатам при распознавании [4].

При этом отношение максимальных значений спектров в вертикальной поляризации W_{mv} к горизонтальной W_{mh} определялось по формуле (1):

$$\Delta W_{max} = \frac{W_{mv}}{W_{mh}}, \tag{1}$$

Совместно-поляризационный коэффициент корреляции между N отсчетами спектров вертикальной A_v и горизонтальной A_h поляризации для каждого класса рассчитывался по формуле (2):

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N (\sqrt{A_v} * \sqrt{A_h})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N A_v * \sum_{n=1}^N A_h}}, \tag{2}$$

Значения ширины полосы спектров различных классов в двух поляризациях вычислялись по формуле (3):

$$\Delta f_{0,7,v,h} = \frac{\sum_{n=1}^N A_{v,h}}{W_{mv,h}}, \tag{3}$$

где $A_{v,h}$ – значения отсчетов спектра в ВП и ГП.

Примеры полученных гистограмм приведены на рис. 1.

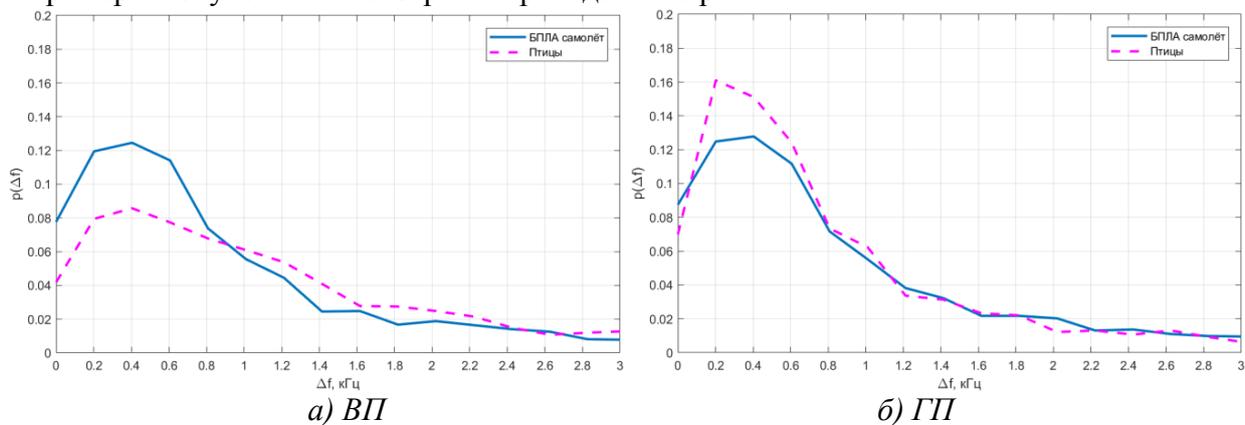


Рис.1 – Распределение значений ширины полосы спектра

Анализ полученных результатов показал, что указанные признаки оказались непригодными для однозначного определения классов целей.

Доплеровские спектры отраженных от целей сигналов

В качестве воздушных объектов (ВО) исследования выступали два класса: птицы и летательные аппараты (ЛА), причём последние разделялись на БПЛА самолётного типа, квадрокоптеры и самолёты гражданской авиации (ГА), попадавшие в зону действия используемой в эксперименте РЛС трёхсантиметрового диапазона волн, работающей на двух ортогональных поляризациях

За время одного обзора РЛС записывает N отсчётов сигнала, отражённого от цели, попадающей в зону обнаружения РЛС. Эти N отсчётов, представляемые двумя квадратурными составляющими, образуют собой одну из M реализаций для цели. Часть отсчётов для одной реализации соответствует сигналу, принятому на вертикальной поляризации (ВП), а часть – на горизонтальной (ГП).

В эксперименте для каждого класса целей размеры обрабатываемых массивов записей составили $M = 13000, N = 84$.

По принятым квадратурным составляющим отраженной от цели пачки импульсов можно построить доплеровский спектр. На этапе поиска отличительных признаков такие спектры уместно рассматривать в совокупности.

Наиболее характерные примеры доплеровских спектров для вертикальной (синяя кривая) и горизонтальной (красная кривая) поляризаций представлены на рис.2а-г для птиц и разных типов БПЛА.

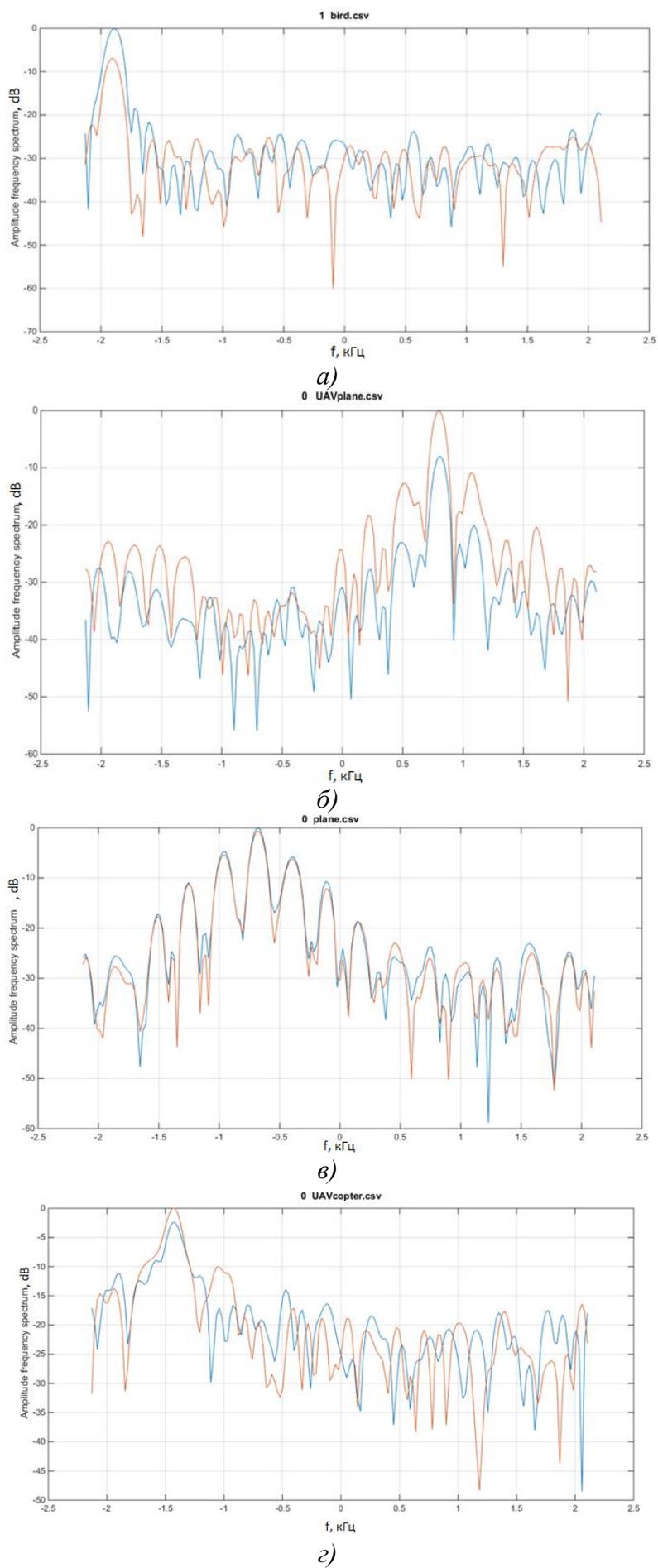


Рис.2 – Графики доплеровских спектров в ВП и ГП

На рисунках видно, что для ВО класса ЛА, таких как БПЛА самолетного типа (рисунок 2б), самолетов ГА (рисунок 2в) и квадрокоптеров (рисунок 2г) в доплеровском спектре наблюдается пропеллерная модуляция [2], связанная со взаимным перемещением элементов цели.

Пропеллерный эффект для доплеровского спектра ЛА, особенно квадрокоптеров, в ходе проведения испытаний был в большинстве случаев слабо выражен и поэтому не является признаком при классификации ВО.

Построение энергетических спектров методом «сверхразрешения»

Поскольку характерные отличительные признаки для полученных в ходе испытаний одиночных спектров выражены слабо, можно построить более детализованные радиолокационных портреты с помощью методов параметрического спектрального анализа. Так при использовании метода «сверхразрешения» Кейпона [5] были получены модели спектров птиц и БПЛА в двух поляризациях различных порядков. Исходными данными для моделирования стали записи, однозначно относящиеся к исследуемым классам целей.

Метод предполагает оценку обратной корреляционной матрицы для цели, характеризующейся M количеством записей в трассе по N импульсов в каждой, и её перемножение с некоторым опорным вектором S , элементы которого зависят от частоты Доплера, в соответствии с формулой (3):

$$W(\omega) = \frac{1}{[\bar{S}^*(\omega) * \Phi_V^{-1} * \hat{S}(\omega)]'} \tag{3}$$

где Φ_V^{-1} – обратная корреляционная матрица цели порядка $N \times N$,

$\bar{S}^*(\omega)$ – вектор-столбец, вычисляемый по формуле (4):

$$\bar{S}^*(\omega) = [1, e^{j\omega T_{\Pi}}, e^{j2\omega T_{\Pi}}, \dots, e^{j(N-1)\omega T_{\Pi}}], \tag{4}$$

где T_{Π} – период повторения импульсов в пачке.

На рис. 3–5 показаны оценки доплеровских спектров по количеству пачек, отражённых от каждой цели сигналов (числе реализаций) $m = 90$.

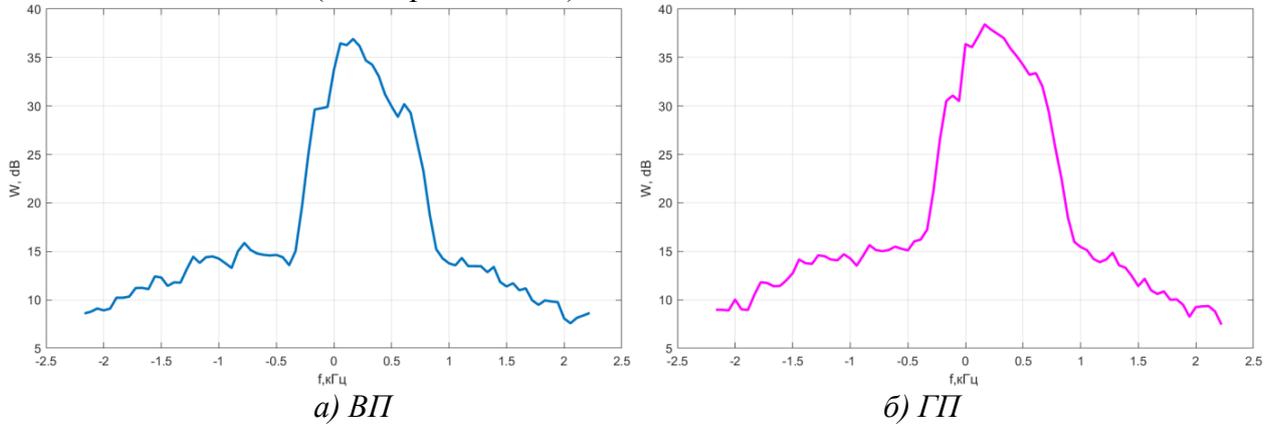


Рис.3 – Энергетический спектр отражений от птиц

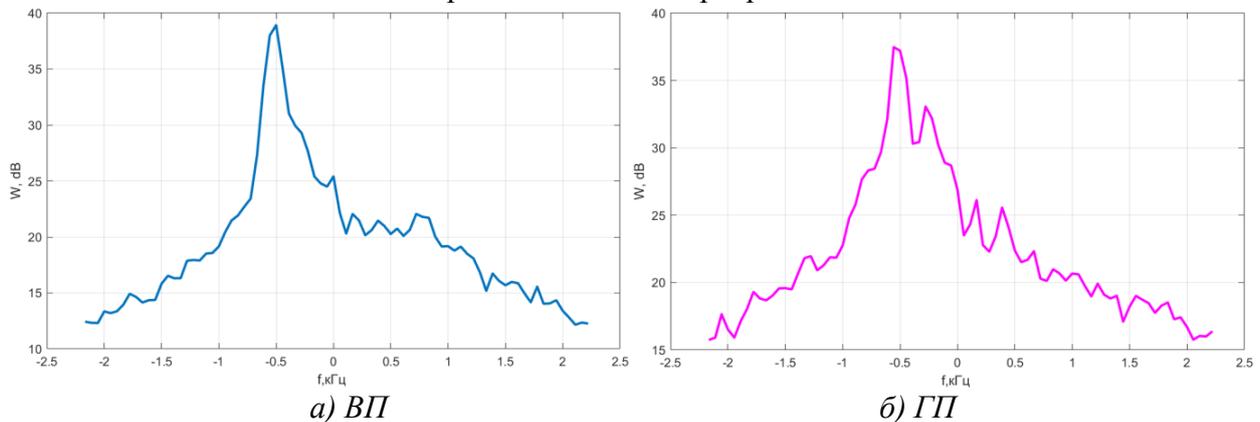


Рис.4 – Энергетический спектр отражений от БПЛА типа квадрокоптер

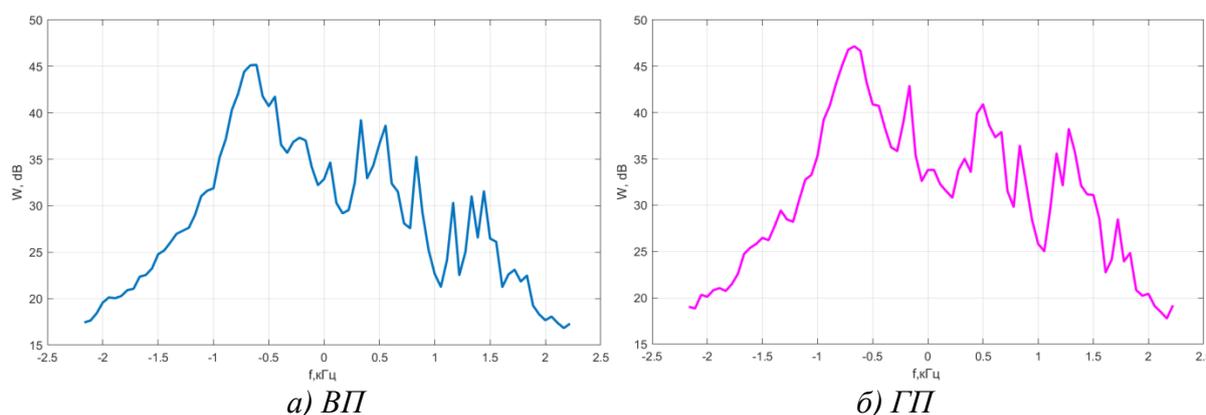


Рис.5 – Энергетический спектр отражений от БПЛА типа самолёт

На рисунках 3-5 можно наблюдать различия в характере осцилляций энергетических спектров БПЛА и птиц особенно в области боковых лепестков.

Заключение

1. Проведены экспериментальные исследования сигнальных признаков отраженных от БПЛА и птиц сигналов на ортогональных (вертикальной и горизонтальной) поляризациях. Оценивались следующие сигнальные признаки:

- отношение максимальных значений энергетических спектров отражённых сигналов на двух ортогональных поляризациях;
- совместно-поляризационные коэффициенты корреляции;
- значение ширин спектров отражённых сигналов на двух ортогональных поляризациях.

Анализ полученных результатов показал, что указанные поляризационные сигнальные признаки не могут быть рекомендованы для классификации целей типа БПЛА и птиц.

2. Получены оценки доплеровских спектров отражённых от БПЛА и птиц сигналов на вертикальной и горизонтальной поляризациях. В доплеровских спектрах БПЛА наблюдается пропеллерная модуляция, которая особенно ярко проявляется у БПЛА самолетного типа.

3. Получены оценки энергетических спектров отражённых сигналов от БПЛА и птиц на вертикальной и горизонтальной поляризациях методом «сверхразрешения» Кейпона.

В энергетических спектрах сигналов от БПЛА отчетливо проявляются признаки осцилляций в области боковых лепестков, тогда как в спектрах сигналов от птиц модуляция спектров практически отсутствует.

4. Использование методов «сверхразрешения» подразумевает повышенные затраты времени и вычислительных ресурсов, что может вызвать затруднение при их практической реализации при работе РЛС в реальном времени. Однако полученные результаты полунатурного моделирования позволяют выявить признаки, слабо проявляющиеся в явном виде у одиночных отражений, которые могут быть учтены при формировании признаков пространства для систем распознавания на этапе их проектирования.

Список литературы

1. *R. Heersink. An adaptive Bayesian approach towards a robust classifier for UAVs and birds. M.Sc. Thesis. University of Twente, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics & Computer Science, 2016.*
2. *Ширман Я.Д., Гориков С.А., Леценко С.П., Братченко Г.Д., Орленко В.М. Радиолокационное распознавание и методы математического моделирования. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование. Радиолокация и радиометрия, выпуск 3, 2000, с. 5-64.*
3. *J.S. Lee, E. Pottier. Polarimetric radar imaging. CRC Press, 2009. – 403 с.*
4. *Isabel M. D. Rosa, Ana Teresa Marques, Gustavo Palminha, Hugo Costa, Miguel Mascarenhas, Carlos Fonseca, Joana Bernardino. Classification success of six machine learning algorithms in radar ornithology. IBIS 2016, № 158, с. 28-42.*
5. *Кейпон Дж. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением // ТИИЭР. 1969. Т. 57, № 8. С. 59-69.*

05.11.13

Е.В. Субботин канд. техн. наук, А.С. Поздеева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра конструирования и технологий в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДАМИ ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

В работе рассмотрены методики исследования кинетики процесса термического разложения полимерных материалов, основанные на использовании термогравиметрического анализа. Для полиэтилена высокой плотности приведены результаты экспериментов по определению энергии активации.

Ключевые слова: полимер, термогравиметрический анализ, энергия активации.

Современную промышленность практически невозможно представить без полимеров. Все более широкое применение данные материалы находят и в кабельной отрасли. При этом необходимо отметить, что постоянное совершенствование кабельных изделий, напрямую связано с разработкой новых полимерных композиций и улучшением рецептур существующих. Это обстоятельство придает большое практическое значение вопросу оценки срока службы появляющихся материалов, где ключевой является процедура определения величины энергии активации процесса, характеризующего механизм отказа.

В данной статье рассмотрены методики, позволяющие с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) определить энергию активации процесса термического разложения полимерных материалов. Экспериментальные исследования проводились на приборе TGA Discovery для полиэтилена высокой плотности (ПЭВП).

Основу действующей стандартной методики определения энергии активации по данным термогравиметрии [1] составляют труды ученых: Озавы [2], Флинна и Волла [3]. В рамках данного подхода образцы исследуемого материала, нагреваясь с различной скоростью, проходят через область разложения. По полученным температурным зависимостям массы определяются температуры соответствующие заданной степени разложения для каждой скорости нагревания. Затем строится график зависимости логарифма скорости нагревания от обратной величины абсолютной температуры, по наклону которого и рассчитывается энергия активации.

На рисунке 1 представлены профили потери массы исследуемого полимера полученные при нагреве образцов в атмосфере инертного газа (азот) при скоростях: 1 °С/мин, 2 °С/мин, 5 °С/мин и 10 °С/мин. Из графиков видно, что процесс термического разложения ПЭВП является одностадийным.

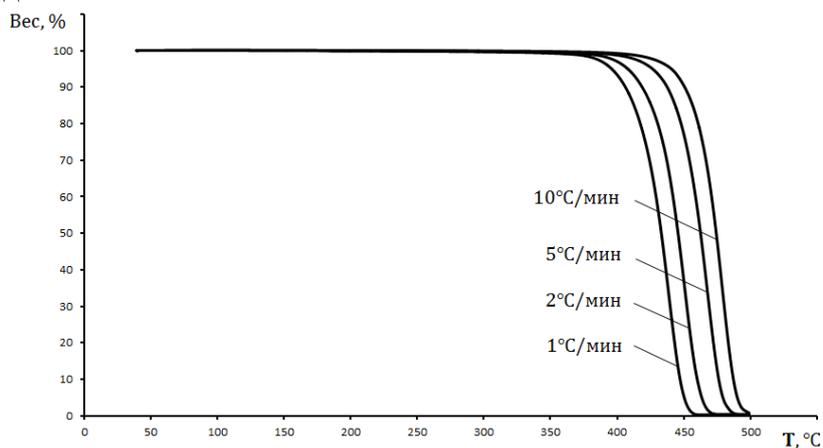


Рис. 1. – Температурные зависимости потери массы для ПЭВП

Графики зависимости логарифма скорости нагрева от величины обратной абсолютной температуры для разных степеней разложения приведены на рисунке 2. Значение энергии активации, рассчитанное по методике [1] для степени разложения 5 %, составило 194 кДж/моль.

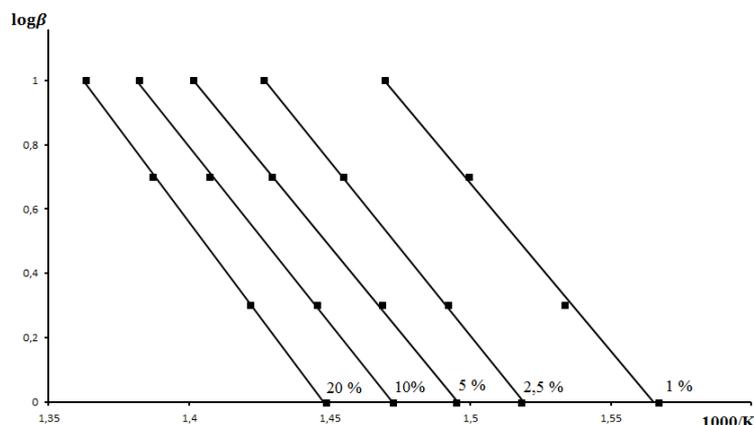


Рис. 2. – Зависимости логарифма скорости нагрева от обратной абсолютной температуры для ПЭВП

Несмотря на то, что данный метод [1] требует проведения как минимум трех экспериментов с различными скоростями нагрева, общее время, затрачиваемое на определение энергии активации, составляет менее одного дня.

Существенным недостатком стандартной методики является область применения, ограниченная одностадийными процессами и многостадийными с четко разделенными одностадийными реакциями. Данное обстоятельство не позволяет использовать последнюю для исследования полимеров, температурная зависимость потери массы которых не может быть четко разделена на одностадийные реакции. Примером такого материала является поливинилхлоридный пластикат [4].

Указанных ограничений лишена методика, основанная на применении так называемой модулированной термогравиметрии (МТГ) [5]. Данный подход, в котором контролируемая скорость нагрева сочетается с периодическими колебаниями температуры, позволяет обеспечить непрерывное измерение кинетических параметров при разложении материала в зависимости от относительной потери массы (степени превращения), температуры и времени, как для одностадийных процессов разложения, так и многостадийных с параллельно протекающими реакциями.

На рисунке 3 представлена температурная зависимость энергии активации для исследуемого полимера, полученная с помощью модулированной термогравиметрии. Эксперимент проводился в атмосфере инертного газа (азот) при постоянной скорости нагрева, которая выбиралась в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе [5]. Минимальное значение энергии активации при этом составило 196 кДж/моль, что хорошо согласуется с результатом, полученным по стандартной методике.

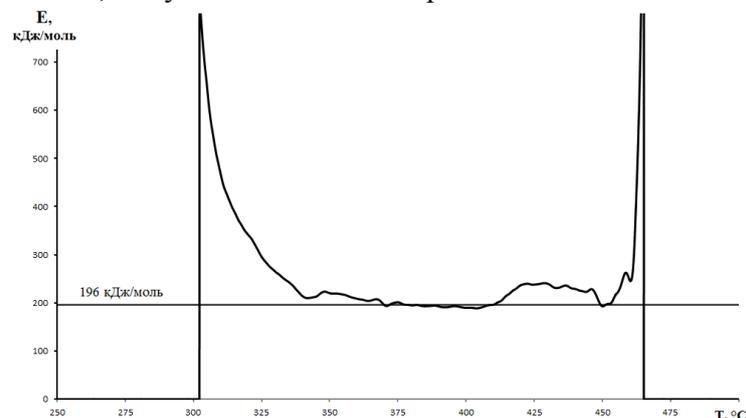


Рис. 3. – Температурная зависимость энергии активации для ПЭВП

Дополнительным преимуществом МТГ является возможность работы в квазиизотермическом режиме, когда периодические температурные колебания накладываются на изотерму, представляющую собой основной температурный профиль эксперимента. Данный режим может быть полезен, если требуется разделить процесс разложения материала на стадии и определить энергию активации конкретной реакции, протекающей в определенном температурном диапазоне.

Подводя итог выполненной работы, можно сделать вывод, что преимуществами МТГ, по сравнению со стандартной методикой, является возможность получения энергии активации при постоянной температуре и как функции температуры для одностадийных и многостадийных процессов. В общем же случае, использование термического анализа позволяет упростить и сократить время проведения экспериментов по определению кинетических параметров, необходимых для оценки срока службы полимерных материалов.

Список литературы

1. ГОСТ Р 56722-2015 «Пластмассы. Термогравиметрия полимеров. Часть 2. Определение энергии активации».
2. *Ozawa T.* A New method of analyzing termogravimetric data // Bulletin of Chemical Society of Japan. 1965. Vol. 38. p. 1881-1886.
3. *Flynn J.H., Wall L.A.* A quick, direct method for the determination of activation energy from termogravimetric data // Journal of Polymer Science. 1966. Vol. 4. p. 323-328.
4. *Бараишков О.К.* Некоторые критические замечания относительно методов предсказания сроков службы кабельных ПВХ-пластикатов // КАБЕЛЬ-news. 2008. №9. С. 50-55.
5. *Blaine R.L., Hahn B.K.* Obtaining kinetic parameters by modulated thermogravimetry // Journal of Thermal Analysis. 1998. Vol. 54. p. 695-704.

05.11.00

А.Е. Терлыч канд. техн. наук, А.А. Макаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра «Конструирование и технологии в электротехнике»,
Пермь, ktei@pstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК САЖЕСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ

Исследована зависимость электрической прочности, диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости органических композитов от концентрации в них электротехнической сажи.

Ключевые слова: *композит, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность.*

В настоящее время в кабельной технике широкое применение получает высоковольтная полимерная изоляция. В качестве такой изоляции используются сшитый полиэтилен, полиэтилен и этиленпропиленовые резины. При конструировании высоковольтных кабельных изделий и арматуры возникают задачи связанные с регулированием или выравниванием электрического поля. Одним из способов регулирования поля в изоляции является так называемое градирование изоляции, когда перераспределение напряженности электрического поля достигается изменением диэлектрической проницаемости по толщине изоляции. В слоях с большей диэлектрической проницаемостью напряженность поля снижается тем больше, чем больше отношение диэлектрических проницаемостей слоев [1-3]. Таким образом, возникает необходимость в полимерах с модифицированными электрическими свойствами. Одним из методов изменения электрических свойств полимеров является получение композитов с наполнителем из мелкодисперсной сажи. Диэлектрическая проницаемость сажи весьма велика, что позволяет, изменяя концентрацию сажи в матрице, получить композит с заданными свойствами [1,4].

В представленной работе для исследования влияния концентрации наполнителя на электрические свойства композита использовались в качестве наполнителя ацетиленовая сажа, в качестве матрицы – парафин. Использование парафина обусловлено малой вязкостью его расплава, что позволяет получить более равномерное распределение наполнителя в матрице. После смешения матрицы с наполнителем отливались плоские образцы размером 150x150x2мм. Далее измерялась электрическая емкость образцов и их тангенс угла диэлектрических потерь на высоковольтном мосте переменного тока МЭП-5СА, электрическая прочность определялась при помощи прибора АИД-70 на промышленной частоте.

Результаты исследования представлены в таблице 1. Полученные в ходе экспериментов значения диэлектрической проницаемости в зависимости от содержания сажи в композите хорошо согласуются с данными из работы [4].

Табл. 1. Электрические свойства композитов.

Массовая доля сажи, %	ϵ	$\text{tg } \delta \cdot 10^{-3}$	$E_{\text{пр}}, \text{ кВ/мм}$
0	2,30	0,252	16,5
2	2,47	0,702	13,9
3	2,68	1,750	11,9
5	3,56	7,980	4,5

Графические зависимости диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и электрической прочности от массовой доли сажи в композите представлены на рис. 1-3 соответственно. Из рис. 1-3 видно, что увеличение диэлектрической проницаемости выше трех вызывает резкий рост диэлектрических потерь и падение электрической прочности композита.

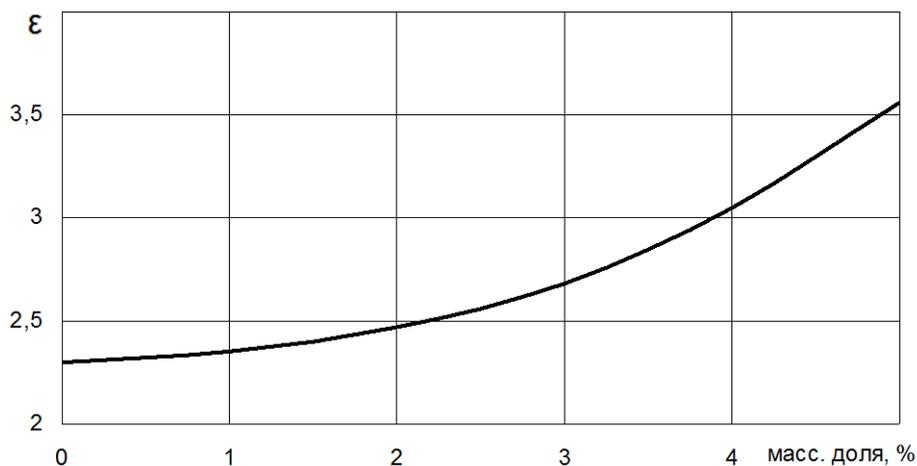


Рис. 1. Зависимость диэлектрической проницаемости композитов от содержания массовой доли сажи.

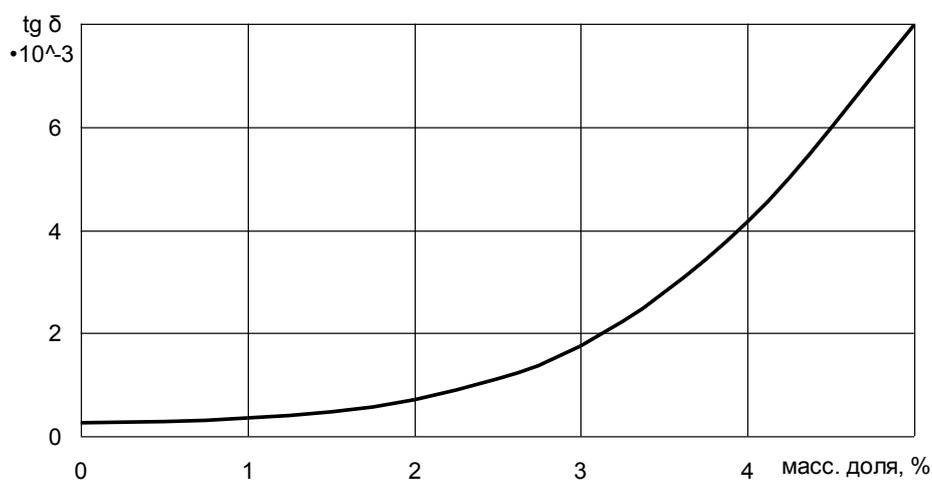


Рис. 2. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь композитов от содержания массовой доли сажи.



Рис. 3. Зависимость электрической прочности композитов от содержания массовой доли сажи.

При массовом содержании сажи выше 5% композиты теряют изоляционные свойства, приближаясь по характеристикам к полимерным композициям, используемым в качестве полупроводящих экранов при производстве кабелей с пластмассовой изоляцией.

На рис. 4 представлена фотография среза композита с 3% содержанием сажи, полученная на оптическом микроскопе с 50 кратным увеличением. На рисунке хорошо видны конгломераты частиц сажи в матрице, образующиеся, несмотря на интенсивное смешение с большими скоростями сдвига. С ростом концентрации сажи в матрице между конгломератами образуются мостики, что приводит к резкому снижению электрической прочности.

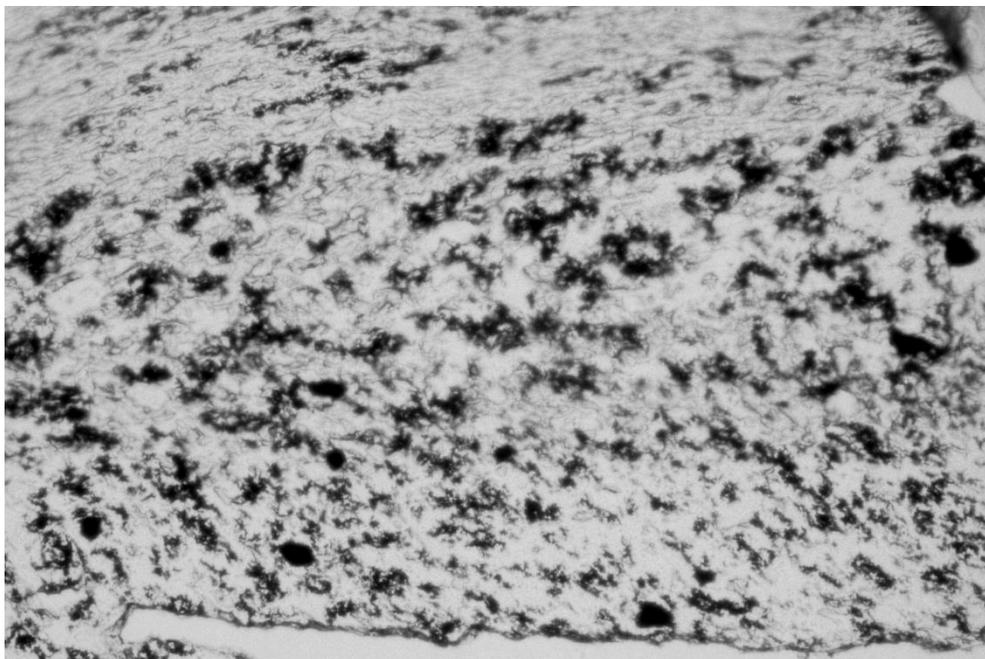


Рис. 4. фотография среза композита с 3% содержанием сажи при 50 кратном увеличении.

Использование в качестве матрицы полимеров с большей вязкостью и применение в качестве смесительного оборудования пластифицирующего экструдера позволит получить большую дисперсность наполнителя, что ослабит влияние концентрации сажи на электрическую прочность композита. Однако высокие значения тангенса угла диэлектрических потерь ставят под сомнение возможность использования сажи как наполнителя для регулирования электрического поля в изоляции высоковольтных кабелей.

Список литературы

1. *Котов Р.В.* Распределение электрического поля в кабельных муфтах холодной усадки // *Электро*, №5, 2006г., с. 40-44.
2. *Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д.* Комбинированный способ снижения неравномерности электрического поля в муфтах силовых кабелей // *Силовая электроника*, №2, 2010г., с. 81-83.
3. *Ковригин Л. А.* Основы кабельной техники: учебное пособие / Л. А. Ковригин. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2006.
4. *Четвериков В. М., Смирнов Д. Д., Гузенкова А. С.* Зависимость диэлектрической проницаемости композита от концентрации проводящего наполнителя // *Труды XXIII Международной конференции "Радиационная физика твердого тела"*.

05.11.00

В.Н. Хмелёв д-р техн. наук, А.Н. Сливин канд. техн. наук, А.В. Шалунов д-р техн. наук

Бийский технологический институт (филиал)
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,
кафедра методов и средств измерений и автоматизации,
Бийск, vnh@bti.secna.ru

СТЕНД ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНСОЛИДАЦИИ ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

Представлены исследования специального стенда ультразвуковой (УЗ) консолидации тонких листов металлов, позволившие выявить влияние параметров (усилие сжатия, время УЗ воздействия, амплитуда УЗ колебаний) на прочность формируемых соединений листов меди.

Ключевые слова: *ультразвук, консолидация, металлы, стенд, оптимизация.*

В связи с развитием аддитивных технологий ультразвуковая сварка может стать перспективным направлением решения проблемы соединения тонких листов металлов, накладываемых последовательно и соединяемых между собой при изготовлении конечных изделий. Современные технологии применения УЗ аппаратов для сварки тонких листов металлов позволяет реализовать управление энергетикой процесса [1,2] и вводить определенное количество энергии, достаточное для формирования качественных сварных швов при соединении различных металлов.

УЗ сварка металлов основана на использовании энергии механических колебаний, вводимых в свариваемые материалы при помощи сварочных инструментов, совершающих колебания на ультразвуковой частоте в пределах 15-50 кГц с амплитудой до 100 мкм при одновременном создании статического усилия прижима сварочного инструмента к поверхности свариваемых листов. Процесс формирования сварного соединения тонких листов металлов между собой происходит за счёт возникающих в металлах с высокой частотой знакопеременных напряжений и деформаций, уплотнения микро- и макронеровностей на поверхности свариваемых металлов и сварочного инструмента, повышения температуры и пластичности металлов в зоне сварки, консолидации локальных участков сварного шва на микро- и макроуровнях.

Для выявления влияния параметров процесса (усилие сжатия, время УЗ воздействия, амплитуда УЗ колебаний) на прочность формируемых соединений листов меди при проведении экспериментальных исследований необходимо было решить следующие частные задачи:

1. Разработать и практически реализовать стенд, пригодный для реализации процесса УЗ консолидации листов металлов.

2. Определить оптимальные параметры УЗ воздействия для формирования сварного шва определенных размеров.

На рис. 1 схематично представлена схема стенда.

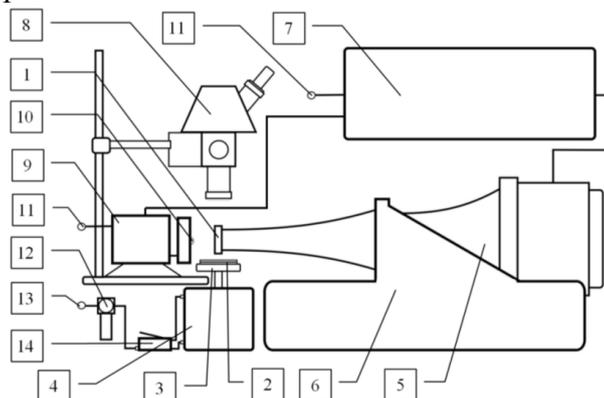


Рис. 1. Стенд для ультразвуковой консолидации металлов

Ввод УЗ колебаний в свариваемые металлы [3] осуществляется при помощи сварочного инструмента 1. Два тонких листа 2 из меди, толщиной по 100 мкм укладывались внахлест на стальную опору 3, которая при помощи пневмоцилиндра 4 перемещается по направлению к инструменту и обеспечивает статическое усилие прижима. УЗ пьезоэлектрическая колебательная система 5, жестко закрепленная на станине 6 подключена к электронному блоку 7. В состав блока входят системы, необходимые для работы ультразвукового оборудования: питания пьезопреобразователя колебательной системы, система обратной связи и согласования колебательной системы с генератором, система фазовой автоподстройки резонансной частоты, система стабилизации амплитуды колебаний, задающий генератор, контроллер управления, система индикации. Для наблюдения за процессом сварки и контроля амплитуды колебаний использовался стробоскопический метод контроля [4], основанный на применении микроскопа 8 со шкалой, имеющей цену деления 7 мкм и блока электронного стробоскопа 9 с источником стробоскопического освещения 10, синхронизируемый с электронным блоком с источником питания (11). Для контроля и управления величиной статического усилия использовался пневматический регулятор с манометром 12, подключаемый к пневмосети 13, при помощи пневматического переключателя 14. На рис. 2 представлено фото разработанного и практически реализованного стенда для проведения исследований.

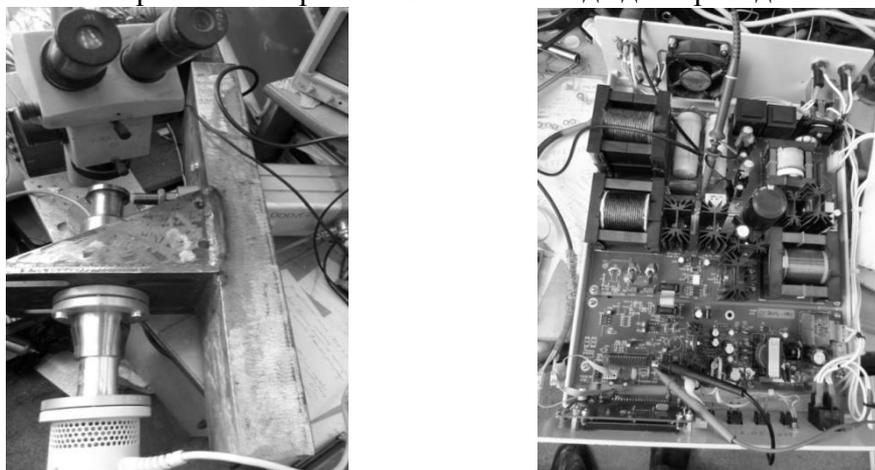


Рис. 2. Стенд для ультразвуковой консолидации металлов

Для проведения исследований по сварке и определения прочности сварных швов на разрыв были изготовлены специальные образцы длиной 150 мм и шириной 15 мм [5]. На рис. 3. представлен образец меди со сварным швом после проведения исследований (после разрыва).

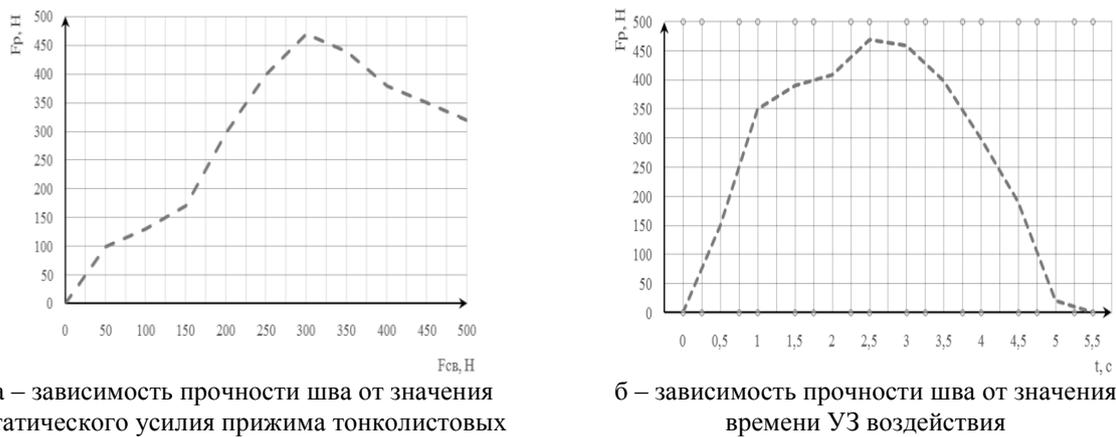


Рис. 3. Образец тонколистовой меди со сварным швом после проведения исследований прочности соединения

Ширина полученного сварного шва $2,5 \cdot 10^{-3}$ м, длина $5 \cdot 10^{-3}$ м, площадь формируемого сварного шва $12,5 \cdot 10^{-6}$ м.

В результате проводимых исследований удалось выявить наилучшие условия формирования швов, представленных в виде зависимости средней прочности сварных швов образцов от значения статического усилия прижима свариваемых пластин к сварочному инструменту (рис. 4а).

Также была установлена зависимость прочности шва от времени УЗ воздействия (рис. 4б).



а – зависимость прочности шва от значения статического усилия прижима тонколистовых металлов к сварочному инструменту

б – зависимость прочности шва от значения времени УЗ воздействия

Рис. 4. Зависимости средней прочности сварного шва от основных параметров процесса сварки

Разработанный и практически реализованный стенд для исследования процесса консолидации тонких листов металлов методом ультразвуковой сварки позволил управлять основными параметрами процесса [6,7], такими как усилие прижима металлов к сварочному инструменту, время УЗ воздействия, амплитуда УЗ колебаний.

В результате исследований установлено, что консолидация происходит на локальных участках, не превышающих 70-75 % от площади пластин. Неравномерность сварки, видимо, обусловлена наличием неровностей, неравномерностью амплитуд деформации и сдвига в слоях металлов, приводящих к неравномерным значениям температур и возникновению неравномерной пластичности металлов.

В результате исследований установлено, что максимальная прочность достигает при обеспечении усилия прижима опоры и материалов к сварочному инструменту, равного 300 Н, и обеспечении амплитуды продольных колебаний сварочного инструмента 75 мкм. Время воздействия 2,5 секунды. При этом прочность сварных швов при проведении испытаний на разрыв в среднем составила 470 Н.

Список источников

1. *Khmelev V.N.* Model of process and calculation of energy for a heat generation of a welded joint at ultrasonic welding polymeric thermoplastic materials / V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.D. Abramov // 8th Annual International Workshop and Tutorials on Electron Devices and Materials, EDM'07 - Proceedings, 2007, pp. 316-322.
2. *Khmelev V.N.* Theoretical Investigations of Continuous Ultrasonic Seam Welding of Thermoplastic Polymers and Fabrics / V.N. Khmelev, A.V. Lehr, A.N. Slivin, A.D. Abramov // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010, pp. 341-344.
3. *Slivin A.N.* Investigation of Ultrasonic Surface Treatment of Metals / A.N. Slivin, V.A. Nesterov, S.S. Khmelev, S.S. Khamriteliev / International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2010: Conference Proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010. P. 363-369.
4. Способ измерения амплитуды колебаний: пат. № 2292530 РФ, / Леонов Г.В., Хмелёв В.Н., Абраменко Д.С., Савин И.И., заявл. 14.04.2005
5. *Хмелёв В.Н.* Ультразвуковая сварка термопластичных материалов: монография / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов, С.С. Хмелёв ; под ред. В.Н. Хмелёва. Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2014. 281 с.
6. *Хмелёв В.Н.* Повышение эффективности энергетического воздействия при ультразвуковой сварке / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 3. С. 278-281.
7. *Хмелёв В.Н.* Совершенствование ультразвуковой сварки и создание аппаратов для её реализации / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, А.Д. Абрамов // Известия Томского политехнического университета. 2013. № 4. С. 152-157.

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

05.13.18

¹А.И. Акимов канд. техн. наук, ²И.А. Акимов д-р техн. наук,
²В.А. Урбан канд. техн. наук

¹Филиал Российского Государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина
в г. Оренбурге. Отделение (ЭГ и ЕНД), akimovff11@mail.ru,

²Оренбургский государственный аграрный университет, Институт управления рисками и
комплексной безопасности, кафедра техносферной и информационной безопасности,
Оренбург, akimov_ia@mail.ru, urban.vladimir@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ,
РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА ВТОРОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА
МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ
ПОЛИМЕРИЗАЦИИ**

В работе рассматривается теплообмен в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации в автоклавах. Изделия такой формы широко используются в космической технике авиационной промышленности и в некоторых других отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: многослойная конструкция, полимеризация, сферическая форма, автоклавы, авиационная промышленность, космическая техника, второй этап.

Широкое применение методов математического моделирования в теории теплообмена, термоупругих напряжений и деформаций связано с использованием различных подходов к составлению математических моделей указанных процессов. Большинство проблем, с которыми приходится сталкиваться современному производственнику это возможность описать указанные процессы достаточно общими дифференциальными уравнениями в частных производных. При этом, естественно, реальное физическое явление или процесс и его математическая модель разделяют ряд допущений и упрощений. Чем эти упрощения значительнее. Тем легче проводить теоретический анализ изучаемого явления. Однако в этом случае результаты могут оказаться сравнительно приближением реального процесса. Поэтому возникает необходимость составления наиболее оптимальной математической модели исследуемого технологического процесса и разработки аналитических и численных методов их решения.

В данной работе рассматривается второй этап производства многослойных конструкций сферической формы, методом полимеризации и решение полученных модельных задач методом изотермических поверхностей.

Для решения задачи второго этапа производства потребуются математические модели задач первого и третьего этапов и их аналитические решения.

Рассмотрим математические модели первого и третьего этапов производства и аналитические решения полученных задач (1,2).

Как известно, математическая модель теплообмена в многослойных конструкциях сферической формы на первом этапе производства имеет вид (центральная симметрия) [1]

$$\frac{\partial U_i(r_i, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_i^2 \left(\frac{\partial^2 U_i(r_i, \tau)}{\partial r_i^2} + \frac{2}{r_i} \frac{\partial U_i(r_i, \tau)}{\partial r_i} \right) + \frac{q_i}{C_i \rho_i}; \quad (1)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, N, \quad R_{i-1} \leq r_i \leq R_i, \quad \tau > 0$$

$$\text{с НУ:} \quad U_i(r_i, 0) = f_i(r_i); \quad (2)$$

$$\text{и ГУ:} \quad \lambda_1 \frac{\partial U_i(R_0, \tau)}{\partial r_i} - \alpha_1 [U_1(R_0, \tau) - U_{c1}] = 0 \quad (3)$$

$$\lambda_N \frac{\partial U_N(R_N, \tau)}{\partial r_N} + \alpha_N [U_N(R_N, r) - U_{CN}] = 0 \tag{4}$$

и с условиями сопряжения

$$U_j(r_j, \tau) = U_{j+1}(r_j, \tau); \quad \lambda_j \frac{\partial U_j(R_j, \tau)}{\partial r_j} = \lambda_{j+1} \frac{\partial U_{j+1}(R_j, \tau)}{\partial r_{j+1}} \tag{5}$$

$j=1,2,3,\dots,N-1,$

Аналитическое решение модельной задачи нового этапа имеет вид

$$U_i = A_i + \frac{B_i}{r_i} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_{in} \sin\left(\frac{\mu_n r_i}{a_i} + \varphi_{i,n}\right) \cdot e^{\mu_n^2 \cdot \tau \cdot \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} C_{m,n}}}{0,5 \sum_{m=1}^N \frac{\lambda_m}{a_m^2} \cdot C_{m,n}} \cdot \frac{\int_{R_{m-1}}^{R_m} r_m [f_m(r_m) - A_m \frac{B_m}{r_m}] \sin\left(\frac{\mu_n r_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) dr_m}{\left\{R_m - \frac{a_m}{\mu_n} \left[\sin\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) \cos\left(\frac{\mu_n R_m}{a_m} + \varphi_{m,n}\right) - \sin(\varphi_{m,n}) \cos(\varphi_{m,n})\right]\right\}} \tag{6}$$

Математическая модель теплообмена в полимеризованном слое (центральная симметрия) изделия полый сферической формы имеет вид [2]

$$\frac{\partial U_1(r, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left(\frac{\partial^2 U_1(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U_1(r, \tau)}{\partial r} \right), \tau > 0, \quad R_0 \leq r \leq R_N \tag{7}$$

$$\frac{\partial U_2(r, \tau)}{\partial \tau} = a_i^2 \left(\frac{\partial^2 U_2(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial U_2(r, \tau)}{\partial r} \right), \tau > 0, \quad R_N \leq r \leq +\infty \tag{8}$$

С НУ: $U_1(r, 0) = f(r) = U_1; U_2(r, 0) = U_C;$ (9)

и ГУ: $-\lambda_1 \frac{\partial U_1(R_N, \tau)}{\partial r} = -\lambda_N \frac{\partial U_2(R_N, \tau)}{\partial r};$ (10)

$U_1(R_N, \tau) = U_2(R_N, \tau).$ (11)

Аналитическое решение задачи третьего этапа производства ищется в виде стационарной и нестационарной составляющих:

$$U(r, \tau) = S(r) + P(r, \tau). \tag{12}$$

$$S(r, \tau) = U_1(r, \tau) - \frac{B}{R_0} \left(\frac{\lambda_1}{\alpha_1 R_0} + 1 \right), \tag{13}$$

где $B = \frac{U_{CN} - U_{1N}}{\frac{\lambda_1}{R_N} \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{R_N \alpha_1} \right) - \frac{\lambda_1}{R_0} \left(\frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{R_0 \alpha_1} \right)},$ (14)

$$P(r, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_{1n} \sin\left(\frac{\mu_n r}{a_1} + \varphi_{1,n}\right) \cdot e^{\mu_n^2 \cdot \tau \cdot \frac{\lambda_1}{a_1^2} C_{1,n} \cdot \int_{R_0}^{R_N} r [f(r) - A - \frac{B}{r}] \sin\left(\frac{\mu_n r}{a_1} + \varphi_{1,n}\right) dr}{0,5 \frac{\lambda_1}{a_1^2} C_{1,n}^2 \cdot \left\{ r - \frac{a_1}{\mu_n} \left[\sin\left(\frac{\mu_n r}{a_1} + \varphi_{1,n}\right) \cos\left(\frac{\mu_n r}{a_1} + \varphi_{1,n}\right) - \sin(\varphi_{1,n}) \cos(\varphi_{1,n}) \right] \right\}} \tag{15}$$

Для математического моделирования и решения нестационарной задачи теплообмена на втором этапе производства многослойных конструкций полый сферической формы методом полимеризации использован метод изотермических поверхностей [3]

Сущность метода изотермических поверхностей состоит в замене истинного распределения температуры $U_{k,n}$ внутри каждой области $D_{k,\tau}$ не стационарным, при фиксированных положениях границы $S_{i,\tau} : S_{i,n} = \xi_i(\tau_n), n=1,2,3\dots$

Фиксируя произвольно положения границы $S_{i,\tau} : \xi_i = \xi_{i,n}$, заменяем область непрерывного изменения этой границы дискретным множеством $\{\xi_{i,n}\}$, представляющим возрастающую и ограниченную сверху последовательность.

В областях $D_i, \tau_n = \{0 < r < \xi_{i,n}\}$ находим нестационарное распределение температуры $U_{k,n}(r, \tau)$ и используя их, функцию непрерывного аргумента $\tau = \tau(\xi_i)$ заменяем функцией дискретного аргумента $\tau_i = \tau(\xi_{i,n})$.

Благодаря этому, в непрерывном спектре собственных значений задачи выделяется дискретный спектр. Это позволяет отобрать и нормировать минимальную систему собственных функций в непрерывном спектре в соответствующих областях. Полученные значения $U_{k,n}(r, \tau)$ приближенного удовлетворяют условию задачи при $\tau = \tau_j$ (см.рис.1)

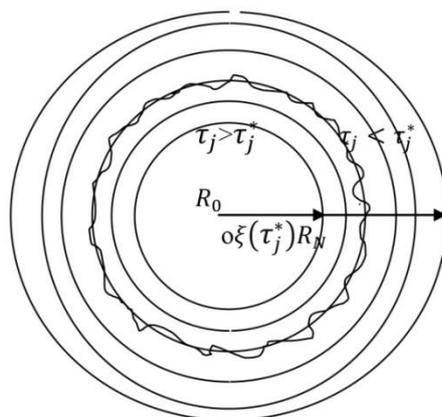


Рис1. Передвижение границы зоны полимеризации в шаровом слое

$$[r^*(\tau_j^*) = \xi(\tau_j^*) = R_N - Vr_j^*]$$

Экспериментально определены для каждого типа связующего скорость V передвижения границы полимеризации. Это позволяет для каждого момента времени τ_j приближенно определить положения границы полимеризации по формуле:

$$r(\tau_j^*) = \xi(\tau_j^*) = R_N - Vr_j^*$$

где τ_j^* - критическое время, соответствующее положению границы полимеризации.

Температура в автоклаве на втором этапе производства композитов соответствует, температуре полимеризации выбранного типа связующего материала, то есть до завершения второго этапа производства остается постоянной.

Сущность метода изотермических поверхностей состоит в том, что непрерывный спектр перемещения границы полимеризации $R_0 \leq r(\tau_j) \leq R_N$, заменяется дискретным множеством $\{r^*(\tau_j^*)\} = \{\xi(\tau_j^*)\}$ (положение границы полимеризации в фиксированные моменты времени τ_j^*). Эти фиксированные неровные линии (рис.1) отмечены концентрическими окружностями.

Таким образом, метод изотермических поверхностей позволяет свести нелинейную задачу нестационарной теплопроводности к двум уже решенным линейным задачам в интервалах $\tau_j^* < r < R_N$ и $R_0 \leq r < \tau_j^*$ по методу конечных интегральных преобразований.

Рассмотрим три положения произвольного времени τ_j и критического времени τ_j^* :

1) $\tau_j < \tau_j^*$; 2) $\tau_j = \tau_j^*$; 3) $\tau_j > \tau_j^*$

При $\tau_j < \tau_j^*$ рассматриваемая область (см. рис 1) совпадает с областью полной полимеризации, следовательно, математическая модель второго этапа процесса совпадает с (7)-(11) и решение задачи имеет вид (12)-(15).

При $\tau_j = \tau_j^*$ значение температуры $U(r^*, \tau_j^*)$ совпадает с температурой интенсивной полимеризации связующего, то есть с температурой второго этапа производства композитов сферической формы.

При $\tau_j > \tau_j^*$ рассматриваемая область совпадает с неполимеризованной многослойной областью (см. рис. 1). Следовательно, математическая модель совпадает с (1)-(5) и задача в этой зоне решается методом конечных интегральных преобразований и имеет вид (6).

Список литературы

1. *И.А. Акимов, В.А. Урбан* «Исследование и разработка математических моделей расчетных формул теплообмена на первом этапе производства многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации». Научно-технический вестник Поволжья 2018г №2.-С.50-54.
2. *И.А. Акимов*. Исследование и разработка математической модели, расчетных формул теплообмена на третьем этапе производства многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации (А. И. Акимов, И. А. Акимов, В. А. Урбан //Научно-технический вестник Поволжья 2018г. №5- с (157-160).
3. *М.Н.Шафеев*, О сходимости метода изотермических поверхностей //ВНИИТИ, №6597-В86, г.Уфа, 1986,- с.12

05.13.00

Г.Ф. Ахмедьянова канд. педагог. наук

Оренбургский государственный университет,
аэрокосмический институт, кафедра управления и информатики в технических системах,
Оренбург, ahmedyanova@bk.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕСУРСОВ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

В работе представлена постановка и решение задачи оптимального распределения ресурсов в организационно-технической системе с целью повышения надежности ее функционирования. Решение проведено с помощью метода Эйлера-Лагранжа. В качестве применения выявленной методики рассмотрена надежность системы дистанционного образования вуза. Показано, что управление надежностью как абстрактным объектом возможно при вложении ресурсов в четыре подсистемы: компьютерного оснащения, программного, методического обеспечения и книгообеспеченности. Распределение управляющих ресурсов проводится между этими компонентами. Сравнение теоретических результатов с практическими доказывает полезность разработанной методики.

Ключевые слова: *оптимальное распределение, управляющие ресурсы, дистанционное обучение, надежность.*

Введение

Одной из основных задач, возникающих при функционировании организационно-технической системы, является оптимальное перераспределение управляющих ресурсов. Именно от ее решения зависит эффективность достижения цели, стоящей перед системой. Для конкретизации проводимого исследования выберем систему дистанционного обучения, находящуюся в русле современных тенденций в образовании. О ее актуальности говорит наличие соответствующих факультетов во всех вузах и существование учреждений только с дистанционным обучением. Под дистанционным обучением понимаются все формы образовательной активности, которые осуществляются без личного контакта учителя и ученика [1].

Одна из широко используемых систем дистанционных образовательных технологий реализуется на базе системы поддержки открытого образования, дистанционного обучения, сертификации, тестирования и аттестации STELLUS. STELLUS — это многофункциональный, построенный на web-технологии, модульный комплекс программного обеспечения для поддержки открытого образования, размещенный в сети Internet [2]. Он позволяет быстро и недорого разрабатывать учебные курсы. В Moodle используются для этого роли администратора, создателя курса, учителя, учителя без права редактировать, студента [3].

Теория

Система дистанционного обучения является организационно-технической. Это означает, что ее надежность обуславливается как надежностью технических элементов, так и надежностью участвующих в процессе обучения людей [4]. Первое, что необходимо выяснить, как понимается надежность такой системы. Будем понимать под надежностью организационно-технической системы устойчивость, регулярность, уровень достижения поставленной перед системой цели. Следовательно, высоконадежная система дистанционного обучения должна обеспечивать качественный процесс обучения, с минимумом отклонений уровня обучения и потерь от неэффективных расходов средств.

Надежность, с точки зрения управления, является абстрактным объектом, по отношению к которому возможно только косвенное управление и оценка его только с точки зрения достигаемого уровня [5]. Надежность включает четыре составляющих: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость. В свою очередь, каждая из этих составляющих так же является абстрактным объектом.

Чтобы организовать косвенное управление абстрактным объектом необходимо, в первую очередь, определить материальный носитель управляемого свойства (качества), выявить факторы воздействия на него и организационно создать оптимальные условия его функционирования. Материальным носителем в системе дистанционного обучения является программно-аппаратное и методическое обеспечение, вузовская библиотека, и главное - обучающийся. Оставляя для дальнейших исследований вопросы надежности обучающегося, делаем вывод, что надежность системы является верхним уровнем отображения состояния четырех компонент (рисунок 1). При этом промежуточными отображениями будут безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

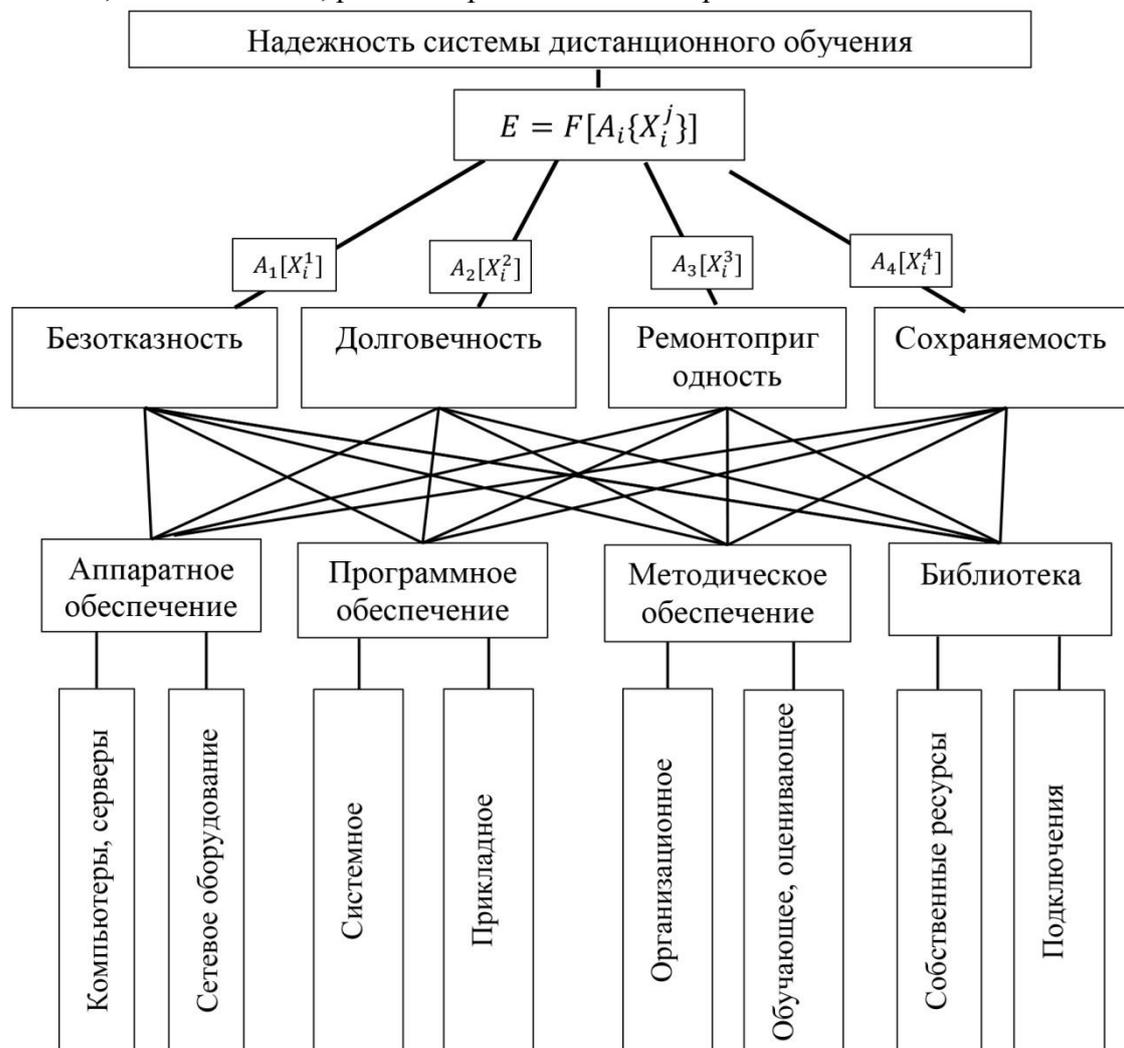


Рисунок1 – Составляющие надежности системы дистанционного обучения

Разберемся с трактовкой этих понятий по отношению к выявленным составляющим. Понятие безотказности применительно к аппаратной части системы является классическим. Несколько сложнее с безотказностью программного обеспечения, хотя по этому вопросу так же есть литература. Наиболее сложно определиться с безотказностью методического обеспечения. Будем здесь понимать его свойство обеспечивать обучающегося всем необходимым материалом, инструментами навигации и оценивания. В случае, когда обучающийся не устраивает приведенный материал, у него может возникнуть желание посмотреть другие учебники – эту потребность должна удовлетворять вузовская библиотека. Безотказность библиотеки в системе дистанционного обучения можно понимать как максимальную книгообеспеченность по изучаемым дисциплинам, с добавлением выходов на дружественные библиотеки в случае необходимости.

Модель и методы

Из рассмотренной теории следует, что для надежности организационно-технической системы необходимо вкладывать ресурсы оптимальным образом [6] в четыре подсистемы. Пусть каждая из них функционирует как m_i резервированных единиц. С другой стороны, поскольку эти подсистемы функционируют параллельно надежность системы дистанционного обучения необходимо определить через вероятность отказа в работе i - й единицы подсистемы ($i=1, 4$) - q_i . Тогда вероятность отказа всей системы:

$$Q(\bar{m}) = \sum_{i=1}^n q_i^{m_i}, \tag{1}$$

где $\bar{m} = \{ m_1, m_2, \dots, m_4 \}$ - вектор состава системы, $n = 4$.

Стоимость ресурсов системы выражается в виде простой линейной зависимости:

$$C = C(\bar{m}) = \sum_{i=1}^n c_i m_i, \tag{2}$$

где c_i - стоимость единицы резерва i -й подсистемы.

Лагранжиан примет вид:

$$F(\bar{m}) = C(\bar{m}) + \varepsilon (Q_{зад} - Q(\bar{m})), \tag{3}$$

где $Q_{зад}$ - заданное значение вероятности отказа. Выразим лагранжиан с учетом (1) и (2):

$$F(\bar{m}) = \sum_{i=1}^n c_i m_i + \varepsilon (Q_{зад} - \sum_{i=1}^n q_i^{m_i}). \tag{4}$$

Для определения вектора состава системы, обеспечивающего экстремум $F(m)$ составляем уравнения Эйлера:

$$\begin{cases} \frac{\partial F(\bar{m})}{\partial m_i} = c_i - \varepsilon q_i^{m_i} \ln q_i = 0 \\ Q_{зад} = \sum_{i=1}^n q_i^{m_i} \end{cases} \tag{5}$$

Из первого уравнения этой системы находим m_i :

$$m_i = \frac{\ln \frac{c_i}{\varepsilon \ln q_i}}{\ln q_i} = \frac{\ln \frac{a_i}{\varepsilon}}{\ln q_i}, \quad \text{где } a_i = \frac{c_i}{\ln q_i}. \tag{6}$$

Находим множитель Лагранжа, подставив m_i во второе уравнение системы (5):

$$Q_{зад} = \sum_{i=1}^n q_i^{m_i} = \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{\varepsilon} = \frac{1}{\varepsilon} \sum_{i=1}^n a_i \tag{7}$$

Откуда выразим ε . В окончательном виде выражение для определения оптимального резерва i -й подсистемы имеет вид:

$$m_i = \frac{\ln \frac{a_i}{\varepsilon}}{\ln q_i} = \frac{\ln a_i - \ln \varepsilon}{\ln q_i} = \frac{\ln a_i - \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i}{Q_{зад}} \right)}{\ln q_i} = \frac{1}{\ln q_i} \ln \left(\frac{a_i \cdot Q_{зад}}{\sum_{i=1}^n a_i} \right) \tag{8}$$

Результаты и обсуждение

Разработанная методика в применении к системе дистанционного обучения в Оренбургском государственном университете дала следующие результаты в процентах (рисунок 2). При расчете принята гипотеза одинаковой вероятности сбоев во всех единицах ресурсов равной 0.01, при общей вероятности отказа 0.05. Из анализа гистограммы следует, что реальное распределение средств не соответствует рекомендуемому теорией, а это означает, что достигается более низкий уровень надежности при имеющихся средствах.

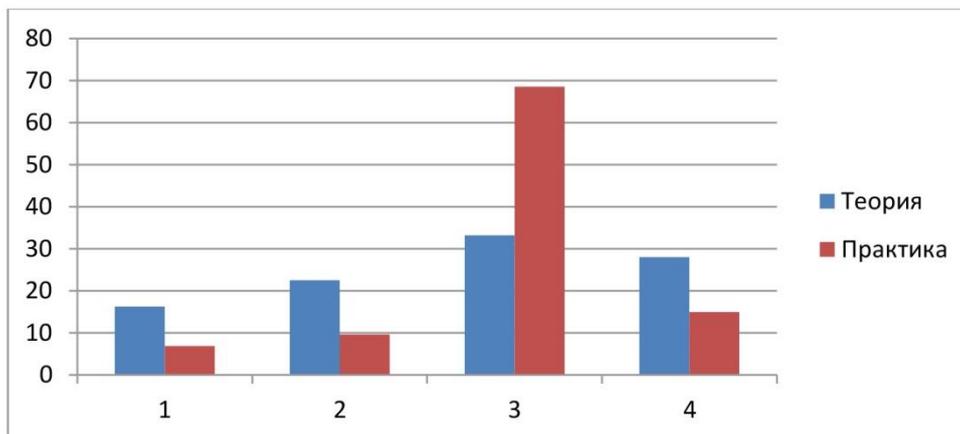


Рис. 2 – Сравнение теории с практикой распределения ресурсов

Заключение

Таким образом, оптимальное распределение управляющих ресурсов в организационно-технической системе позволяет значительно повысить ее эффективность. Применительно к системе дистанционного обучения надежность можно определить как устойчивость, регулярность и уровень достижения поставленной перед ней цели. Следовательно, высоконадежная система дистанционного обучения должна обеспечивать качественный процесс обучения, с минимумом отклонений уровня обучения и потерь от неэффективных расходов средств.

Список литературы

1. *Малинин Ю.В.* Информационные технологии и будущее образования в России // Федеральный справочник. «Связь и массовые коммуникации в России». 2010. — Том № 8. — С. 86–94.
2. *Stellus* — система поддержки открытого образования [Электронный ресурс] / «Стэл — Компьютерные Системы». — Москва, 2015. — Режим доступа: <http://stellus.vzfei.ru/System/Content.asp>
3. *Анисимов А.М.* Работа в системе дистанционного обучения Moodle. Учебное пособие. Харьков, 2009 г. — 292 стр.
4. *Ахмедьянова Г.Ф.* Организация системных взаимосвязей в образовательном процессе // Современные наукоемкие технологии. -2016. -№ 2-2. -С. 284-288.
5. *Ахмедьянова Г.Ф., Пищухин А.М., Пищухина Т.А.* Исследование алгоритмов управления абстрактным объектом // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 4. – С. 34-38.
6. *Пищухин А.М.* Оптимальные методы построения и управления мультиструктурными системами автоматизации технологических процессов и производств на основе вероятностных критериев качества. // Дис.... д-ра техн. наук. Оренбург, 2001, 355 с.

05.13.12

А.В. Бродский канд. техн. наук

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет),
аэрокосмический факультет, кафедра прикладной информатики,
Москва, brodski1954@gmail.com

О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ФОРМАЛЬНО КОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Статья посвящена актуальным вопросам разработки программных компонент САПР аэрокосмической техники. Рассматривается подход, который на основе анализа структурных свойств математической модели проектируемого изделия позволяет выполнить переход от вербального описания исходной задачи оптимизации к ее формальной постановке и провести анализ возможности ее разбиения на подзадачи меньшей трудоемкости. Сформулированы формальные условия выполнения декомпозиции и показаны различные аспекты ее значимости для задач оптимизации.

Ключевые слова: САПР, математическая модель, задача оптимизации, структурные свойства, декомпозиция задачи, вычислительная схема.

Поиск рациональных решений в процессе проектирования изделий аэрокосмической техники (АКТ) обычно выполняется путем моделирования возможных проектных вариантов в среде САПР. Основу такого моделирования составляют, с одной стороны, интегрированные модели, описывающие различные аспекты изделий АКТ и этапов проектирования и представленные в САПР в виде множества программных модулей [1]. А с другой стороны, - пакеты методов, необходимые для численного решения различных задач синтеза и анализа проектных решений в условиях, когда множество заданных ограничений может носить противоречивый характер.

В настоящей работе развивается подход, представленный в [2] для анализа задач оптимизации, к которым могут быть сведены многие задачи, решаемые в процессе проектирования изделий АКТ, и основанный на анализе структурных свойств вычислительной модели проектируемого изделия.

При этом исходное вербальное описание решаемой задачи оптимизации представляется в виде кортежа

$$\mathcal{V} = \langle K, X, Y, Z, \hat{X}, D_Y, D_Z \rangle,$$

где K – критерий;

X – вектор фиксированных параметров;

Y – вектор выбираемых (варьируемых или управляемых) параметров;

Z – вектор ограниченных параметров;

$\hat{X} = \{\hat{X}^1, \hat{X}^2, \dots, \hat{X}^{N_X}\}$ – принятое значение вектора фиксированных параметров, где \hat{X}^i – значение i -й компоненты вектора $X = \{X^1, X^2, \dots, X^{N_X}\}$, N_X – размерность вектора X ;

D_Y – множество рассматриваемых значений варьируемых параметров, которое в силу взаимной независимости этих параметров задается в виде: $D_Y = \prod_{t=1}^{N_Y} [Y^{t_n}, Y^{t_b}]$, где Y^{t_n}, Y^{t_b} – нижняя и верхняя границы, соответственно, рассматриваемых значений t -ой компоненты вектора $Y = \{Y^1, Y^2, \dots, Y^{N_Y}\}$, N_Y – размерность вектора Y ;

D_Z – множество допустимых значений ограниченных параметров $Z = \{Z^1, Z^2, \dots, Z^{N_Z}\}$, задаваемым, как правило, в виде $D_Z = \prod_{t=1}^{N_Z} [Z^{t_n}, Z^{t_b}]$, где Z^{t_n}, Z^{t_b} – определяется аналогично Y^{t_n}, Y^{t_b} , N_Z – размерность вектора Z .

В [3] были рассмотрены вопросы оценки корректности описания задач оптимизации \mathcal{V} и показано, что из формальной корректности решаемой задачи следует, что значения критерия K и переменных из Z для проверки ограничений могут быть вычислены на базе отношений

из полного множества вычислимых отношений Φ^{Π} . Тогда решение, вообще говоря, может быть получено применением некоторого метода оптимизации к множеству отношений Φ^{Π} как единому целому. При этом Φ^{Π} будет рассматриваться как «черный ящик», определяемый своими входами $\{X, Y\}$ и выходами $\{K, Z\}$.

Нецелесообразность такого подхода определяется, во-первых, очевидностью тех преимуществ, которые можно получить, если удастся свести исходную задачу оптимизации к совокупности задач меньшей размерности. Во-вторых, формальная задача оптимизации формируется не на множестве Φ^{Π} , а на определяющем множестве вычислимых отношений $\Phi^{\text{оп}} \subseteq \Phi^{\Pi}$. Другими словами, Φ^{Π} может содержать отношения, исключая которые можно сократить трудоемкость решения исходной задачи.

Приведенные соображения могут быть проиллюстрированы следующим примером. На рис.1 приведен информационный граф некоторой модели (окружности соответствуют отношениям, а прямоугольники - переменным) и множество Φ^{Π} (выделено пунктиром), соответствующее корректной задаче оптимизации в следующей постановке: $K=\{p_{20}\}$, $X=\{p_5, p_7\}$, $Y=\{p_4\}$, $Z=\{p_{12}, p_{19}\}$. Решение может быть получено применением метода оптимизации непосредственно ко всему множеству $\Phi^{\Pi}=\{\varphi_j\}$, $j=1, 2, \dots, 6$. Вместе с тем, отношение φ_6 не нужно для решения исходной задачи (т.е. $\Phi^{\text{оп}}=\{\varphi_j\}$, $j=1, 2, \dots, 5$), а для отношений $\{\varphi_1, \varphi_3, \varphi_4\}$ задачи носят расчетный характер и могут быть отделены от решения задачи оптимизации. Кроме того, отношения $\{\varphi_3, \varphi_4\}$ представляют собой систему, и учет этого факта при решении задачи относительно Φ^{Π} в целом требует присоединения к решаемой задаче дополнительного ограничения $\hat{p}_{k+1} = \hat{p}_k$, где \hat{p}_{k+1} есть результат, полученный для переменной p_9 и $p_{15} = \hat{p}_k$.

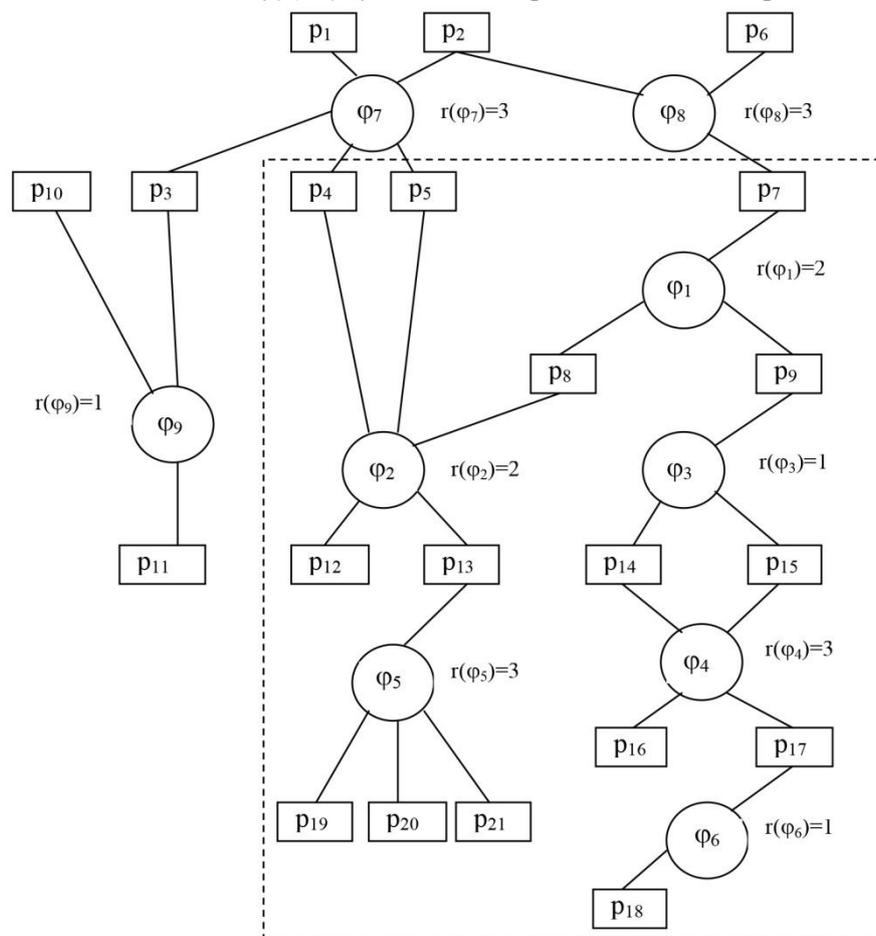


Рис. 1 - Пример полного и определяющего множеств вычислимых отношений

Учитывая все выше сказанное, рассмотрим теперь возможность представления задачи, решаемой на множестве Φ^{Π} , в виде совокупности задач меньшей размерности. Реализация такого представления требуют решения следующих задач:

- разбиения полного множества вычислимых отношений Φ^n на непересекающиеся подмножества, задачи относительно которых корректны, т.е. формирования компонент разбиения $\{L_i\}, i=1,2,\dots,n_w, \bar{L} = \bigcup_1^{n_w} L_i$. При этом в ходе решения путем отделения компонент, не требующихся для вычисления переменных из $\{K,Z\}$, естественным образом происходит формирование определяющего множества вычислимых отношений Φ^n , т.е. завершение формирования формальной задачи оптимизации;

- классификации формальных задач для компонент разбиения $\{L_i\}$, т.е. анализа какие из этих компонент определяют расчетные, а какие оптимизационные задачи и формирования $\{W_i\}, i=1,2,\dots,n_w$;

- увязки процесса решения частных задач, т.е. построения вычислительной схемы как логики взаимодействия задач $\{W_i\}, i=1,2,\dots,n_w$.

Для решения перечисленных задач, аналогично [3], исходными данными выступают компоненты формального описания решаемой задачи оптимизации \mathcal{V} и математическая модель проектируемого изделия, представленная в виде системы неявных отношений $M_2 = \langle \Phi, P, \mathcal{R}, \Omega \rangle$,

где $\Phi = \{\varphi_j\}, j = 1,2,\dots,N$ – множество неявных отношений. Каждому отношению φ_j соответствует явное отношение $\lambda_\psi = \psi(\chi_\psi)$, что формально отражает наличие в САПР программного модуля, связанного с рассматриваемой предметной областью и вычисляющего значения переменных из λ_ψ по известным значениям переменных из χ_ψ ,

$P = \{p_t\}, t = 1,2,\dots,n$ – конечное множество переменных модели, описывающих моделируемый объект,

n, N – число переменных и отношений модели соответственно,

$\mathcal{R} = \{r_j\}, j = 1,2,\dots,N$ – множество рангов отношений из $\Phi, r(\psi) = |\lambda_\psi|$,

$\Omega = \prod_{p_t \in P} \Omega p_t$ – множество допустимых значений переменных, определенное как прямое произведение множеств допустимых значений Ωp_t элементов множества P . А также полученное в результате анализа корректности множество Φ^n .

Операции на модели M_2 определяются тройкой $\langle F, \hat{U}, \hat{V} \rangle$, где F – оператор, порожденный отношением F и реализующий однозначное отображение $\Omega_u \rightarrow \Omega_v, \hat{U}$ – значения входных переменных, \hat{V} – значения выходных переменных оператора. Практически они представляют собой или прямой расчет (1-й тип), или решение системы уравнений (2-й тип).

Далее в настоящей статье рассматривается первая из перечисленных - задача декомпозиции.

Алгоритмически вопросы декомпозиции корректных расчетных задач были разработаны в работах [5,6] на основе концепции вычислительной модели, предложенной Э.Х. Тыгуру [4]. Распространим эти результаты на решение задач оптимизации с учетом их специфики и покажем, что именно для решения задач оптимизации декомпозиция имеет принципиальное значение.

В качестве предпосылки декомпозиции решаемой задачи, как расчетной, так и оптимизационной, выступает возможность представления процесса ее решения в виде схемы последовательных состояний.

Состоянием модели M_2 назовем, аналогично [4], пару (C, \hat{C}) , где $C \subseteq P, \hat{C} \in \Omega$. Будем говорить, что модель находится в состоянии (C, \hat{C}) , если множество переменных C имеет значение \hat{C} , а значения переменных из множества $P \setminus C$ не определены. При этом будем называть C схемой состояния (C, \hat{C}) .

Для каждого состояния (C_i, \hat{C}_i) однозначно определено множество операций, которое может быть применено к данному состоянию:

$$\{ \langle F_i^j, U_i^j, V_i^j \rangle, j=1,2,\dots,k, k \leq n, \hat{U}_i^j \subset \hat{C}_i. \}$$

Применение хотя бы одной операции F_i^j из этого множества приводит к тому, что переменные V_i^j принимают значения \hat{V}_i^j и состояние модели меняется на (C_{i+1}, \hat{C}_{i+1}) , где $C_{i+1} = C_i \cup V_i^j, \hat{U}_i^j, \hat{V}_i^j \subset \hat{C}_{i+1}$.

Здесь под обозначением $\hat{U} \subset \hat{C}$ понимается, что $U \subset C$ и значения переменных из U одинаковы в \hat{U} и \hat{C} . В таком случае будем говорить, что значение \hat{U} содержится в значении \hat{C} . Тогда процесс вычислений на модели M_2 , заключающийся в выполнении операций, будет представлять собой последовательную смену состояний модели: $(C_0, \hat{C}_0), (C_1, \hat{C}_1), \dots, (C_s, \hat{C}_s)$.

Будем обозначать через $\Phi_i = \Phi(C_i)$ множество всех отношений, выполнение операций над которыми переводит модель из i -го состояния в $i+1$ -ое: $\Phi_i = \{\varphi_l, \varphi_l \subseteq F_i^j\}, j=1, 2, \dots, k, \hat{U}_i^j \subset \hat{C}_i, \hat{V}_i^j \subset \hat{C}_{i+1}, \Phi_i \subset \Phi$.

Начальное состояние (C_0, \hat{C}_0) и вычислительная схема $\Phi_0, \Phi_1, \dots, \Phi_s$ определяют конечное состояние (C_{s+1}, \hat{C}_{s+1}) вычислительного процесса.

Таким образом Φ^n представляет собой множество отношений, которые могут входить в вычислительные процессы с начальной схемой состояния $I = \{X, Y\}$, а $\mathfrak{a}^n(I) = \bigcup_{i=0}^s \bigcup_{j=1}^k V_i^j$ – объединение всех расширений схемы состояния I . Корректность решаемой задачи в данном случае означает, что существует вычислительная схема $\{\Phi_i\}, i=0, 1, \dots, q, q \leq s$, которая переводит модель из состояния (C_0, \hat{C}_0) в состояние (C_{q+1}, \hat{C}_{q+1}) , такая, что $C_0 = I, \hat{C}_0 = \hat{I}, \{K, Z\} \subseteq C_{q+1}$.

Тогда, обозначая $V(\Phi(C_i)) = \bigcup_{j=1}^k V_i^j$ и учитывая $V(\Phi(C_i)) = \mathfrak{a}^n(C_i)$, получаем, что $\Phi(C_i) = \Phi^{op}(C_i, V(\Phi(C_i)))$. Так как $\Phi_i \cap \Phi_j = \emptyset \forall i, j = 0, \dots, s; i \neq j$, то множества Φ_i выступают в качестве компонент декомпозиции, а операции, обеспечивающие переход из состояния в состояние – в качестве частных задач относительно этих компонент. При этом Φ_i может представлять собой как отдельное отношение, так и множество отношений, если они могут быть разрешены только совместно.

Пусть $\Phi_i = \{\varphi_j, \varphi_j \in \Phi\}$, т.е. операция над отношениями из Φ_i переводит модель из состояния (C_i, \hat{C}_i) в состояние (C_{i+1}, \hat{C}_{i+1}) . Обозначим $L_i = \{j: \varphi_j \in \Phi_i\}$ и рассмотрим функцию дефицита $d(L_i, C_i) = \sum_{j \in L_i} r_j - |P(L_i) \setminus C_i| = |\bigcup_{j \in L_i} \lambda_j| - |P(L_i) \setminus C_i| = |\bigcup_{j \in L_i} P_j \setminus x_{L_i}| - |P(L_i) \setminus C_i| = |P(L_i)| - |x_{L_i}| - |P(L_i)| + |P(L_i) \cap C_i| = |P(L_i) \cap C_i| - |x_{L_i}|$.

Операция $\langle \Phi_i, P(\bar{L}_i) \cap C_i, C_{i+1} \setminus C_i \rangle$ выполнима тогда и только тогда, когда L_i замкнуто. И таким образом, если на $\bar{L} = \{j: \varphi_j \in \Phi\}$ можно выделить систему, замкнутую относительно подмножества переменных из I , то Φ^n разложимо и возможно решение исходной задачи по частям.

Система уравнений $\{\varphi_j\}, j \in L_{min}, L_{min} \subseteq L$, замкнутая относительно некоторого множества переменных S , называется минимальной замкнутой, если ни одно из подмножеств L_{min} не замкнуто относительно S , т.е. $\forall L' \subset L_{min} \Rightarrow \sum_{j \in L'} r_j - |P(L') \setminus S| < 0$.

Таким образом, цель декомпозиции заключается в разбиении Φ^n на минимальные замкнутые системы. Исходя из этого, сформируем условия получения разбиения $\{L_i\}$ для множества \bar{L} следующим образом:

$$d(L_i, \text{IUP}(U_1^{i-1} L_t)) = 0, d(L', \text{IUP}(U_1^{i-1} L_t)) < 0 \quad \forall i, L' \subset L_i, \quad (*)$$

где $L_i = \{j\}, j \in \bar{L}, \bar{L} = \bigcup_i L_i, L_t \cap L_q = \emptyset \quad \forall t, q \in \bar{L}, t \neq q$.

Пусть для модели на рис.2 задача оптимизации сформулирована в следующем виде: $K = \{p_7\}, X = \{p_1\}, Y = \{p_6\}, Z = \emptyset$. Для нее $\Phi^n = \Phi$, максимальное разбиение состоит из одной компоненты $\{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4\}$ и таким образом необходимо решать задачу сразу относительно всей системы отношений.

Теперь пусть $X = \{p_2\}$. Применяя условия (*), получаем, что максимальное разбиение имеет вид $\{\varphi_2\}, \{\varphi_3\}, \{\varphi_4\}, \{\varphi_1\}$, а процесс решения исходной задачи состоит из последовательного решения четырех задач относительно каждой компоненты разбиения.

Как видно из примера, даже небольшое отличие исходной задачи позволяет разбить ее на отдельные компоненты и перейти к решению задач меньшей размерности относительно этих компонент.

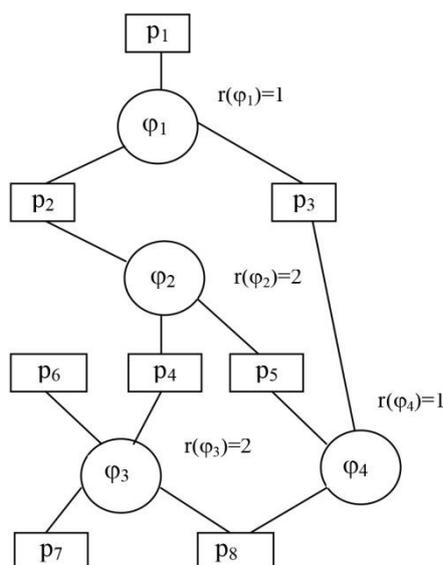


Рис. 2 - Информационный граф модели с вариантами декомпозиции

Разбиение $\{L_i\}$ замкнутой относительно I задачи называется блочно-треугольным, если $d(U_1^i L_t, I) = 0$ для всех i . Из аддитивности функции дефицита следует, что разбиение, удовлетворяющее (*), является блочно-треугольным. В [5] показано, что для замкнутой системы всегда можно построить максимальное блочно-треугольное разбиение. При этом оно единственно с точностью до перестановки компонент, не противоречащей их частичному упорядочению.

Таким образом, решение задачи декомпозиции сводится к построению максимального блочно-треугольного разбиения \bar{L} . Если полученное максимальное разбиение имеет треугольный вид, это означает, что решение может быть получено последовательным разрешением отдельных отношений, т.е. соответствующих им программных модулей. Присутствие среди компонент блочно-треугольного разбиения системы отношений соответствует существованию цикла в структуре модели. Обратное, вообще говоря, неверно, т.е. циклическая структура модели не для всякой задачи приводит к необходимости разрешения отношений как системы уравнений.

Результаты, полученные в [5,6], позволяют производить декомпозицию корректных расчетных задач на моделях произвольной структуры. Их применение к моделям циклической структуры приводит к выделению систем уравнений, для решения которых не существует средств в рамках обеспечения расчетных задач. Вместе с тем декомпозиция расчетных задач на моделях ациклической структуры направлена на организацию вычислений, т.е. определение их последовательности, а не на представление исходной задачи в виде совокупности частных задач. Это связано с тем, что при отсутствии систем уравнений для решения расчетных задач безразлично осуществляется ли оно относительно некоторого множества отношений в целом или последовательно для его подмножеств, т.к. в любом случае каждый программный модуль выполняется только один раз.

В то же время, вопросы декомпозиции исходной задачи имеют принципиальное значение при решении задач оптимизации. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что решение задачи оптимизации представляет собой итерационный процесс, т.е. обработка одних и тех же отношений осуществляется многократно. Поэтому возможность вынести что-либо из цикла итераций и снизить размерность решаемых задач значительно влияет на эффективность и трудоемкость решения задачи в целом.

Во-вторых, только на основе декомпозиции может быть осуществлено целенаправленное изменение некорректных исходных задач. Различные варианты корректировки, не отличающиеся в своей практической постановке, могут приводить к корректным задачам существенно различной трудоемкости. Их сравнение в большинстве случаев может быть осуществлено только на основе оценки частных задач после декомпозиции исходных задач, соответствующих сравниваемым вариантам корректировки.

Список литературы

1. *Падалко С.Н.* Определение тандемной модели как базовой формы представления многоуровневых математических моделей при проектировании аэрокосмической техники. Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск №71 от 26.12.2013
2. *Бродский А.В.* Автоматизация решения задач оптимизации при проектировании аэрокосмической техники. Электронный журнал «Труды МАИ», Выпуск №71 от 26.12.2013
3. *Бродский А.В.* Формализация понятия корректности постановки задачи оптимизации при автоматизированном проектировании аэрокосмической техники. Научно-технический вестник Поволжья, 2014, №5, с.123-126
4. *Тыугу Э.Х.* Решение задач на вычислительных моделях. Журнал вычислительной математики и математической физики, 1970, т.10, №3, с.716-733
5. *Карзанов А.В.* О нахождении максимального потока в сетях специального вида и некоторых приложениях. - В кн.: Математические вопросы управления производством. - М.: МГУ, 1973, вып.5, с.81-86
6. *Карзанов А.В., Фараджев И.А.* Планирование вычислений при решении задач на вычислительных моделях. - Программирование, 1975, №4, с.19-24

05.13.00

И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова д-р техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет
Пермь, d.i.994@yandex.ru trufanova@pstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ РОТАЦИОННОГО РЕОМЕТРА

В работе проведено лабораторное исследование процесса вулканизации резиновой смеси на ротационном реометре. В результате серии экспериментов были получены зависимости модуля накопления от температуры и времени вулканизации. По результатам эксперимента были получены зависимости степени сшивки и скорости производства кабеля с резиновой изоляцией от времени и температуры.

Ключевые слова: *резина; вулканизация; степень вулканизации; время вулканизации; реометр.*

Вулканизация – один из главных этапов в технологии производства кабельно-проводниковых изделий с резиновой изоляцией. В процессе вулканизации в резиновой смеси образуются поперечные межмолекулярные связи, которые приводят к улучшению прочностных, диэлектрических характеристик и химической стойкости изделия.

Для оценки качества вулканизации используется такой параметр, как степень вулканизации, который определяется отношением числа сшитых молекул к числу молекул, которые могли бы сшиться.

На степень вулканизации влияет ряд технологических параметров: температура среды вулканизации, ее теплофизические параметры, скорость производства, толщина и рецептура изоляционного слоя.

Исследованию вулканизации и ее химической кинетики посвящено множество научных работ, как отечественных, так и зарубежных.

В работе [1] описывается стандартная методика определения параметров вулканизации для резиновых смесей на безроторных реометрах, которая позволяет определять время вулканизации, по зависимости величины крутящего момента от температуры и времени.

Оценке кинетических процессов при вулканизации посвящено исследование [2]. Рассмотрению протекания процесса вулканизации внутри массивных изделий посвящена статья [3]. Численному моделированию процесса вулканизации посвящены работы [4-5]

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процесса вулканизации и построение временной и температурной зависимостей степени вулканизации.

Для проведения лабораторного эксперимента был выбран метод оценки модуля накопления материала в зависимости от температуры, аналогично стандартной методике [1]. Серия опытов проводилась на реометрическом оборудовании Discovery Hybrid Rheometer (DHR-2).

Исследуемые образцы имели следующие параметры:

Материал - вальцованная резина марки ТСШ-33, толщиной ~2мм и диаметром 25мм.

Подготовленный образец в виде диска помещался между двумя рабочими плоскостями реометра, которые имели диаметр 25мм. Плоскости нагревались до температуры 80°C, затем плавно сжимались до заданного (1 мм) зазора между ними с усилием не более 40Н. Избыток материала удалялся.

Далее образец нагревался до определенной температуры вулканизации (150, 160, 170, 180, 190) °С. К образцу прикладывалась осциллирующая нагрузка с частотой 10 Гц.

Эксперимент завершался после того, как было достигнуто максимальное значение модуля накопления.

По завершению цикла испытаний было получено семейство кривых $G=f(t, T)$ зависимостей модуля накопления (G) от времени (t) и температуры (T) (рис. 1).

Для получения температурно-временной зависимости степени сшивки было принято, что минимум модуля соответствует началу процесса вулканизации и 0% сшитых молекул, а максимум соответствует – степени вулканизации 100%.

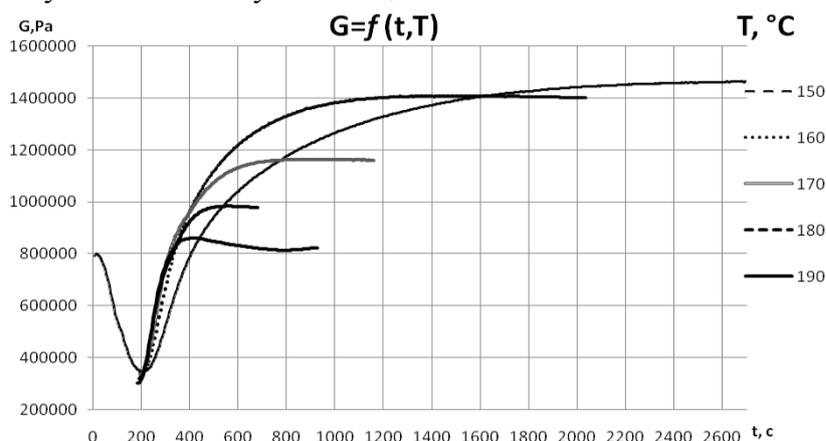


Рис. 1-Зависимость модуля накопления от времени вулканизации при определенной температуре

Как видно из рис. 1, начало вулканизации соответствует моменту времени около 200с после начала эксперимента и достижению образцом температуры порядка 140 °С - это температура начала распада перекиси дикумила - катализатора вулканизации.

Для кривой, соответствующей температуре $T=190^{\circ}\text{C}$, характерно наличие максимума величины модуля накопления. Это может быть обусловлено процессами термодеструкции компонентов резиновой смеси.

Для образцов, подвергавшихся вулканизации при температурах ниже 190°C за время эксперимента такого эффекта не наблюдалась.

По результатам эксперимента можно определить время вулканизации образца при заданной температуре: в момент времени, когда модуль минимален, степень вулканизации принимаем 0%, а 100%, когда модуль принимает максимальное значение.

Тогда время вулканизации $t_{\text{вулк.}}$ образца определяется как разница времен при 100% и 0% сшивки.

$$t_{\text{вулк.}} = t_{100\%} - t_{0\%} \quad (1)$$

Для определения скорости изолирования кабелей найдем отношение длины вулканизационной линии $L_{\text{ТР}}$ к времени вулканизации.

$$v = L_{\text{ТР}} / t_{\text{вулк}} \quad (2)$$

Результаты расчета приведены в таблице 1, где можно видеть, что с ростом температуры значительно снижается время вулканизации (при увеличении температуры на 10°C время вулканизации снижается примерно в 1,66 раза в диапазоне температур $160-190^{\circ}\text{C}$).

С помощью полученных зависимостей можно определять важный технологический параметр – скорость изолирования.

Величины времени вулканизации и значения скорости изолирования при $\varphi_{t.T_e}=100\%$ приведены в таблице 1 и графически представлены на рис.2.

Таблица 1 – Параметры вулканизации в зависимости от температуры.

Температура, °С	$t_{0\%}$, с	$t_{100\%}$, с	$t_{\text{вулк.}}$, с	$t_{\text{вулк.}}$, мин	V , м/мин
150	206	2600	2394	39.90	2.08
160	194	1200	1006	16.77	4.95
170	194	800	606	10.10	8.22
180	188	550	362	6.03	13.76
190	181	400	219	3.65	22.74

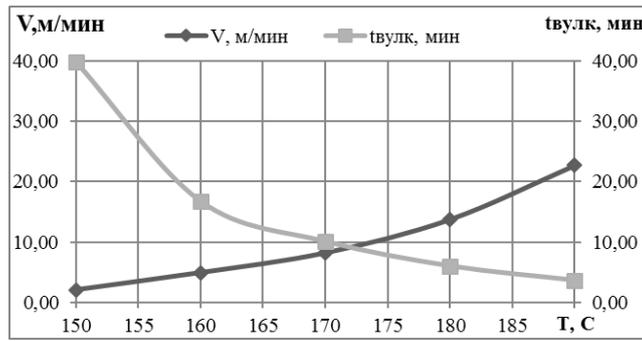


Рис.2 – Зависимость времени вулканизации и скорости изолирования от температуры.

Степень вулканизации (сшивки) φ_{t,T_e} в зависимости от температуры T_B и времени определялась как:

$$\varphi_{t,T_e} = \frac{G_{t,T_e} - G_{MIN.T_e}}{G_{MAX.T_e} - G_{MIN.T_e}} \cdot 100\% \quad (3),$$

где, G_{t,T_e} - текущее значение модуля накопления [Па] ; $G_{MAX.T_e}$ -максимальное значение модуля при температуре T_B ; $G_{MIN.T_e}$ - минимальное значение модуля накопления.

Таким образом на рис. 3,а приведены зависимости степени сшивки от времени для образцов, выдержанных при различных значениях температуры.

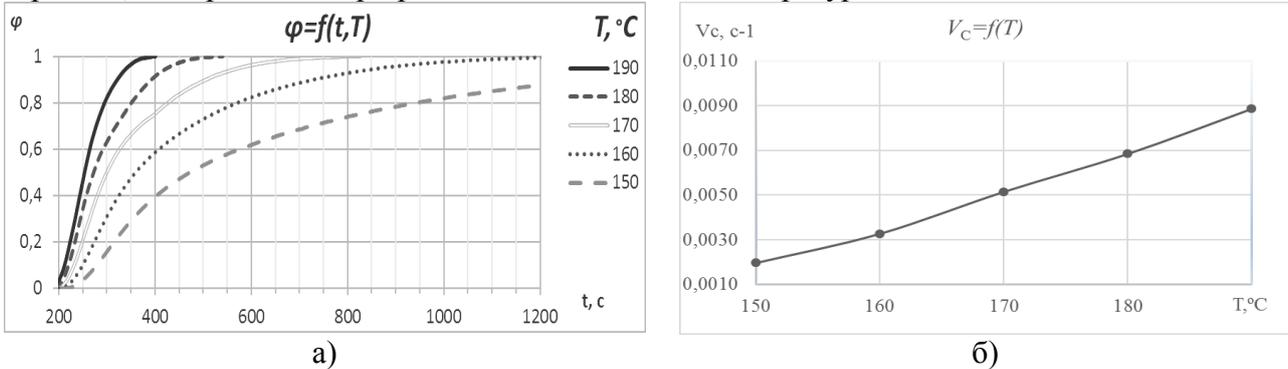


Рис. 3 – Зависимости: а) степени сшивки от времени и температуры, б) скорости сшивки от температуры вулканизации.

По кривым вулканизации (рис. 3,а) можно оценить влияние температуры на скорость сшивки (отношение приращения степени сшивки к временному промежутку)

Температурные зависимости степени сшивки имеют линейные участки, где скорость вулканизации постоянна. Так, при температуре 190 °С скорость сшивки неизменна и составляет 0,0089 с⁻¹ до момента достижения степени вулканизации величины равной 0,7; при температуре 180 °С до величины 0,5 при скорости 0,0068 с⁻¹. Из рисунка 3,а можно видеть, что чем меньше температура вулканизации, тем меньше скорость сшивки и больше временной участок, в пределах которого скорость сшивки постоянна.

Зависимость скорости сшивки V_C от температуры представлена на рис.3,б. Можно заметить, что зависимость носит линейный характер, скорость сшивки меняется приблизительно на 0,002с⁻¹ при изменении температуры на 10°С.

Таким образом, по результатам экспериментального исследования можно:

- 1) Определить время и степень вулканизации для образцов резиновой смеси при разных температурных режимах.
- 2) Прогнозировать степень вулканизации готового изделия, если имеются данные о технологическом процессе.

Список литературы

1. ГОСТР54547-2011. Смеси резиновые. определение вулканизационных характеристик с использованием безроторных реометров.
2. *Ключников Я. О., Ключников О. Р., Макаров Т. В., Вольфсон С. И.* / Кинетика и механизм вулканизации бутадиен-нитрильного каучука пара-динитрозобензолом // Вестник Казанского технологического университета 2011 № 15 с. 107-110
3. *В. И. Молчанов, О. В. Карманова, С. Г. Тихомиров, Ю. В. Пятаков, А. В. Касперович* /Моделирование кинетики неизотермической вулканизации массивных резиновых изделий// Труды БГТУ 2014 №4. Химия, технология органических веществ и биотехнология.
4. *Мамбетова Е.А., Труфанова Н.М.* Математическое моделирование температурных полей и степени вулканизации в процессе вулканизации типичных кабельных изделий // «Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления». 2012. №6. С.152 – 158.
5. *Mohammad-Reza Erfanian, Morteza Anbarsooz, Mohammad Moghiman* / Three dimensional simulation of a rubber curing process considering variable order of reaction / Applied Mathematical Modelling (2016) 1–13

05.13.18

Д.К. Егорова канд. физ.-мат. наук, Д.М. Плодухин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, факультет математики и информационных технологий, кафедра прикладной математики, дифференциальных уравнений и теоретической механики, Саранск, egorovadk@mail.ru, dploduhin96@gmail.com

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ

В работе приведена реализация параллельного алгоритма обработки многомерных данных – метода главных компонент. Метод реализован в среде Microsoft Visual Studio 2015 с использованием технологии OpenMP. Приведена оценка ускорения и эффективности алгоритма.

Ключевые слова: *снижение размерности, метод главных компонент, OpenMP, ускорение, эффективность.*

Введение

В свете неуклонного роста объемов обрабатываемой информации, известного как феномен BIG DATA, анализ многомерных данных представляет собой одно из наиболее востребованных междисциплинарных областей науки. Важнейшим направлением здесь является задача снижения размерности многомерного признакового пространства, для решения которой, на сегодняшний день, существует множество методов и алгоритмов [1-2]. Однако, наряду с сохранением структуры и информативности данных, при переходе к пространству меньшей размерности, важна задача минимизации количества времени, затраченного на их обработку. Параллельное программирование позволяет разделять вычисления между параллельными процессами, на каждом из которых может обрабатываться только часть данных или инструкций, что может ускорить обработку данных в несколько раз. В работе, в качестве метода снижения размерности, был выбран метод главных компонент. Для программной реализации метода использовались следующие средства:

– в качестве языка программирования выбран C++, как язык с высокой вычислительной производительностью, дающий возможность программисту самостоятельно контролировать аспекты структуры программы и порядок ее исполнения;

– для распараллеливания алгоритма выбрана технология OpenMP.

Выбор технологии OpenMP обусловлен следующими факторами:

1. по сравнению с OpenMP в MPI могут возникать сложности, связанные с выражением многоуровневого параллелизма, дублированием данных, используемых разными процессами, затратами дополнительной памяти, в то время как OpenMP лучше работает с мелкозернистым параллелизмом (благодаря модели общей памяти), имеет меньшую латентность доступа к данным, исключает дублирование данных, используемых разными потоками, также OpenMP-программы лучше оптимизируются современными компиляторами; [3-4]

2. в сравнении с CUDA, OpenMP исключает привязку к определенному графическому оборудованию, что делает данный стандарт более кроссплатформенным, удобным и универсальным. [5]

Алгоритм

Метод главных компонент один из широко известных методов снижения размерности, обладающий высокой степенью сохранения информативности преобразованных данных. Нахождение главных компонент сводится к вычислению собственных значений и собственных векторов матрицы ковариации исходных данных, что также не является тривиальной задачей. Алгоритм его программной реализации представлен далее:

1. Запись данных из заранее готового или сгенерированного файла в матрицу x (размерность $\text{dim} \times n$, где dim – количество объектов, n – число характеристик объектов). Перезапись матрицы x не осуществляется (readonly), программа работает с копией матрицы x_temp .

2. Центрирование и нормирование переменных в матрице x_temp .

3. Объявление переменной cov – матрицы ковариации матрицы x_temp .

4. Поиск собственных векторов ковариационной матрицы методом Левенштейна-Фадеева.

4.1. Объявление первого приближения матрицы A (присвоение значений из полученной матрицы ковариации).

4.2. Запись коэффициентов характеристического полинома в массив p , как $p_n = \frac{SpA_n}{n}$, где SpA_n – след матрицы.

4.3. Вычисление матрицы B , как $B_n = A_n - p_n E$ и запись первых столбцов матриц в матрицу b .

4.4. Получение коэффициентов характеристического полинома и нахождение всех собственных значений с помощью метода Ньютона с записью в массив $lmbd$ (сортируя по убыванию).

4.5. Вычисление собственных векторов по рекуррентной формуле

$$\vec{y}_0 = \vec{e}, \vec{y}_k = \lambda_i \vec{y}_{k-1} + \vec{b}_k.$$

Таким образом, собственный вектор \vec{l}_i матрицы A , отвечающий собственному значению λ_i , есть $\vec{l}_i = \vec{y}_{n-1}$.

5. Нормализация полученных собственных векторов путем деления на норму, и запись в матрицу перехода I . Количество столбцов данной матрицы задается изначально (p') – это и будет число необходимых главных компонент. Оценка количества главных компонент производится исходя из расчета доли дисперсии

$$I_{p'} = \frac{\lambda_1 + \dots + \lambda_{p'}}{\lambda_1 + \dots + \lambda_p}.$$

6. Объявление матрицы главных компонент z , получаемой умножением исходной матрицы x на матрицу перехода I .

Особенность данного алгоритма заключается в том, что большинство его ключевых частей (реализация метода Левенштейна-Фадеева, метод Ньютона) последовательные, так как все последующие итерации в этих методах, требуют значений результатов предыдущих итераций. Это налагает определенную специфику на распараллеливание алгоритма. Распараллелить остается возможным только матричные и векторные операции. В виду особенностей стандарта OpenMP, на небольших наборах данных скорость работы будет уменьшаться из-за необходимости обмена данными между потоками и барьерной синхронизации, однако работа с большими наборами данных демонстрирует положительные показатели ускорения и эффективности параллельного алгоритма.

Результаты

Тесты проводились на 2, 3 и 4 потоках, для удобства и наглядности число объектов было равно числу признаков (размерности). Результаты приведены в таблицах и рисунках 1-2.

Таблица 1

	10	50	100	200
2	0,544023949	0,983830493	1,190968528	1,752544629
3	0,394784673	0,845151632	1,146383943	1,608552074
4	0,253798413	0,836971077	1,136482541	1,759583962

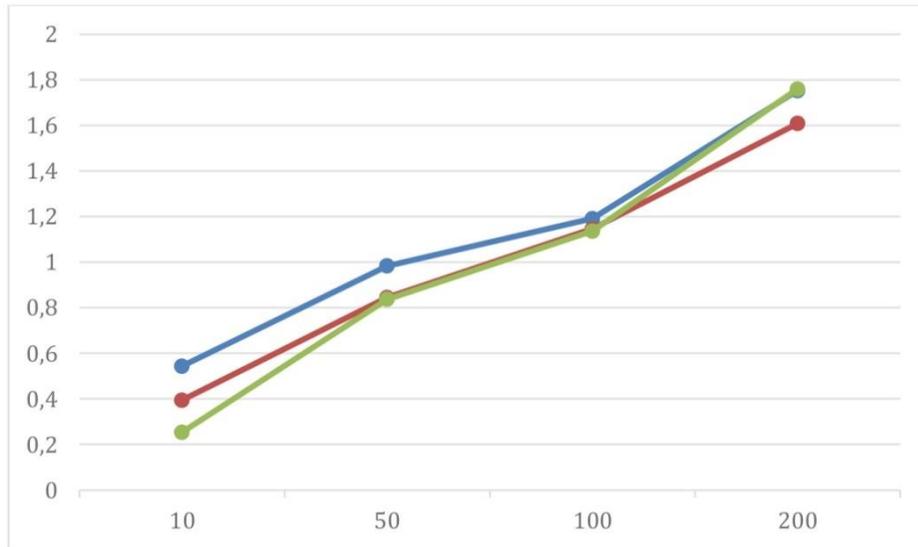


Рис. 1 – Зависимость ускорения от размерности

На оси абсцисс отложена размерность данных, на оси ординат – ускорение. При росте размерности ускорение растет. Ускорение становится положительным (>1) только когда размерность превышает некоторое значение (50–100). При росте числа потоков ускорение незначительно уменьшается.

Таблица 2

	10	50	100	200
2	0,272011974	0,491915247	0,595484264	0,876272314
3	0,131594891	0,281717211	0,382127981	0,536184025
4	0,063449603	0,209242769	0,284120635	0,43989599

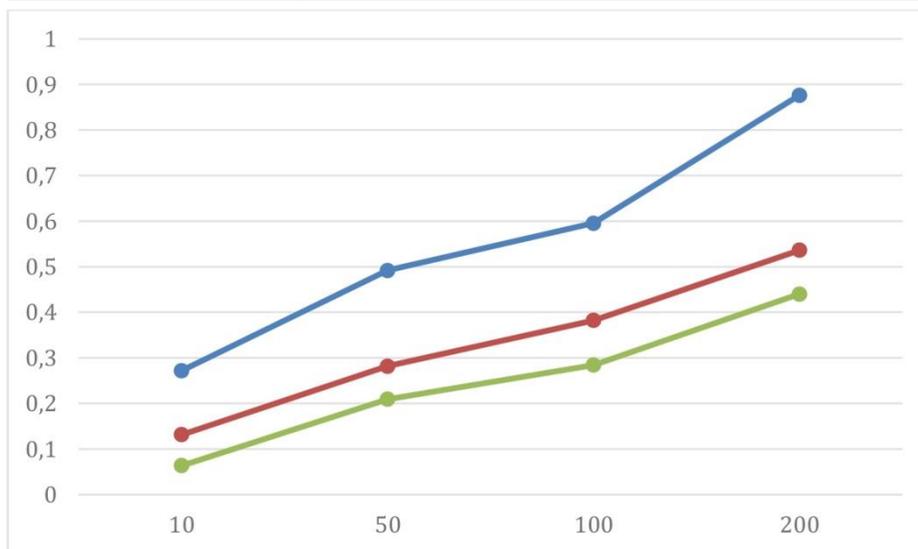


Рис. 2 – Зависимость эффективности от размерности

На оси абсцисс отложена размерность данных, на оси ординат – эффективность. При росте размерности эффективность растет. Выполнение алгоритма становится эффективным (стремится к единице) только когда размерность достаточно велика. При росте числа потоков эффективность снижается.

Выводы

Проведение тестов показало, что положительное ускорение наблюдается только при серьезном увеличении размерности (>100), но увеличение числа потоков значительных приростов по скорости не дает. Это может быть связано с необходимостью барьерной синхронизации большего числа потоков после каждого параллельного цикла, затратами времени на обращение к общей памяти и межпотокое взаимодействие.

Тем не менее, благодаря распараллеливанию, суммарное время работы алгоритма было уменьшено в несколько раз, следовательно, данное направление в развитии инструментария работы с BIG DATA может быть перспективно.

Список литературы

1. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: справ. изд. / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин; Под редакцией С.А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989 – 609 с.
2. Мюллер Ч. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Ч. Мюллер, Дж. Ким и др. – М.: Финансы и статистика, 1989 – 216 с.
3. Официальный сайт OpenMP Architecture Review Board [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.openmp.org/>
4. MPI Forum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mpi-forum.org/>
5. CUDA Zone – официальный сайт CUDA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://developer.nvidia.com/cuda-zone>

05.13.01

А.В. Иляхинский

Институт проблем машиностроения РАН филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук"
Нижний Новгород, ilyahinsky-aleks@bk.ru

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИРИХЛЕ КАК СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РЫНКА ЦЕННЫХ БУМАГ

На примере анализа состояния рынка ценных бумаг показана возможность применения распределения Дирихле в качестве модели процессов определяющих состояние сложных систем. Такое представление позволяет рассматривать моделируемую систему как единое целое, что значительно повышает эффективность управления с целью достижения поставленных целей.

Ключевые слова: системный анализ, функция плотности вероятности, распределение Дирихле, энтропия, финансовый рынок, котировки акций.

Подавляющее большинство искусственных сложных систем таких, например, как рынок ценных бумаг (биржа) в силу их сложности, не могут быть смоделированы или описаны при помощи каких-либо адекватных методов с достаточной точностью. Однако их исследование может быть выполнено посредством иного подхода, основанного на наблюдении за их поведением. Высшими достижениями таких представлений стали удостоенные в 1990 году нобелевской премии по экономике за вклад в теорию ценообразования финансовых активов работы У. Шарпа (САРМ модель) и удостоенные в 1997 году нобелевской премии по экономике работы Блэйка-Шоулза и Мэртона, позволяющие точно рассчитывать справедливую цену опционов европейского типа на акции. Одной из главных причин новых исследований поведения финансовых рынков стала серия катастроф, разорившая множество банков и инвестиционных фондов, в том числе и знаменитый LTCM, активно использовавший идеи Блэйка-Шоулза. Именно с кризисом классической теории связано возрождение в последние десятилетия интереса к анализу экономических явлений. Теория хаоса является одним из самых модных подходов к исследованию рынка. Книги Эдгара Петерса [1,2] являются наиболее цитируемыми работами в публикациях авторов, пишущих о различных аспектах в экономических исследованиях. Анализ временных рядов занимает в этих работах особое место, т.к. авторы хотят выявить, каким образом нелинейное и хаотическое поведение возникает и как изменяется во времени. Однако, используемые методы математической обработки временных рядов в основном анализируют события (параметры временного ряда), а не состояния анализируемой системы. Переход от анализа параметров к анализу состояний можно осуществить, если представить процессы определяющие состояние исследуемой системы статистической моделью (образом) в виде распределения вероятностей. При этом выбор распределения вероятностей должен основываться на механизме изучаемого явления. Модель должна быть информационно эквивалентной объекту исследования и в максимальной степени удовлетворять формальной связи между равновесной и неравновесной термодинамикой, поскольку даже в простейших случаях любые процессы направлены к достижению состояния равновесия.

Было показано [3,4], что, если состояние объекта отражает результат совместной реализации $n-1$ независимых процессов x_j , протекающих со скоростями (интенсивностями) v_j и противоположного им по смыслу процесса, протекающего со скоростью v_n , то статистическая модель, информационно эквивалентная объекту любой природы и степени сложности, может быть представлена распределением Дирихле. Функция плотности вероятности этого распределения, определенная на k -мерном симплексе, равна

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1}.$$

Здесь $0 \leq \sum x_i \leq 1$; $v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0$; $\sum v_j = \alpha_n$; $n = k + 1$.

Модель удовлетворяет формальной связи между равновесной и неравновесной термодинамикой и соответствует основным положениям предложенной лауреатом нобелевской премии Ильей Пригожиным теории диссипативных структур [5]. Энтропия распределения Дирихле может быть представлена в виде суммы

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n)$$

в которой слагаемое

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1)\psi(v_i)$$

представляет собой отвечающее второму закону термодинамики производство энтропии, а слагаемое

$$H_e(a_n) = -\ln \Gamma(a_n) + (a_n - n)\psi(a_n)$$

соответствует отвечающему за процессы взаимодействия с внешней средой потоку энтропии, который может принимать как положительные так и отрицательные значения.

В качестве численной оценки степени самоорганизации анализируемых систем нами выбрано отношение

$$A_k = \frac{\sum K_{D-}^i}{\sum K_{D+}^i},$$

где $\sum K_{D-}^i$ - суммарное количество выявленных за анализируемый период во временном ряде упругой волны двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих отрицательное значение внешней энтропии, а $\sum K_{D+}^i$ - суммарное количество выявленных за анализируемый период двухмерных, трехмерных, четырехмерных, пятимерных и т.д. моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

Для того чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого метода оценки состояния экономических систем приводим результаты оценки трех компаний розничной торговли.:

- Wal-Mart Stores, Inc, лидера мировой торговли, действующей под торговой маркой Walmart и возглавляющей мировой рейтинг Global Powers of Retailing 2013 года (WMT).
- Target Corporation управляющей сетью магазинов розничной торговли Target и SuperTarget в US, Канаде и Австралии (TGT).
- J. C. Penney Company, Inc представленную 1107 универмагами во всех пятидесяти штатах US (JCP).

Оценка состояния указанных выше компаний проводилась по пяти параметрам "open", "high", "low", "close" и "volume" представленных ЗАО "Финам" на сайте <http://www.finam.ru/analysis/profile0001D00007/>. (открытый доступ) ежедневными, еженедельными и ежемесячными историческими данными по котировкам акций. Обратимся к результатам вычисления коэффициента A_k компаний WMT, TGT и JCP за период времени 03.01.2005 - 02.01.2013 для ежедневных, еженедельных и ежемесячных исторических данных по акциям. Вычисление A_k производили скользящим смещением выборки объема $N=24$. Из приведенных данных следует, что наибольшей степенью самоорганизации на периоде наблюдения 03.01.2005 - 02.01.2013 с периодом самоорганизации равном два года имеет компания WMT. Видимо не случайно аналитики команды землячеств трейдеров США и Канады Международной Академии Форекса Мастерфорекс рекомендуют держать акции WMT в портфеле инвестора. Компания JCP для указанного случая имеет коэффициент самоорганизации меньше единицы. Для среднесрочных инвестиций предпочтение следует отдать компании JCP которая имеет наибольшее значение степени самоорганизации или соответствия рыночным механизмам с период самоорганизации шесть месяцев ($24 * WEEK$).

Таблица 1. Значения коэффициента самоорганизации A_k для периода времени 03.01.2005 - 02.01.2013.

	JCP	TGT	WMT
DAY	2.75	3.51	3.17
WEEK	6.33	2.84	3.08
MONTH	0.66	6.82	9.13

Компания розничной торговли TGT согласно данным таблицы 1 занимает по степени самоорганизации промежуточное место на всех периодах самоорганизации кроме ежемесячного. На ежедневном интервале анализируемые компании имеют практически одинаковую степень самоорганизации (соответствия рыночным механизмам).

ВЫВОДЫ

Предлагаемый информационно-статистический подход к анализу состояния финансовых рынков, является перспективным методом описания специфических свойств ценовых рядов. Представление процессов, определяющих состояние финансового рынка статистической моделью распределением Дирихле позволяет количественно охарактеризовать структуру экономических отношений, улучшить понимание рыночных феноменов, что позволит в сочетании с известными методами и приемами системного анализа наиболее обоснованно принимать инвестиционные решения

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08 -00715).

Список литературы

1. Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics by Edgar E. Peters (Jan 12, 1994).
2. Chaos and Order in the Capital Markets: A New View of Cycles, Prices, and Market Volatility (Wiley Finance) by Edgar E. Peters (Aug 1996).
- 3 Иляхинский А.В. Серeda Ю.С. Статистические модели в задачах зондирования,- Известия ВУЗов, Радиофизика, 1989, т32,12, с.1502-1505.
- 4 Серeda Ю.С. Проблемы информационно-статистической теории. -М.: Космосинформ, 1998. -121 с.
- 5 . Пригожин И. Время, структура и флуктуации. / И. Пригожин // Успехи физических наук, 1980, т. 131, вып. 2, с. 185-207.

05.13.00

Н.В. Истомина, Н.М. Труфанова д-р техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет,
Пермь, nike62610@gmail.com, ktei@pstu.ru

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТОКОВУЮ ПЕРЕДАВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ ПО МОСТУ

Рассматривается трехмерная математическая модель сложного теплопереноса при прокладке кабелей по балочной конструкции моста. Выполнен анализ воздействия различных климатических условий на передаваемую мощность кабельных линий. Построены температурные поля в кабельных линиях с учетом лучистой энергии, естественной и вынужденной конвекции.

Ключевые слова: *теплоперенос, кабель, мост, математическая модель.*

Проблемам, связанным с оценки работоспособности силовых кабельных линий при различных условиях прокладки (в земле, на воздухе, в кабельных каналах) и эксплуатации, посвящено достаточно большое количество работ [1-3]. На сегодняшний день остается не изученными процессы теплопереноса для кабельных линий, проложенных по мосту. Для определения величины максимальной токовой нагрузки кабеля с учетом различных погодных условий и солнечной радиации рассматривается трехмерная математическая модель процессов теплопереноса в кабеле, элементах конструкций моста и окружающем воздушном пространстве.

Объектом численного моделирования являются кабельные линии на среднее напряжение, проложенные по мосту под балочной конструкцией рис.1а [4]. Область исследования представляет собой прямоугольную область, заполненную воздухом, размером 20×30×50м, рис.1б.

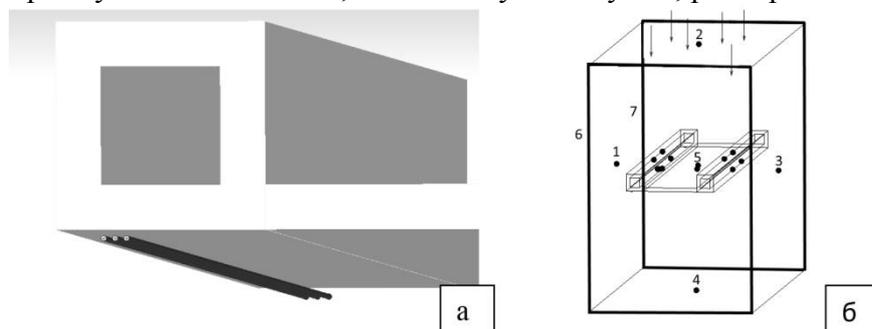


Рис.1 Схематичное изображение прокладки кабеля: а - фрагмент моста с кабельными линиями; б - область исследования.

При создании математической модели процессов теплопереноса в рассматриваемой области сделаны следующие допущения: процесс стационарный; теплофизические свойства твердых материалов постоянны [5]; реализуется ламинарный режим движения воздуха; воздушная среда считается прозрачной, а твердые поверхности, участвующие в теплообмене – серыми поверхностями; на границах раздела разнородных сред реализуется условие идеального теплового контакта.

С учетом сделанных допущений дифференциальная система уравнений имеет вид:

Уравнение движения воздуха:

$$U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_x}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_x}{\partial z} \quad (1)$$

$$U_x \frac{\partial U_z}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_z}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_z}{\partial z}$$

$$U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} + U_z \frac{\partial U_y}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial U_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{g\beta(T-T_0)}{\rho} \quad (2)$$

Уравнение неразрывности:

$$U_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + U_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + U_z \frac{\partial \rho}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \right), \quad (3)$$

Уравнение энергии для воздуха:

$$\rho_v c_v \left(U_x \frac{\partial t}{\partial x} + U_y \frac{\partial t}{\partial y} + U_z \frac{\partial t}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \lambda_v \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda_v \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda_v \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (4)$$

Уравнение теплопроводности для кабельных линий:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_u \frac{\partial t}{\partial z} \right) + q_v = 0, \quad (5)$$

Уравнение теплопроводности для твердых материалов:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0, \quad (6)$$

Плотность воздуха зависит от температуры по закону Буссинеска:

$$\rho_v(T) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)], \quad (7)$$

где x, y, z – декартовы координаты; U_x, U_y, U_z – компоненты вектора скорости воздуха в канале; t – температура, °С; P – отклонения давления воздуха от гидростатического; g – ускорение свободного падения; ρ_v, μ_v, c_v – плотность, вязкость и теплоемкость воздуха; ρ_0 – плотность воздуха при температуре; q_v – мощность внутреннего источника тепла; β – температурный коэффициент плотности воздуха; $\lambda_v, \lambda_u, \lambda_i$ – теплопроводность воздуха, изоляции и твердых материалов прокладки, соответственно.

Мощность внутреннего источника тепла в ТПЖ определяется по закону Джоуля - Ленца по формуле:

$$q_{v1} = \iint_S \frac{I_1^2}{\sigma_5^1} dS, \quad (8)$$

где I_1 – номинальный ток жилы силового кабеля (А); σ_5^1 – коэффициент удельной электропроводности токопроводящей жилы (См/м).

Система дифференциальных уравнений дополняется граничными условиями:

На поверхностях 1-4, рис.1, задавалась изотерма в диапазоне температур 20-40°С. Движение воздуха рассматривалось в направлении от поверхности 1 к поверхности 3 со скоростью от 0 до 2 м/с. На твердых поверхностях (стенки моста – 5, кабельные линии) задавались условия непроницаемости и прилипания. Прямое солнечное излучение задавалось на поверхность 2, равное 1423 Вт/м².

Разработанная математическая модель тепломассопереноса реализована в программном комплексе ANSYS методом конечных элементов. Для учета солнечной радиации (лучистого теплообмена) использовалась модель Surface To Surface и модель Solar Ray Tracing.

В работе проведено исследование влияния различных погодных условий на величину передаваемой мощности кабельных линий и максимальную температуру изоляции кабелей, которая не должна превышать рабочую температуру – 90°.

В результате решения задачи, были получены поля распределения температур в области прокладки кабельных линий для различных вариантов расчета и проведена оценка величин длительно допустимых токов, таблица 1. Каждый из вариантов расчета представлял собой ту или иную комбинацию воздействующих факторов: естественная конвекция, вынужденная конвекция, солнечная радиация, температура окружающей среды.

На рис.2. приведены поля температур для вариантов 2,5,6. Видно, что наибольшая температура реализуется для варианта 6. Для данного варианта учитывается солнечная радиация, но не учитывается конвекция воздуха в этом случае реализуются наихудшие условия теплоотвода. Вариант 5 не учитывает радиацию, допустимая токовая нагрузка возрастет ≈20%. По сравнению с вариантом 6, вариант 2 учитывает конвекцию воздуха, допустимый ток в данном случае возрастает на 15%.

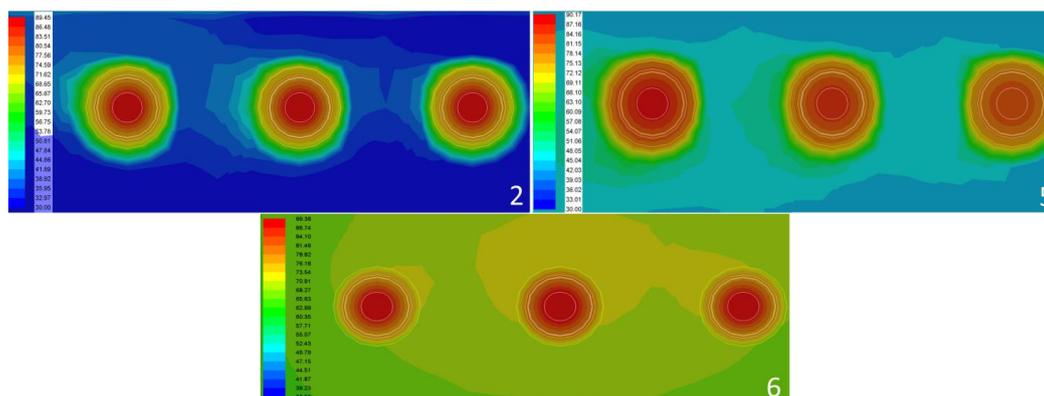


Рис.2. Поля распределения температур для вариантов 2,5,6.

Таблица 1. допустимые токовые нагрузки.

№	Вынужденная конвекция	Теплофизические характеристики воздуха зависят от температуры	Солнечная радиация	Допустимый ток А, при температуре окружающей среды		
				20 ^o C	30 ^o C	40 ^o C
1	+	-	+	402	378	353
2	+	+	+	428	389	358
3	+	+	-	547	508	480
4	+	-	-	500	463	421
5	-	+	-	474	454	411
6	-	+	+	376	334	289

Из таблицы 1 следует, что наибольшие токовые были получены при наличии вынужденной конвекции, варианты 1-4. наличии солнечной радиации допустимая токовая снижается, так как нагревается поверхность балочной конструкции моста.

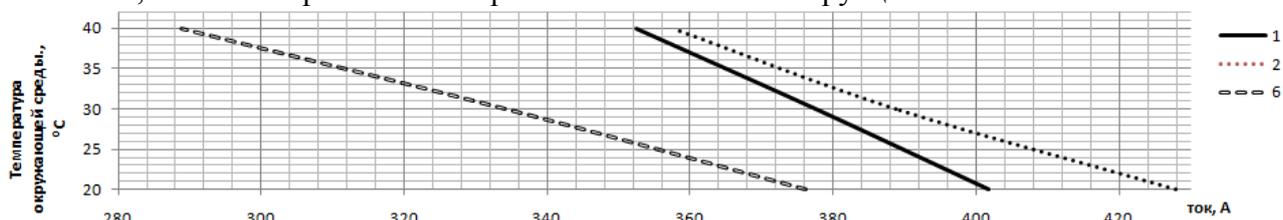


Рис.3. Зависимость допустимого тока от температуры окружающей среды, вариант 1,2,6.

Из рисунка 3 видно, что при увеличении температуры окружающей среды происходит снижение допустимого тока. Для всех трех вариантов солнечная радиация была учтена. Таким образом, допустимая передаваемая мощность кабельных линий напрямую зависит от погодных условий, влияние солнечных лучей значительно снижает длительно максимальный ток.

Список литературы

1. Е.Ю. Навалихина / Численное исследование нестационарного режима работы кабельных линий, проложенных в подземном канале / Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. №3. С. 38–41.
2. Расчет переходных тепловых процессов одножильного силового кабеля с пластмассовой изоляцией, проложенного в воздухе / Э.Т. Ларина [и др.] / Электротехника. – 1991. №10. С. 39–42.
3. Н.М. Труфанова, В.А. Будаен / Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия Нестационарная задача тепломассопереноса при прокладке кабеля в зданиях и сооружениях.
4. Н.В. Истомин, Н.М. Труфанова / Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия Анализ температурного поля кабельной линии, проложенной по мосту, и выбор ее рационального расположения.
5. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1959. – 356 с. 16.

05.13.01

Е.Г. Кабулова¹ канд. техн. наук, А.А. Бондарчук² канд. техн. наук

¹Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», Старый Оскол, evgenia791@mail.ru,

²ООО УК «Металлоинвест», Старый Оскол, us-sti@mail.ru

ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для оценки сходимости итерационной процедуры при решении задачи оптимального управления выходными технологическими параметрами предложено применение метода последовательных приближений на основе теории сжимаемых отображений. Доказано, что условия сходимости последовательных приближений к решению исследуемой задачи оптимизации сводятся не только к перебору решений систем уравнений, но и к существованию некоторой области, внутри которой выполняются достаточные условия сходимости.

Ключевые слова: задачи оптимизации, итерационные процедуры, оценка сходимости, сжимаемые отображения.

Классические решения задач оптимального управления чаще всего основаны на итерационных процедурах поиска, например в пространстве решений, применяя градиентный поиск [1, 2]. В таком случае задача предварительно приводится к виду безусловной оптимизации, что реализуется методом штрафной функции [3]. Тем не менее, большая размерность задач оптимизации, разрывность функций критерия и ограничений значительно усложняют применение такого подхода.

В настоящее время решение задач оптимального управления реализуют на основе генетических алгоритмов, но их сходимость является очень медленной [4]. Быстрая сходимость характерна для метода Ньютона [2], но он неудобен при локальных сходимостях и отличается большими вычислительными затратами при решении линейризованных систем [3]. В связи с этим наиболее приемлемым, с точки зрения постановки задачи оптимального управления, является метод последовательных приближений [5], смысл которого состоит в следующих рассуждениях.

Зададим некоторое начальное приближение \bar{x}_0 искомого вектора x в задаче оптимального управления следующего вида:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}^2(\bar{x}) \bar{x}^T K_i^j \bar{x} \rightarrow \min, \\ \bar{y}_{\min}^* \leq A(\bar{x})\bar{x} + \bar{a}_0(\bar{x}) \leq \bar{y}_{\max}^*, \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \text{ для всех } i. \end{cases} \quad (1)$$

Тогда, заданная зависимость коэффициентов от \bar{x}

$$a_{i0}(\bar{x}) = \frac{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x}) a_{i0}^j}{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x})}; \quad a_{i1}(\bar{x}) = \frac{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x}) a_{i1}^j}{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x})}; \quad \dots \quad a_{in}(\bar{x}) = \frac{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x}) a_{in}^j}{\sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}(\bar{x})}, \quad (2)$$

и найденные значения функций принадлежности $\mu_{Kj}(\bar{x}_0)$ позволяют вычислить значения элементов матрицы $A(\bar{x}_0) = \|a_{ij}(\bar{x}_0)\|$ и вектора $\bar{a}_0(\bar{x}_0)$, которые преобразуются в простые матрицу и вектор. В этой связи задача (1) упрощается до традиционной задачи квадратичного программирования и примет вид [6]:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^8 \mu_{Kj}^2(\bar{x}_0) \bar{x}^T K_i^j \bar{x} \rightarrow \min, \\ \bar{y}_{\min}^* \leq A(\bar{x}_0)\bar{x} + \bar{a}_0(\bar{x}_0) \leq \bar{y}_{\max}^*. \\ x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max} \text{ для всех } i. \end{cases} \quad (3)$$

Задача (3) преобразуется в простую задачу квадратичного программирования, которая имеет единственное решение - \bar{x}_1 , рассматриваемое как следующее приближение к решению исходной постановки (1). Найденное приближение позволяет вновь вычислить значения $\mu_{K_j}(\bar{x}_0)$ и параметры ограничений в (1), при этом решается соответствующая задача квадратичного программирования, решение которой - \bar{x}_2 . Если продолжить данную итерационную процедуру, то порождается последовательность векторов (x_0, x_1, \dots, x_i) . В случае ее сходимости к некоторому конечному пределу, он и будет являться решением исходной задачи (1).

Таким образом, для решения (1) требуется определить сходимость последовательных приближений к решению преобразованной задачи. Чтобы определить какими параметрами модели (1) устанавливается сходимость приближений к решению рассмотрим подобную задачу, исследованную в работе [3]:

$$\bar{y} = A(\bar{x})\bar{x} + \bar{a}_0(\bar{x}) \quad (4)$$

Пусть также задано некоторое начальное приближение \bar{x}_0 искомого вектора x и имеется возможность определить $A(\bar{x}_0) = \|a_{ij}(\bar{x}_0)\|$ и $\bar{a}_0(\bar{x}_0)$. Новое приближение к решению достаточно просто найти в виде $\bar{x}_1 = A^{-1}(\bar{x}_0)(\bar{y} - \bar{a}_0(\bar{x}_0))$ и применить как следующее приближение и т.д. Итерационная процедура при этом будет иметь вид:

$$\bar{x}_{k+1} = A^{-1}(\bar{x}_k)(\bar{y} - \bar{a}_0(\bar{x}_k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

Процедура (5) порождает последовательность \bar{x}_k , сходимую к (4) в случае выполнения особых условий, которые заключаются в применении принципа сжимаемых отображений [7]. Применительно к (5) данный принцип заключается в том, чтобы оператор:

$$F(\bar{x}_k) = A^{-1}(\bar{x}_k)(\bar{y} - \bar{a}_0(\bar{x}_k)) \quad (6)$$

являлся оператором сжатия, то есть выполняется условие:

$$\rho(F(\bar{x}'), F(\bar{x}'')) \leq \rho(\bar{x}', \bar{x}''), \quad (7)$$

где $\rho(\cdot)$ - метрика полного метрического пространства R .

Понятно, что непосредственное использование условия (6) для априорного анализа возможности применения исследуемого итерационного метода невозможно. Опираясь на принцип сжимаемых отображений, желательно получить условия сходимости процедуры (5) к решению системы (4) в виде некоторой зависимости от параметров этой процедуры. Это является довольно трудной задачей, решение которой возможно только для сравнительно простых операторов $F(\bar{x})$. Кроме того, необходимо определить метрику пространства для вычисления таких значений параметров оператора (6), при которых он будет являться оператором сжатия.

Рассмотрим пространство R_0^n : $\rho(\bar{x}', \bar{x}'') = \max_{1 \leq i \leq n} |x'_i - x''_i|$. Преобразуем левую часть (7), обозначив $\alpha_{ij} = a_{ij}(\bar{x})$ как элементы матрицы $A^{-1}(\bar{x})$; $\beta_j = a_{j0}(\bar{x})$; $\rho = \max_i (x'_i - x''_i)$. Тогда:

$$\begin{aligned} \rho(F(\bar{x}'), F(\bar{x}'')) &= \max_i \left| \sum_{j=1}^n \alpha'_{ij} (y_j - \beta'_j) - \sum_{j=1}^n \alpha''_{ij} (y_j - \beta''_j) \right| = \\ &= \max_i \left| \left(\sum_{j=1}^n y_j (\alpha'_{ij} - \alpha''_{ij}) + \sum_{j=1}^n (\alpha'_{ij} \beta'_j - \alpha''_{ij} \beta''_j) \right) \frac{\rho}{\rho} \right| = \\ &= \max_i \left| \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{ij} - \alpha''_{ij})}{\rho} y_j + \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{ij} \beta'_j - \alpha''_{ij} \beta''_j)}{\rho} \right| \rho. \end{aligned} \quad (8)$$

Следовательно (7) будет выполнено при условии:

$$\max_i \left| \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{ij} - \alpha''_{ij})}{\rho} y_j + \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{ij} \beta'_j - \alpha''_{ij} \beta''_j)}{\rho} \right| \leq 1. \quad (9)$$

А (9) будет гарантированно выполняться при условиях [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{1j} - \alpha''_{1j})}{\rho} y_j + \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{1j} \beta'_j - \alpha''_{1j} \beta''_j)}{\rho} \right| \leq 1 \cdot \\ \left| \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{2j} - \alpha''_{2j})}{\rho} y_j + \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{2j} \beta'_j - \alpha''_{2j} \beta''_j)}{\rho} \right| \leq 1 \cdot \\ \dots \\ \left| \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{nj} - \alpha''_{nj})}{\rho} y_j + \sum_{j=1}^n \frac{(\alpha'_{nj} \beta'_j - \alpha''_{nj} \beta''_j)}{\rho} \right| \leq 1 \cdot \end{array} \right. \quad (10)$$

Полученные неравенства перепишем по правилу раскрытия знака абсолютной величины. После этого (10) будут представлять собой выпуклую область D_y в пространстве параметров y_j , которая образована при пересечении гиперплоскостей (10.1; 10.2; ..., 10.n). Любые точки \bar{y} , которые попали в D_y , обеспечат единственное решение системы (4) и нахождение этого решения с помощью (5).

Возвращаясь к исследуемой задаче (1), доказано, что ее решение сводится к перебору решений (4), и можно допустить, что условия сходимости последовательных приближений к решению (1) сводятся также к существованию некоторой области D_y , внутри которой выполняются достаточные условия сходимости. Для доказательства практического смысла данного предположения, в дальнейшем требуется определить область D_y в условиях, когда параметры (10) неизвестны.

Список литературы

1. *Jun Zhang* Optimal Control Problem of Converter Steelmaking Production Process Based on Operation Optimization Method // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2015. Vol. 23. Article ID 483674. 13 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/483674>.
2. *Бондарчук А.А., Матвеев М.Г.* Анализ моделей управления твердостью стали в процессе плавки // *Мехатроника, автоматизация и управление*. 2008. №3. С. 37 - 40.
3. *Hamdaoui M., Fatima-Zahra Oujebbour, Abderrahmane Habbal Piotr, Breitkopf Pierre Villon* Kriging surrogates for evolutionary multi-objective optimization of CPU intensive sheet metal forming applications // *International Journal of Material Forming*. 2015. Vol. 8. Issue 3. P. 469–480.
4. *Агроник А.Ю., Талалаев А.А., Фраленко В.П. и др.* Анализ систем проектирования технологических цепочек и процессов // *Онтология проектирования*. 2016. Т.6. №3 (21). С. 255-269.
5. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1968. - 356 с.
6. *Кабулова Е.Г., Бондарчук А.А., Грачиков Д.В.* Интеллектуальное управление системами металлургического производства в условиях неопределенности: монография. – Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2009 г. –144 с.
7. *Tang L., Zhao, Y., Liu, J.* An improved differential evolution algorithm for practical dynamic scheduling in steelmaking-continuous casting production // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014. Vol. 18. Issue 2. P. 209-225. DOI: 10.1109/TEVC.2013.2250977.

05.13.18

А.В. Казаков канд. техн. наук, Е.И. Лекомцев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
 электротехнический факультет,
 Пермь, yevgen_lekomcev@rambler.ru, ktei@pstu.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ

В данной статье смоделировано осесимметричное стратифицированное течение расплавов полимеров в кабельной головке. Произведён подбор законов течения полимерных материалов с помощью программного пакета ANSYS Polymat. Определены оптимальные технологические параметры процесса экструзии.

Ключевые слова: *стратифицированное течение, осесимметричная постановка, закон Carreau-Yasuda, степенной закон.*

На рис. 1 представлена геометрия каналов кабельной головки, которая позволяет одновременно накладывать три слоя полимерной изоляции (полупроводящий экран по токопроводящей жиле, изоляция, полупроводящий экран по изоляции). Для упрощения модели и численной реализации исследования был сделан ряд допущений:

- процесс стационарный;
- теплофизические характеристики постоянны;
- течение осесимметричное;
- на границах канала реализуется условия прилипания и непроницаемости.

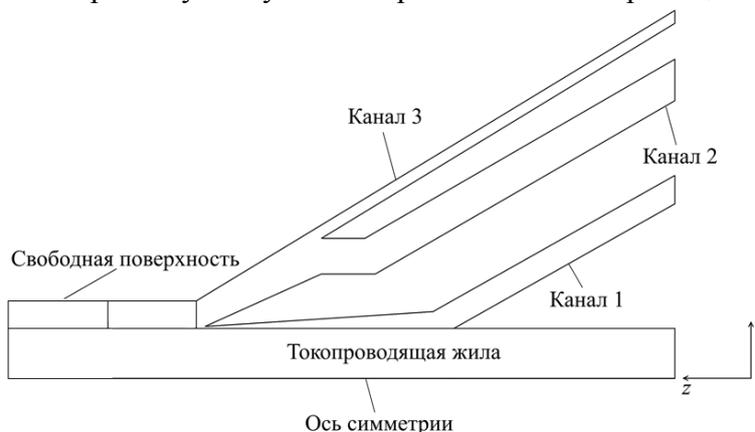


Рис. 1 – Геометрия каналов кабельной головки

С учетом данных допущений система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu_{\Theta}^i \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{2\mu_{\Theta}^i}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \mu_{\Theta}^i v_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\Theta}^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial P}{\partial r}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\Theta}^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\mu_{\Theta}^i}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu_{\Theta}^i \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}; \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v; \quad (4)$$

$$\mu_3^{1,3} = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0) \cdot \frac{n-1}{\gamma}}; \tag{5}$$

$$\mu_3^2 = \left(\mu_\infty + (\mu_0 - \mu_\infty) \left[1 + \lambda_p \cdot \frac{a}{\gamma} \right]^{\frac{n-1}{a}} \right) e^{-\beta(T-T_0)}. \tag{6}$$

Уравнения (1)-(6) замыкаются граничными условиями:

- на неподвижных стенках канала компоненты скорости равны нулю;
- на границе контакта с ТПЖ компонента скорости равна скорости ТПЖ;
- на входе в каналы задавались массовые расходы материалов;
- на выходе из каналов задавались ГУ второго рода по скорости и температуре;
- $T_{стенки} = 443 \text{ К}$, $T_{расплавов} = 423 \text{ К}$, $T_{жилы} = 383 \text{ К}$;
- на свободной поверхности: $\bar{v}\bar{n} = 0$, $\bar{\sigma}\bar{n} = 0$, $\bar{\sigma}\bar{t} = 0$ [1];
- на границах раздела потоков:

✓ по скоростям

$$v_r|_1 = v_r|_2; v_r|_2 = v_r|_3; v_z|_1 = v_z|_2; v_z|_2 = v_z|_3; \tag{7}$$

✓ по напряжениям

$$\begin{aligned} (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_1 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_2 &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{rz} \cos(z, n))|_3; \\ (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_1 &= (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_2 &= (\tau_{rr} \cos(z, n) + \tau_{rz} \cos(r, n))|_3; \end{aligned} \tag{8}$$

✓ по потокам тепла

$$q_r|_1 = q_r|_2; q_r|_2 = q_r|_3; q_z|_1 = q_z|_2; q_z|_2 = q_z|_3; \tag{9}$$

✓ по температуре

$$T|_1 = T|_2; T|_2 = T|_3; \tag{10}$$

$$\tau_{rr} = 2\mu_3 \frac{\partial v_r}{\partial r}, \tau_{rz} = \mu_3 \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) [2]. \tag{11}$$

В таблице 1 приведены теплофизические характеристики полиэтилена низкого давления (ПЭНД) и электропроводящей композиции (ЭПК), в таблице 2 – технологические параметры [3].

Таблица 1 – Теплофизические характеристики материалов

Материал	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·К)	C , Дж/(кг·К)
ПЭНД	960	0,2	2300
ЭПК	1100	0,25	1750

Таблица 2 – Технологические параметры

№ слоя	Q , кг/с	$\Delta_{слоя}$, мм	$V_{жилы}$, м/с
1	0,017	0,6	0,4
2	0,085	3,2	
3	0,04	1,1	

Существует ряд законов, которые описывают кривые вязкости и реологические кривые. Используя лабораторный данные и программный пакет ANSYS Polumat, проведен подбор законов течения, которые наилучшим образом описывают течение материалов. Для ПЭНД – закон Carreau-Yasuda (рис. 2), ЭПК – степенной закон (рис. 3).

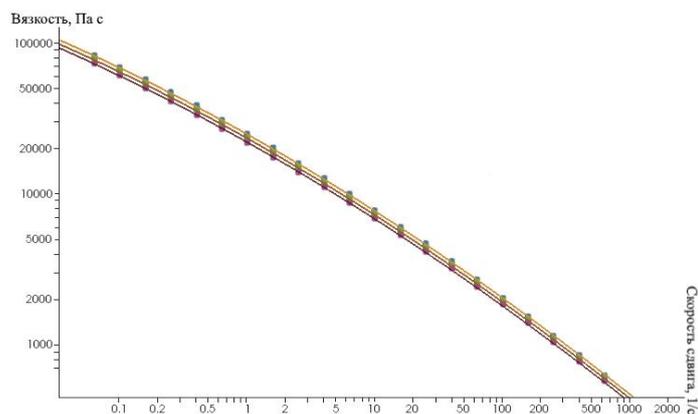


Рис. 2 – Описание экспериментальных кривых материала ПЭНД

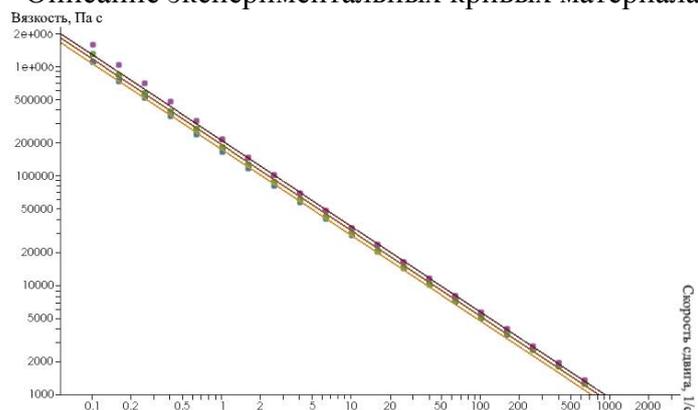


Рис. 3 – Описание экспериментальных кривых материала ЭПК

Полученные данные были интегрированы в ANSYS Polyflow, где производилась численная реализация поставленной задачи. На рис. 4 представлена форма выходного экструдата [4]. Правильный подбор технологических параметров (таблица 2) позволил получить номинальные толщины слоев: экран по жиле – 0,6 мм, изоляция – 3,2 мм, экран по изоляции – 1,1 мм.

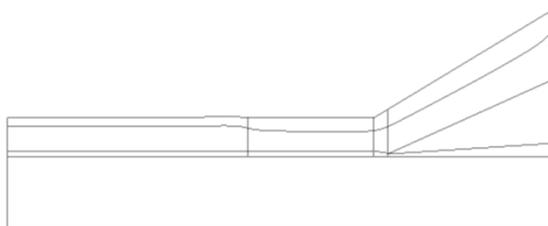


Рис. 4 – Распределение потоков и форма выходного экструдата

На рис. 5 изображено поле скоростей. Максимальная скорость достигается в самом узком участке геометрии (канал 1) и составляет 0,89 м/с. Это на 0,49 м/с больше, чем линейная скорость движения токопроводящей жилы.

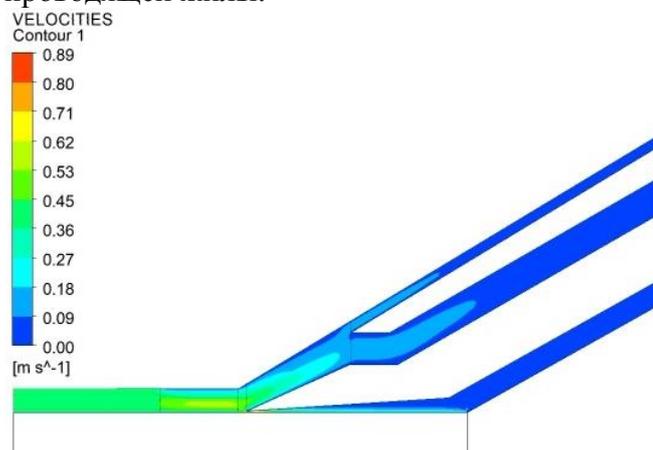


Рис. 5 – Поле скоростей

Анализ температурного поля, рис. 6, показал равномерный характер прогрева материалов. Максимальная температура составляет 458,5 К. Локальный перегрев материалов обусловлен наличием диссипативных источников тепла. Средняя температура выходной струи составила 425 К.

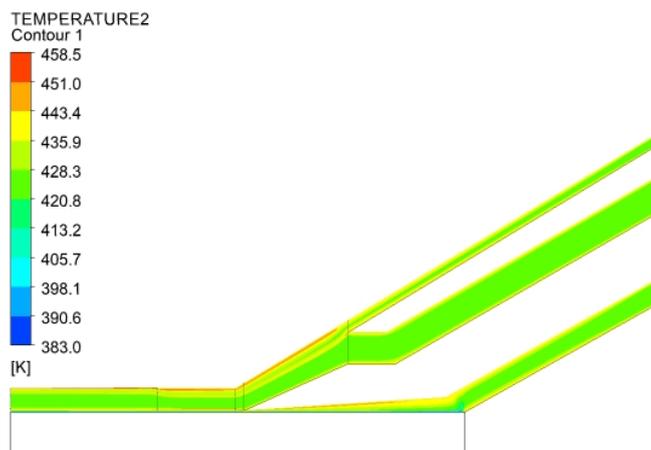


Рис. 6 – Температурное поле

Разработанная математическая модель трехслойного течения полимерных материалов в осесимметричной постановке позволила рассчитать параметры технологического режима наложения изоляционных покрытий. Рассмотрено влияние скорости движения токопроводящей жилы на выходной экструдат. Определены оптимальные параметры технологического процесса созэкструзии, которые позволят увеличить производительность линии, а также улучшить качество готового изделия.

Список литературы

1. Юрыгин П.П. Исследование стратифицированного течения резиновых смесей в дуплексных головках для выпуска заготовок кольцевого профиля // Ярославский государственный технический университет. Процессы и аппараты химических технологий. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2014.
2. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численные исследования режимов стратифицированного течения и методика управления процессом экструзионного наложения многослойной изоляции // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320, № 4. – С. 167–171.
3. M. V. Kozitsyna1, N. M. Trufanova The numerical study of the influence of rheological parameters stratified flows characteristics in cable dies // Journal of Physics: Conference Series. – 2017.
4. Снегирев Б.А., Алиев К. М., Тазюков Ф. Х. «О форме выходящей струи при выдавливании вязкоупругой жидкости из плоского щелевого канала» Вестник Сам-Гу – Естественнонаучная серия 2009 № 6 (72).

05.13.01

В.С. Карабцев^{1,2} канд. техн. наук, В.С. Каримов^{1,2} канд. техн. наук, Р.Р. Сайфиев^{1,2}¹Казанский (Приволжский) федеральный университет,
Набережночелнинский институт (филиал),²ПАО «КАМАЗ», Научно-технический центр
kvs-chelny@mail.ru

РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

В данной работе разработана методика расчёта топливной экономичности автомобиля с учетом продольного профиля дороги, его извилистости и безопасного скоростного режима. На основе полученной методики была разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать процесс расчета тягово-динамических, топливно-экономических показателей автомобиля и определять диапазоны работы двигателя внутреннего сгорания.

Ключевые слова: *продольный профиль, извилистость, скоростной режим, топливная экономичность, тягово-динамический расчет, программная реализация.*

Введение. Рост численности автомобилей на дорогах общего пользования – общемировой тренд. В связи с этим задача повышения топливной экономичности (или снижения расхода топлива) колёсных транспортных средств (КТС) при сохранении или увеличении мощности их двигателей внутреннего сгорания (ДВС) становится еще более актуальной.

Расход топлива зависит от многих факторов: полной массы, конструкции КТС и его основных агрегатов, транспортных условий, природно-климатических и дорожных условий эксплуатации. В работе [1] показано, что именно дорожные условия и в первую очередь – продольный профиль рельефа дороги, его извилистость, тип и неровности дорожного покрытия оказывают наибольшее влияние на топливную экономичность КТС.

Практически во всех современных методиках оценки топливной экономичности КТС [2 – 4] предлагается определять расход топлива при движении автомобиля в идеальных условиях по ровным дорогам. Однако в реальности это далеко не так. Движение по неровной и извилистой дороге при поддержании постоянной скорости приводит к увеличению частоты вращения коленчатого вала ДВС, что, в свою очередь, увеличивает расход топлива. Помимо этого, необходимо учитывать плотность транспортного потока на выбранном маршруте, влияющую на разгон и торможение автомобиля.

Исходя из актуальности проблемы, целью данной работы является разработка и программная реализация методики расчёта топливной экономичности и скоростных свойств с учётом дорожного профиля и безопасного скоростного режима на маршруте.

Методика расчёта топливной экономичности КТС состоит из следующих этапов:

1. Выбор маршрута и загрузка необходимых данных (профиль маршрута и база данных ограничений).
2. Определение уклонов и извилистости маршрута.
3. Определение скоростного режима на маршруте.
4. Расчет тягово-динамических и топливно-экономических характеристик автомобиля.
5. Расчет эксплуатационных характеристик автомобиля.
6. Анализ и сравнение полученных результатов с реальными испытаниями автомобиля.

Для определения профиля маршрута используется программа Google Планета Земля (Google Earth). В данной программе строится маршрут и получается массив точек, после обработки которого находятся уклоны и повороты дорожного полотна.

Для определения уклона каждого участка применим формулу:

$$i = \frac{h}{l} \cdot 100 ,$$

Где h – разность высоты между двумя соседними точками, l – расстояние между этими точками. Чтобы определить длину l участка маршрута, используем формула гаверсинусов:

$$l = 2 \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2 \left(\frac{\Delta \lambda}{2} \right)} \right) \cdot r_3 ,$$

где ϕ_1 и ϕ_2 – широта двух точек, $\Delta \lambda$ – разница координат по долготу, $\Delta \sigma$ – угловая разница координат, r_3 – радиус земли.

Для оценки извилистости трассы используем угол поворота трассы:

$$\alpha_{пов} = \frac{\pi(\alpha_{\Pi_{i+1}} - \alpha_{\Pi_i})}{180} ,$$

где α_{Π_i} – путевые углы трассы.

Скоростной режим на маршруте будем определять по установленным ограничениям (дорожным знакам) – допустимой на участке скорости движения. Для определения допустимых скоростей движения необходимо загрузить базу данных с дорожными объектами, представляющими какую-либо опасность. В данной работе для этого используется карта Speedcam [5]. В результате можно получить координаты расположения ограничений скорости вдоль маршрута с допустимыми в этих точках скоростями.

Влияние профиля дороги и скоростного режима. Рассчитанные ограничения скорости получены без учета профиля трассы. При прохождении поворотов на большой скорости автомобиль может уйти в занос, потерять управление или опрокинуться. Поэтому ограничения скорости так же необходимо уточнить дополнительно и по условиям безопасности (рисунок 1). Для этого вычисляются критическая скорость опрокидывания $V_{опр}$ и критическая скорость заноса $V_з$ по следующим формулам:

$$V_{опр} = 3.6 \sqrt{\frac{gBR}{2h_{ц}}}, \quad V_з = 3.6 \sqrt{gR\phi},$$

где B – колея, R – радиус поворота, $h_{ц}$ – высота центра тяжести КТС, ϕ – коэффициент сцепления с дорогой.

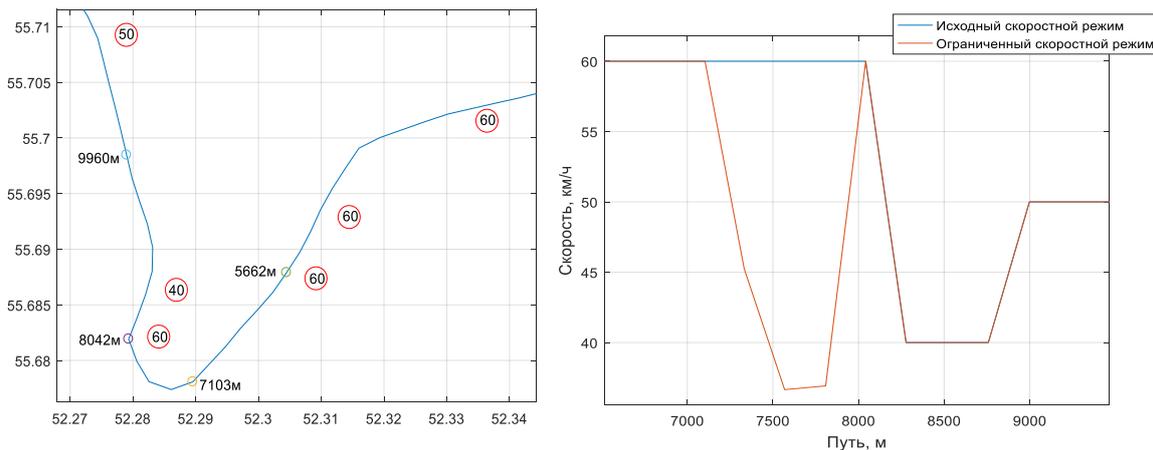


Рисунок 1 – Участок маршрута с поворотом и скоростной режим на данном участке

Полученный безопасный скоростной режим будет ограничивать скорость автомобиля при моделировании движения автомобиля на данном маршруте.

Уклоны профиля будут учитываться при расчете сил сопротивления дороги, для определения которых используется следующая формула:

$$P_d = fG \cos \alpha + G \sin \alpha ,$$

где f – коэффициент сопротивления качению, α – угол подъёма, G – вес автомобиля.

Программная реализация. Разработанная методика была реализована в виде программы на языке MATLAB. Для тестирования программы использовался типовой маршрут Набережные Челны – Казань. Для данного маршрута были получены уклон, угол поворота трассы и скоростной режим.

В результате проведенных расчетов были определены максимальная скорость, максимальный преодолеваемый подъем на различных дорожных покрытиях, время разгона, контрольный и эксплуатационный расход топлива. Некоторые результаты расчета приведены на рисунке 2. Они были верифицированы по результатам испытаний натурального образца КТС. Отклонения расчетных и экспериментальных значений не превысили 10%.

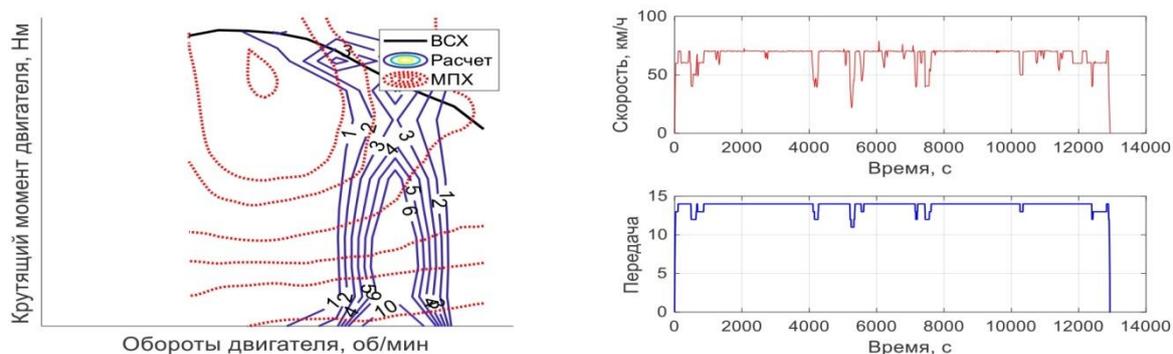


Рисунок 2—Диапазоны работы двигателя и график изменения скорости и передачи во время движения

Заключение. Таким образом, разработанная программа позволяет автоматизировать процесс расчета тягово-динамических, топливно-экономических показателей автомобиля и определять диапазоны работы на многопараметровой характеристике ДВС. Различие результатов расчётов, полученных в программе, с экспериментальными данными может быть обусловлена изменением погодных условий, состоянием дороги, человеческим фактором и т.д.

Данная программа будет полезна для автопроизводителей, так как позволит ещё на стадии проектирования автомобиля сделать обоснованный выбор двигателя, шин, трансмиссии для конкретного транспортного средства, и для компаний, которые занимаются грузоперевозками.

Список литературы

1. Болбас М.М. Транспорт и окружающая среда/ М.М. Болбас, Е.Л. Савич – Мн.: Технопринт, 2003. – 262с.
2. Борисов Г.В. К вопросу о нормировании расхода жидких топлив на автомобильном транспорте/ Г.В. Борисов, К.Я. Лелиовский, Г.В. Пачурин // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №3 – С. 28-35.
3. Молев Ю.И. Методика определения расхода топлива автомобиля с использованием данных диагностического протокола OBDII/ Ю.И. Молев, П.С. Мошков, Д.А. Соколов, А.Н. Тихомиров, В.В. Щербаков // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – №8 – С. 74-78.
4. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля: Учебник для вузов / В.П.Тарасик. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 478 с.
5. Карта Speedcam [Электронный ресурс] // MapCam.info – Единая база дорожных предупреждений POISpeedcam – Электрон.дан. – URL:<https://mapcam.info/speedcam>_(дата обращения: 05.04.2018).

05.13.06

В.В. Киселев канд. техн. наук, В.Д. Володин, А.А. Шаронов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, ktei@pstu.ru

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ СЕРВОПРИВОДОМ С ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ В КОНТУРЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ

В статье приводится обоснование использования датчика давления в контуре регулирования ускорения системы управления гидравлическим сервоприводом. Рассмотрен трехконтурный сервопривод на основе коллекторного электродвигателя постоянного тока, где в качестве датчика ускорения используется шунт, измеряющий ток потребления электродвигателя. Выведена зависимость вращающего момента от тока потребления электродвигателя. Также выведена зависимость вращающего момента от давления рабочей жидкости для гидравлического сервопривода. На основе сравнения двух зависимостей был сделан вывод о возможности использования датчика давления в контуре регулирования ускорения в гидравлическом сервоприводе.

Ключевые слова: *крано-манипуляторная установка, гидравлический сервопривод, датчик давления, угловое ускорение, ПИД-регулятор.*

Гидравлический сервопривод нашел широкое применение в системах управления различными механизмами, в частности, он является основным элементом крано-манипуляторных установок. К таким системам предъявляются повышенные требования к точности позиционирования стрелы, скорости поворота, отсутствия раскачивания груза и т.д. Удовлетворение этих требований невозможно без наличия в системе управления трехконтурного подчиненного регулятора, включающего контур регулирования ускорения поворота колонны, с датчиком обратной связи.

В настоящее время для управления сервоприводом часто используются трехконтурные системы подчиненного регулирования [1, 2].

Управление углом поворота вала электродвигателя сервопривода осуществляется по трем контурам регулирования:

- контуру регулирования ускорения поворота
- контуру регулирования скорости поворота
- контуру регулирования угла поворота

Обратная связь в контурах регулирования скорости и угла поворота ротора электродвигателя осуществляется посредством механического датчика, например инкрементного энкодера, либо индуктивных датчиков положения, таких, как сельсин или СКВТ, подключенных к управляющему микропроцессорному устройству посредством специализированных интерфейсных микросхем. Обратная связь в контуре регулирования ускорения поворота осуществляется с помощью датчика тока обмотки электродвигателя.

При разработке подчиненного регулятора для гидравлического сервопривода из-за отличия в принципе работы гидравлического двигателя невозможно использовать датчик тока в цепи обратной связи контура регулирования ускорения поворота.

В настоящей статье представлены результаты разработки структуры трехконтурной системы управления гидравлическим сервоприводом, в которой контур регулирования по угловому ускорению поворота реализован с помощью датчика давления рабочей жидкости.

Связь между током обмотки ротора коллекторного электродвигателя и угловым ускорением вращения вала

Одной из основных функций, описывающих работу коллекторного электродвигателя с постоянным возбуждением, является функция зависимости крутящего момента на валу двигателя от тока обмотки ротора (1):

$$M = C_M I_D \Phi, \quad (1)$$

где M – крутящий момент на валу электродвигателя, C_M – структурная константа, определяемая конструкцией электродвигателя, I_D – ток обмотки ротора, Φ – магнитный поток постоянных магнитов статора.

Одновременно основное уравнение вращения описывает крутящий момент, как произведение момента инерции, определяемого формой и массой вращаемого предмета, на угловое ускорение (2):

$$M = I\varepsilon, \quad (2)$$

где I – момент инерции, определяемый формой и размерами вращаемого тела, ε – угловое ускорение.

Приравняв выражения (1) и (2), и, выразив из полученной функции угловое ускорение, можно получить функцию зависимости углового ускорения от тока через обмотку ротора электродвигателя (3):

$$\varepsilon = \frac{C_M I_D \Phi}{I}, \quad (3)$$

Наличие простой линейной функции, связывающей ток обмотки ротора электродвигателя и угловое ускорение, позволяет использовать датчик тока в контуре регулирования ускорения вращения вала двигателя.

Так как в гидравлическом сервоприводе применяется не электродвигатель, а гидравлический двигатель, применить схему измерения тока обмотки в качестве датчика обратной связи регулятора ускорения невозможно. Поэтому, в дальнейшем будет рассмотрена возможность применения датчика давления рабочей жидкости. Для подтверждения возможности применения такого датчика, необходимо получить функцию, описывающую зависимость углового ускорения от давления рабочей жидкости, подаваемой на гидравлический двигатель.

Связь между давлением рабочей жидкости и угловым ускорением вращения вала гидравлического двигателя

Одной из разновидностей гидравлических двигателей являются поворотные пластинчатые гидродвигатели, позволяющие осуществлять поворот ротора на определенный угол. Угол определяется разностью давлений с разных сторон пластины. Максимальный угол поворота ограничен количеством пластин [3]. Для однопластинчатого поворотного гидродвигателя максимальный угол поворота составляет 270° , для двухпластинчатого – 150° , для трехпластинчатого 70° .

Зависимость крутящего момента на валу двигателя от давления рабочей жидкости описывается функцией (4):

$$M = bz(p_1 - p_2) \frac{r_1^2 - r_2^2}{2}, \quad (4)$$

где b – длина пластины, z – количество пластин, p_1 и p_2 – давления с разных сторон пластины – в полостях высокого и низкого давления соответственно, r_1 – радиус внутренней поверхности статора, r_2 – радиус ротора.

Приравняв выражения (2) и (4) и выразив угловое ускорение, можно получить функцию зависимости углового ускорения вращения вала поворотного гидродвигателя от давления рабочей жидкости (5):

$$\varepsilon = \frac{bz\Delta p(r_1^2 - r_2^2)}{2I}, \tag{5}$$

где ε – угловое ускорение, b – длина пластины, z – количество пластин, Δp – разность давлений с разных сторон пластины, r_1 – радиус внутренней поверхности статора, r_2 – радиус ротора, I – момент инерции, определяемый формой и размерами вращаемого тела.

Как видно, в результате преобразований получена функция зависимости углового ускорения вращения ротора поворотного гидродвигателя от разности давлений с разной стороны пластин, которое, в свою очередь, определяется давлением рабочей жидкости, управляемым с помощью гидрораспределителя. Наличие данной функции позволяет использовать показания от датчика давления рабочей жидкости, установленного после гидрораспределителя, в качестве данных обратной связи контура регулирования ускорения поворота вала гидродвигателя, что, в свою очередь, позволяет создать трехконтурный подчиненный регулятор для гидравлического сервопривода.

Система управления гидравлического сервопривода

Структура разработанного регулятора для гидравлического сервопривода поворотной колонны крано-манипуляторной установки, представлена на рис. 1.

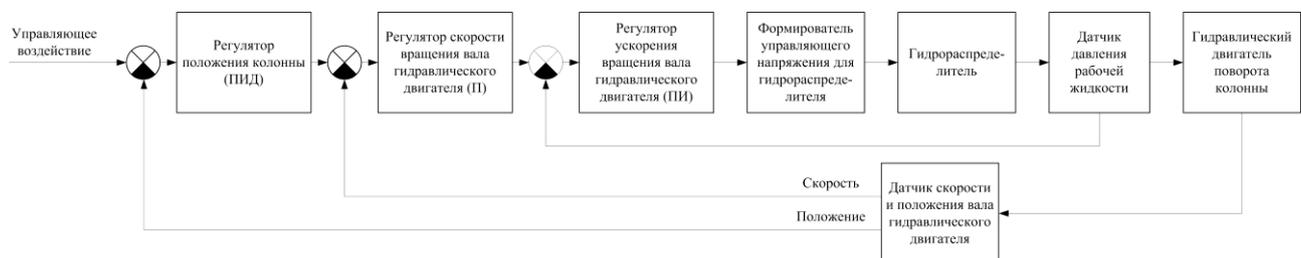


Рис. 1 - Структура трехконтурного подчиненного регулятора для гидравлического сервопривода

Как видно из рисунка, датчик обратной связи по скорости и положению сохраняется, однако в качестве датчика обратной связи по ускорению использован датчик давления, а не цепь измерения тока потребления электродвигателя, как в системе управления сервоприводом на основе коллекторного электродвигателя.

Разработанная в ходе исследования структура системы управления гидравлическим сервоприводом может быть применена для поворота колонны крано-манипуляторной установки. Применение сервопривода в данном механизме позволит повысить точность позиционирования стрелы, что, в свою очередь повысит эффективность погрузочно-разгрузочных работ.

Список литературы

1. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК / СПб: КРОНА-Век, 2008. – 368 с.
2. Горобец Н.М. Исследование современных сервоприводов на базе синхронного двигателя с постоянными магнитами. <http://masters.donntu.org/2009/eltf/gorobets/report/index.htm> (электронный ресурс, дата обращения 29.05.2017)
3. Бушта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины: Учебник для машиностроительных вузов / М: Машиностроение, 1982. – 423 с.

05.13.18

Д.А. Конотоп, П.В. Максимов канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика и механика»,
Пермь, pvmperm@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАЯТНИКОВОГО КВАРЦЕВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

В настоящее время существует необходимость разрабатывать устройства с большей эффективностью, чему способствует компьютерное моделирование. В работе рассматривается применение методов численного моделирования для оценки эффективности конструкторских изменений в кварцевом акселерометре с целью предотвращения нулевого сигнала. Установлено, что альтернативный вариант исполнения упругого элемента прибора приводит к существенному снижению погрешности механического тяжения. В работе также отражены возможные негативные особенности конструкции.

Ключевые слова: *акселерометр, численное моделирование, ANSYS, механика деформируемого твердого тела (МДТТ).*

Неотъемлемой частью инерциальных навигационных систем (ИНС) являются приборы, измеряющие ускорение – акселерометры (лат. *accelero* – «ускоряю» и др.-греч. *μετρέω* – «измеряю»). Основным преимуществом ИНС является их автономность, то есть приборам не требуется наличие внешних ориентиров или поступающих извне сигналов. Это обеспечивается тем, что данные с приборов первичной информации (акселерометров и гироскопов) интегрируются и преобразуются в информацию о положении объекта. Однако необходимо снабдить систему своим первоначальным положением и скоростью из другого источника (например, из спутниковой системы), так как ИНС будет определять свои координаты относительно начальных условий.

Объектом исследования в данной работе является кварцевый маятниковый акселерометр, высокоточный измеритель кажущегося ускорения, предназначенный для измерения проекции вектора линейных ускорений на ось чувствительности прибора с формированием соответствующего электрического аналогового сигнала. На Рис. 1 представлен чувствительный элемент (ЧЭ) устройства: 1 – подвижная пластина; 2 – слой металлизации; 3 – упругие элементы; 4 – силовая катушка; 5 – установочное кольцо.

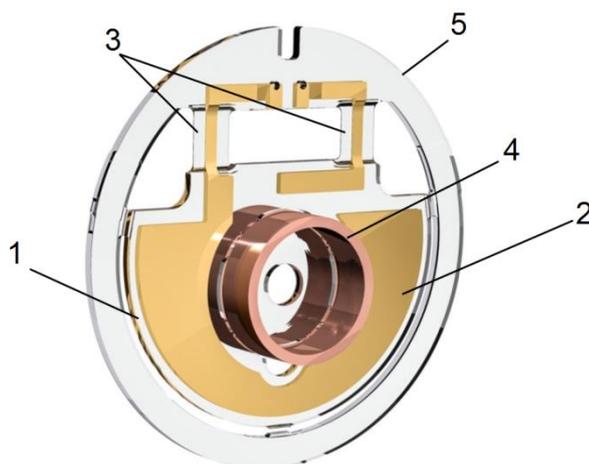


Рис. 1 – Чувствительный элемент акселерометра

Подвес изготавливается из аморфного плавленного кварца с помощью анизотропного травления. Гибкими элементами служат упругие перемишки 3, которые имеют толщину много меньшую относительно толщины кварцевой пластины. На поверхности подвижной пластины с обеих сторон нанесена металлизация 2 (золотое напыление), служащая в качестве обкладок дифференциального емкостного датчика перемещения. В том числе токопроводы проходят через перемишки. Процесс напыления происходит при существенной разнице температур (температура плавления золота 1064°C). Распыленное золото осаждается сквозь трафарет на плоскость стекла, после чего вся конструкция остужается до комнатной температуры. Так как золото и стекло имеют различные коэффициенты линейного температурного расширения (КЛТР), то после остывания конструкции возникают остаточные температурные напряжения. Учитывая, что технология процесса обеспечивает недостаточную точность изготовления, напыление с обеих сторон перемишки может различаться по толщине. Данный факт приводит к появлению нулевого сигнала, выражающегося в виде постоянной составляющей тяжения.

В ходе работы была проанализирована как текущая конструкция, так и альтернативная [1,2]. Соответствующие схемы расположения токоведущих дорожек изображены на рис. 2. Все характерные размеры поперечного сечения схемы Б обусловлены удовлетворением требований жесткости в поперечном направлении, а также удобством обозначения величин размеров и допусков ширины канавок в чертеже. Таким образом площадь поперечного сечения увеличилась с 38000 мкм² до 39200 мкм² (на 3%). Рассмотрено два случая: без дефекта напыления (толщина слоев на обеих сторонах 300 нм), а также с учетом разнотолщинности 100 нм. Было обеспечено одинаковое количество золота для схем А и Б в сравниваемых случаях.

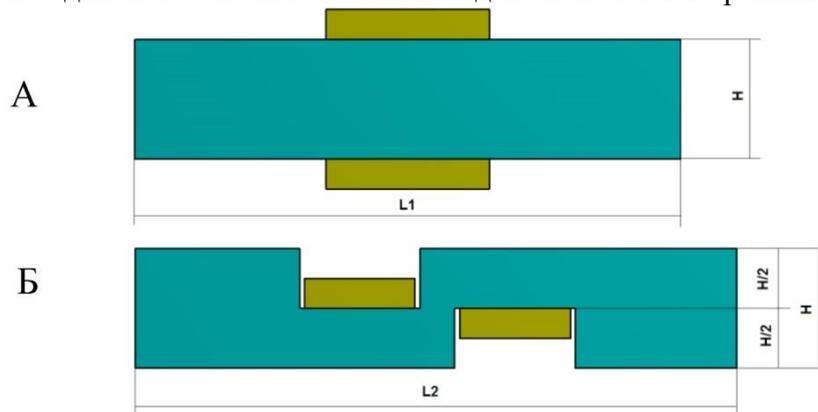


Рис. 2 – Схемы расположения токопроводов на упругом элементе (поперечное сечение)

Так как целью данного исследования являлось сравнение конструкций относительно друг друга, т.е. на качественном уровне, были введены следующие допущения: все материалы изотропные линейно-упругие, изменение температуры происходит равномерно по всему объему материала, градиенты температур малы и ими можно пренебречь. Тогда постановка задачи включает в себя [3]:

Уравнение равновесия:

$$\sigma_{,j}^{ij} + \rho F^i = 0$$

Геометрические и физические соотношения для изотропного тела:

$$\begin{cases} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \\ \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} - \beta_{ij} \Delta T \\ \varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} - \alpha_{ij} \Delta T \end{cases}$$

Граничные условия:

Жесткая заделка неподвижной части (S_u):

$$\bar{u} = 0, \quad (\bar{x} \in S_u)$$

На свободных поверхностях (S_σ):

$$\tilde{\sigma} \cdot \bar{n} = 0, \quad (\bar{x} \in S_\sigma),$$

где \bar{n} – внешний единичный вектор нормали к поверхности.

В местах сопряжения элементов (a-b) изделия (поверхности S_{ab}) – условие полного контакта:

$$\bar{u}_a = \bar{u}_b, \quad (\tilde{\sigma} \cdot \bar{n})_a = (\tilde{\sigma} \cdot \bar{n})_b, \quad (\bar{x} \in S_{ab})$$

Численная реализация описанной математической модели была выполнена с использованием возможностей конечно-элементного пакета ANSYS [4].

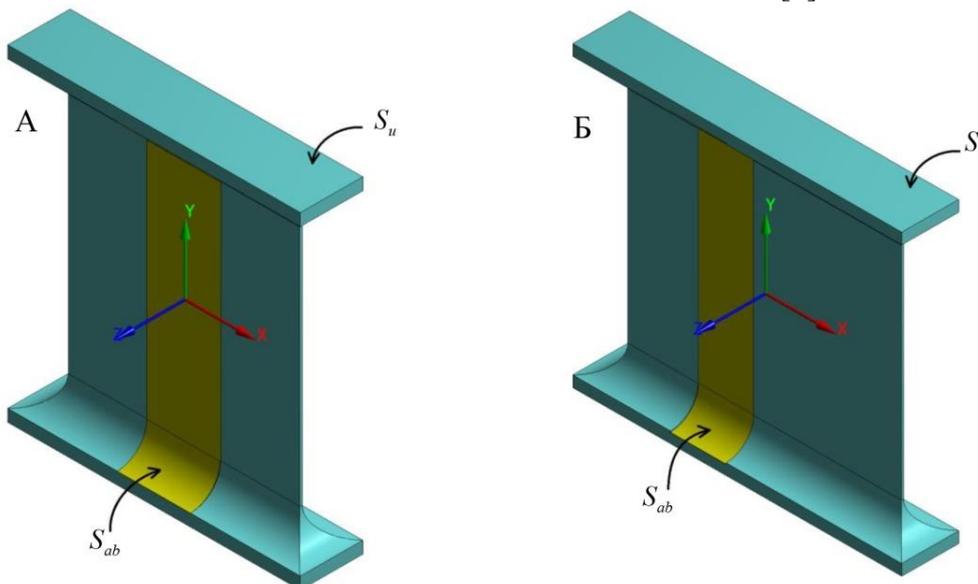


Рис. 3 – Задаваемые граничные условия

В процессе моделирования подразумевался один шаг нагружения: изменение температуры золота с 300°C до 22°C ($\Delta T = 278^\circ\text{C}$). По результатам решения оценивались перемещения и угол поворота свободного конца перемычки, а также строился профиль поперечного сечения. В Таблице 1 и на рис. 4 приведены характерные результаты численного эксперимента.

Таблица 1. Результаты численного эксперимента

	1. Схема А, без дефекта	2. Схема Б, без дефекта	3. Схема А, с учетом дефекта	4. Схема Б, с учетом дефекта
Среднее перемещение свободного края по оси Z (мкм)	0	3,1	0	0,2
Угол поворота вокруг Y	0	0	0°0'20"	0°0'23"

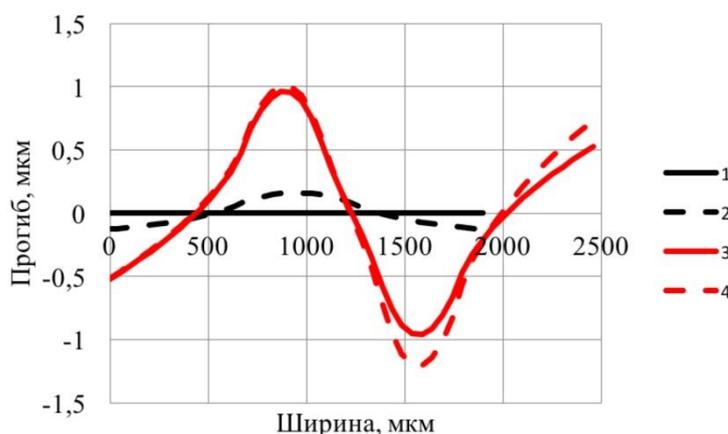


Рис. 4 – Профиль искривления поперечного сечения перемычки при различной толщине токопроводов

В результате численных экспериментов установлено, что вариант исполнения упругих элементов по типу Б, существенно уменьшает тяжение по оси чувствительности. С помощью использования такого конструкторского решения удастся снизить к минимуму величину нулевого сигнала, вызванную разнотолщинностью напыления. Однако нельзя не отметить волнообразный характер изменения поперечного сечения перемычек, который может негативно сказаться в случае воздействия поперечного ускорения (перпендикулярно оси чувствительности). Влияние этой особенности на параметры прибора может быть также подвергнуто проверке с помощью численного моделирования.

Список литературы

1. United States Patent № 4394405, 19.07.1983.
2. United States Patent № 4400979, 30.08.1983.
3. *Демидов С.П.* Теория упругости: Учебник для вузов. – М.: Высш. Школа, 1979. – 432 с.
4. *Федорова Н.Н. и др.* Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210с.

05.13.00

**В.Н. ¹Коханенко д-р техн. наук, М.Ф. ²Мицик канд. техн. наук,
А.И. ³Кондратенко канд. техн. наук, Д.Б. ¹Келехсаев**

¹ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова» в г. Новочеркасск,
Новочеркасск, d-kelekhsaev@mail.ru;

²Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» в г. Шахты,
Шахты, m_mits@mail.ru

³ФГБОУ ВПО «Российский государственный аграрный университет –
МСХА имени К.А. Тимирязева»,
Москва

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМЕРНОГО ПОТОКА ЗА БЕЗНАПОРНОЙ ТРУБОЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ СВОБОДНОМ РАСТЕКании В ШИРОКОМ ОТВОДЯЩЕМ РУСЛЕ

В работе предлагается аналитический метод определения параметров потока за круглыми трубами в безнапорном режиме течения бурного потока при его свободном растекании в широком горизонтальном русле. Произведен анализ факторов, влияющих на модель, и выявлены необходимые для достаточной адекватности на практике; установлено, что круглая форма трубы – это основной фактор. Движение потока в среднем принимается потенциальным. Определяется широкий спектр параметров, необходимых для конструирования крепления водопропускных сооружений и различного типа гасителей энергии, обеспечения актуальных скоростей потока за укрепленной частью русла не выше допускаемых.

Ключевые слова: открытый водный бурный поток, безнапорный режим течения, трубы круглого сечения, горизонтальное широкое отводящее русло, свободное растекание, аналитический метод.

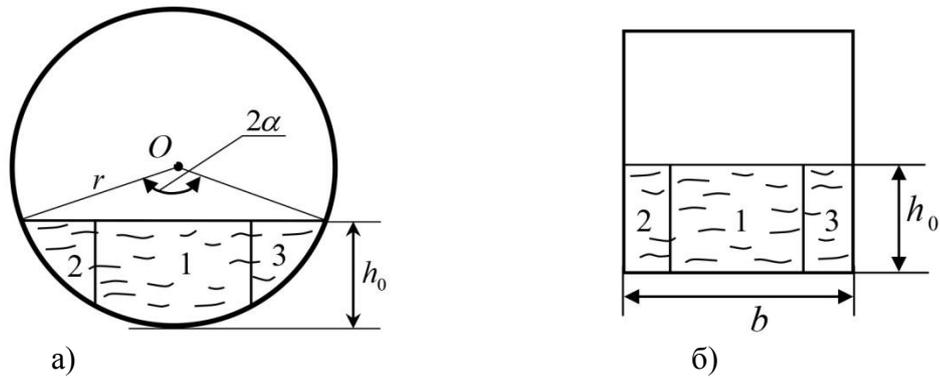
Актуальность работы

Для конструирования крепления водопропускных сооружений и различного типа гасителей энергии высокоскоростного потока необходимо знать весь спектр параметров потока по укрепляемому руслу как точечных, так и интегральных [1]. К точечным параметрам свободного растекающегося потока относятся местные скорости и глубины потока в области его течения, геометрия линий тока. К интегральным параметрам относятся: угол растекания потока и угол схода линий косых гидравлических прыжков, средняя скорость и средняя глубина потока вдоль живого сечения и др.

В работах [2, 3] приведено решение задачи определения параметров потока за безнапорными трубами прямоугольного сечения. Однако в практике строительства дорожных водопропускных сооружений и систем мелиорации наибольшее применение нашли трубы круглого сечения. В настоящей работе предлагается решение задачи определения параметров свободного растекающегося потока за безнапорной трубой круглого сечения свести к задаче за прямоугольной трубой.

Для перехода от задачи для трубы круглого сечения к эквивалентной прямоугольной необходимо определить (рис. 1): ширину прямоугольной трубы b , максимальный угол растекания вдоль крайней линии тока θ_{\max} .

Разобьем живое сечение потока в круглой трубе на три части (рис. 1)



1 - основное сечение потока; 2,3 - приточные части живого сечения потока;

Рис. 1 – Схема перехода от трубы круглого сечения к трубе прямоугольного сечения

Поскольку режим течения безнапорный, то $h_0 \leq R$. Площадь живого сечения трубы определяется по формуле[4]:

$$\omega = r^2(\alpha - \sin 2\alpha/2) \tag{1}$$

где $r = d/2$ – радиус трубы.

Из рисунка 1 а) нетрудно видеть, что $h_0 = r(1 - \cos \alpha)$, тогда

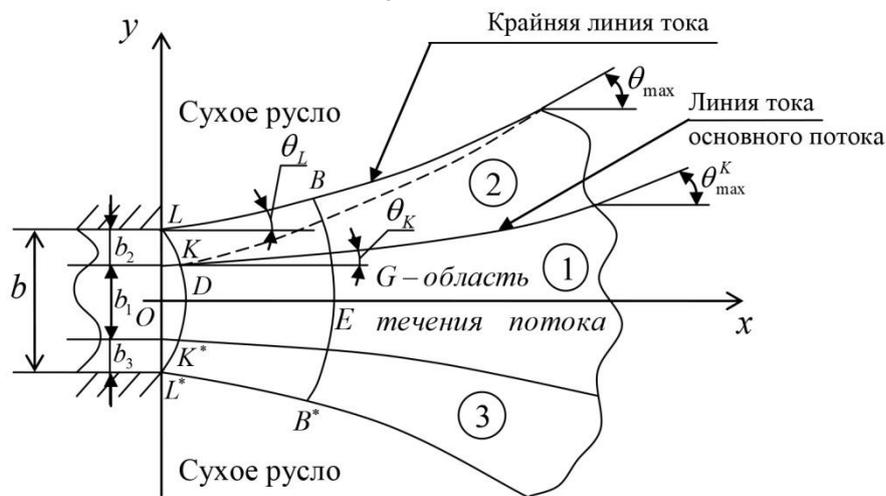
$$\alpha = \arccos(1 - h_0/r). \tag{2}$$

Средняя скорость потока на выходе из трубы определяется по формуле:

$$V_0 = Q/\omega. \tag{3}$$

Эквивалентная ширина прямоугольной трубы определяется из условия равенства площади живых сечений потока на рис. 1

$$\omega = b \cdot h_0. \tag{4}$$



b_1 – ширина основного потока;

$b_2 = b_3$ – ширина каждой из приточных частей потока;

$\theta_{\max}, \theta_{\max}^K$ отмечены условно, так как это углы на бесконечности.

Рис. 2 – План растекания потока за круглой трубой

Максимальный угол растекания основного потока θ_{\max}^K (см. рис. 2) определяется из условия совпадения предельных углов вдоль линии тока, проходящей в плоскости годографа скорости через точку с параметрами $\tau = \tau_0, \theta = 0$ и эпициклоиды первого семейства, проходящей через точку τ_0, θ .

Уравнение эпициклоиды первого семейства имеет вид [2,3,5]:

$$\theta(\tau) = \sqrt{3} \arctg \sqrt{\frac{3\tau - 1}{3(1 - \tau)}} - \arctg \sqrt{\frac{3\tau - 1}{1 - \tau}} + C_1, \tag{5}$$

где $\theta(\tau)$ – угол наклона вектора скорости к продольной оси симметрии;
 $\tau = V^2/(2gH_0)$ – параметр кинетичности; V – модуль местной скорости потока;
 g – ускорение силы тяжести; $H_0 = V_0^2/(2g)$ – полный напор;
 V_0, h_0 – местные скорость и глубина потока на выходе из трубы.

Полагая в (5) $\theta = 0, \tau = \tau_0$, получим

$$C_1 = \arctg \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{1 - \tau_0}} - \sqrt{3} \arctg \sqrt{\frac{3\tau_0 - 1}{3(1 - \tau_0)}}. \quad (6)$$

При известном значении C_1 из уравнения (5) следует:

$$\theta_{\max}^K = C_1 + \frac{\pi}{2}(\sqrt{3} - 1). \quad (7)$$

Определим параметры потока в точке K . Для этого воспользуемся уравнениями для линии тока [2, 3]: $\psi = A \sin \theta / \sqrt{\tau} = \text{const}$, считая:

$$\frac{1}{3} < \tau < \frac{2}{3}, 1 < F_0 < 4, A = \frac{V_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}. \quad (8)$$

Случай $\tau_0 \geq 2/3, F_0 \geq 4$ исследуется аналогично, но функция тока имеет вид $\psi = A \cdot \sin \theta \cdot \sqrt{\tau} \left(1 - \frac{\tau}{2}\right)$, где $A = \frac{V_0 b}{\sin \theta_{\max}}$. Для эквипотенциали справедливо:

$$\varphi = \text{const} = \frac{Ah_0}{H_0} \frac{\cos \theta}{\sqrt{\tau}(1 - \tau)}. \quad (9)$$

Так как K является точкой пересечения эквипотенциали LDL^* (рис.2) и соответствующей линии тока, то согласно [2, 3] для параметров τ_K, θ_K :

$$\begin{cases} \frac{\cos \theta_K}{\sqrt{\tau_K}(1 - \tau_K)} = \frac{1}{\sqrt{\tau_0}(1 - \tau_0)}; \\ \sin \theta_K = \sqrt{\tau_K} \sin \theta_{\max}^K. \end{cases} \quad (10)$$

Система (10) сводится к решению кубического уравнения относительно τ_K :

$$\frac{\sqrt{\tau_K}(1 - \tau_K)}{\sqrt{\tau_0}(1 - \tau_0)} + \tau_K \sin \theta_{\max}^K = 1. \quad (11)$$

Это уравнение решается аналитически [6], корень уравнения (11) $\tau_K \in (\tau_0, 1)$

$$\tau_K = \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \sqrt{1 - 3M_1} \cos \left(\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \frac{27M_2 - 2 - 18M_1}{2\sqrt{(1 - 3M_1)^3}} \right), \quad (12)$$

где $M_1 = \tau_0(1 - \tau_0)^2 \sin^2 \theta_{\max}^K, M_2 = \tau_0(1 - \tau_0)^2$.

Определив по формуле (12) τ_K , находим θ_K из (10):

$$\theta_K = \arcsin(\sqrt{\tau_K} \sin \theta_{\max}^K). \quad (13)$$

Так как к основному потоку «1» (рис. 1, 2) примыкают потоки 2,3, то θ_{\max} найдем из (5), учитывая, что эпициклоида проходит через точку τ_K, θ_K :

$$\theta_K = \sqrt{3} \arctg \sqrt{\frac{3\tau_K - 1}{3(1 - \tau_K)}} - \arctg \sqrt{\frac{3\tau_K - 1}{1 - \tau_K}} + C_1. \quad (14)$$

Из (15) определяем значение постоянной C_1 :

$$C_1 = -\sqrt{3} \arctg \sqrt{\frac{3\tau_K - 1}{3(1 - \tau_K)}} + \arctg \sqrt{\frac{3\tau_K - 1}{1 - \tau_K}} + \theta_K. \quad (15)$$

Полагая в уравнении (5) $\tau = 1, \theta = \theta_{\max}$, получаем зависимость:

$$\theta_{\max} = (\sqrt{3} - 1) \frac{\pi}{2} + C_1. \quad (16)$$

Для крайней линии тока справедливо:

$$A \frac{\sin \theta}{\sqrt{\tau}} = \frac{V_0 b}{2} = A \sin \theta_{\max}, \quad A = \frac{V_0 b}{2 \sin \theta_{\max}}. \quad (17)$$

Задавая глубину потока в точке E на оси симметрии потока h_E (рис. 2), определим в этой точке значение параметра кинетичности $\tau_E = 1 - h_E/H_0$ из уравнения Бернулли. Из (17) следует:

$$\theta = \arcsin(\sqrt{\tau} \sin \theta_{\max}) \quad (18)$$

Задавая параметр τ , из (18) определяем соответствующий угол θ . Параметр τ задаём из интервала $[\tau_L, 1]$. Для определения координат x, y вдоль крайней верхней линии тока воспользуемся формулами в [2,3]:

$$\begin{cases} x = \frac{Ah_0}{2\sqrt{2gH_0^3}} \left[\frac{1+\tau}{\tau(1-\tau)} - \frac{2\sin^2 \theta_{\max}}{1-\tau} - \ln \frac{1-\tau}{\tau} - \frac{1+\tau_K}{\tau_K(1-\tau_K)} + \ln \frac{1-\tau_K}{\tau_K} + \frac{2\sin^2 \theta_{\max}}{1-\tau_K} \right]; \\ y = \frac{b}{2} + \frac{Ah_0}{H_0} \frac{\sin \theta_{\max}}{\sqrt{2gH_0}} \left[\frac{\cos \theta}{\sqrt{\tau}(1-\tau)} - \frac{\cos \theta_K}{\sqrt{\tau_K}(1-\tau_K)} \right]. \end{cases} \quad (19)$$

Параметры в любой точке потока определяются из системы:

$$\begin{cases} \psi(\tau, \theta) = K_T \frac{V_0 b}{2}; \\ \varphi(\tau, \theta) = \frac{1}{\sqrt{\tau_E}(1-\tau_E)}. \end{cases} \quad (20)$$

где K_T – коэффициент расхода (его значение фиксирует линию тока);

τ_E – значение параметра τ на оси симметрии потока в точке E (см. рис. 2).

Координаты точки пересечения фиксированной линии тока с фиксированной эквипотенциалью определяются по формулам в [2, 3, 4].

Для линии тока, проходящей через точку L справедливо уравнение:

$$\psi(\tau, \theta) = A \frac{\sin \theta}{\sqrt{\tau}} = \frac{V_0 b}{2} = A \sin \theta_{\max} \quad (21)$$

Для линии тока, проходящей через точку K :

$$\psi(\tau, \theta) = A \frac{\sin \theta}{\sqrt{\tau}} = K_T \frac{V_0 b}{2} = A \sin \theta_{\max}^K \quad (22)$$

Из (21) и (22) следует:

$$K_T = \frac{\sin \theta_{\max}^K}{\sin \theta_{\max}}. \quad (23)$$

Далее учитывая, что $b_1 = K_T \cdot b$ и $b = b_1 + 2b_2$. Находим: $b_2 = \frac{b-b_1}{2}$.

Оценка адекватности модели реальному процессу растекания потока проводилась сравнением экспериментальных (эк) и модельных (мод) параметров. Сравнивались углы $\theta_{\text{эк}}$ и $\theta_{\text{мод}}$ в точке C при заданном расширении русла $\beta = B/b$, скорости и глубины потока в точке E (см. рис. 3).

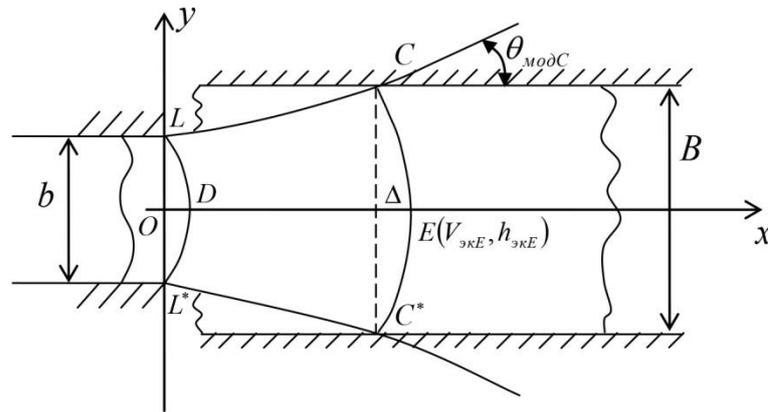


Рис. 3 – Расположение точек E и C , где определяются экспериментальные параметры потока

Экспериментальные параметры определялись из условий [7]:

$$Q = 0,0068 \text{ м}^3/\text{с}; d = 0,15 \text{ м}; \beta = B/d = 3; h_0 = 0,056 \text{ м}.$$

Проводились замеры:

1) угла в точке C : $\theta_{\text{эк}C} = 85^\circ$, 2) скорости в точке E : $V_{\text{эк}E} = 5,3 \text{ м}/\text{с}^2$

3) глубины в точке E : $V_{\text{эк}E} = 2,1 \text{ см}$

Относительное рассогласование эксперимента и модели:

$$\delta_\theta = \frac{|\theta_{\text{эк}C} - \theta_{\text{мод}C}|}{\theta_{\text{эк}C}} \cdot 100\% = 5,34\%; \delta_V = \frac{|V_{\text{эк}E} - V_{\text{мод}E}|}{V_{\text{эк}E}} \cdot 100\% = 1,78\%; \delta_h = \frac{|h_{\text{эк}E} - h_{\text{мод}E}|}{h_{\text{эк}E}} \cdot 100\% = 7,17\%.$$

Выводы по работе

1. Посылка о правомерности использования метода расчета параметров свободно растекающегося бурного потока за трубой круглого сечения заменой ее эквивалентной прямоугольной подтверждается адекватностью модели реальному процессу в окрестности выхода потока из трубы.

2. Метод обеспечивает адекватность модели практике выше адекватности по ранее известным методикам. Основным достоинством метода является аналитические формулы, удобные для расчета параметров потока.

Список литературы

1. Справочник по гидравлике / Под ред. В.А. Большакова. – Киев: Вища школа, 1984. – 343 с.
2. Коханенко В.Н. Моделирование одномерных и двумерных открытых водных потоков: монография / В.Н. Коханенко, Я.В. Волосухин, В.В. Ширяев, Н.В. Коханенко. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2007. – 168 с.
3. Коханенко В.Н. Моделирование бурных двумерных в плане водных потоков: монография / В.Н. Коханенко, Я.В. Волосухин, М.А. Лемешко, Н.Г. Папченко. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2013. – 180 с.
4. Прасолов В.В. Геометрия / В.В. Прасолов, В.М. Тихомиров. – М.: МЦНМО, 2007. – 328 с.
5. Емцев Б.Т. Двухмерные бурные потоки / Б.Т. Емцев – М.: Энергия, 1967. – 212 с.
6. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
7. Кольченко О.Л. Управление кинематической структурой двумерного бурного потока за трубчатыми водосбросными сооружениями / О.Л. Кольченко. Автореферат ... канд. техн. наук: 05. 14. 09. – Киев, 1987. – 20 с.

05.13.18

П.В. Максимов канд. техн. наук, Д.А. Конотоп

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
кафедра «Вычислительная математика и механика»,
Пермь, pvmperm@mail.ru

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛОГОВОГО КОНТУРА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В статье описывается способ численного моделирования работы маятникового компенсационного акселерометра с возможностью учета погрешностей тяжения, перекрестного ускорения; рассматриваются вопросы проектирования схемы усилителя прибора. В ходе работы построена модель компенсационной электрической цепи, сформулирована связанная физико-механическая задача, для решения которой применялась платформа MATLAB/Simulink с использованием расширения Simscape Electronics.

Ключевые слова: акселерометр, электрический аналоговый контур, численное моделирование, MATLAB, Simulink.

Объектом исследования в данной работе является маятниковый кварцевый акселерометр типа Q-flex, предназначенный для измерения проекции кажущегося ускорения, то есть разницу между истинным ускорением объекта и гравитационным ускорением.

Основные составляющие устройства показаны на рис. 1, где 1 – чувствительный элемент (ЧЭ); 2 – магнитные системы; 3 – постоянный магнит; 4 – полюсный наконечник; 5 – стакан магнитной системы; 6 – втулка обоймы; 7 – корпус датчика; 8 – подвижная пластина; 9 – металлизация; 10 – упругие перемычки; 11 – катушка датчика силы; 12 – внешнее кольцо. Гибкими элементами служат упругие перемычки 10, которые имеют толщину много меньшую относительно толщины кварцевой пластины. На поверхности подвижной пластины с обеих сторон нанесена металлизация 9 (золотое напыление), служащая в качестве обкладок дифференциального емкостного датчика перемещения в паре с плоскими неподвижными поверхностями магнитных систем 2, между которых зажимается и удерживается чувствительный элемент.

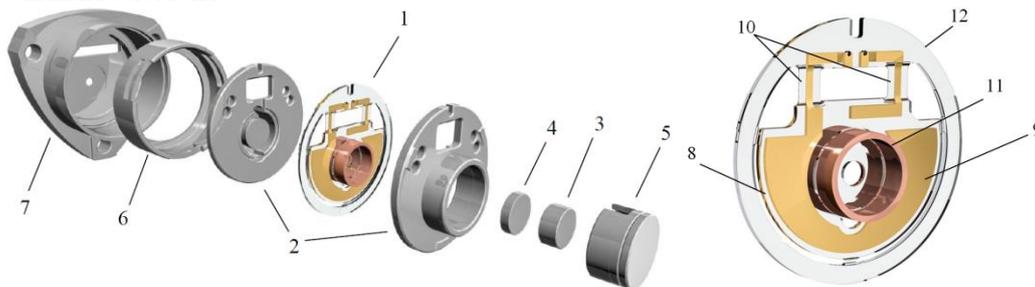


Рис. 1 – Основные элементы акселерометра

Для обеспечения отрицательной обратной связи в устройстве реализован магнитоэлектрический способ удержания маятника в нулевом положении [1]. Пара медных катушек 11 прикреплена на плоскость маятника с помощью клеявого соединения и помещена в поле постоянных магнитов 3 и полюсных наконечников 4, образующих цилиндрическое магнитное поле в области расположения катушек. Таким образом, на каждый элемент материала катушки, через который протекает ток, действует сила Ампера, которая компенсирует силу инерции, а величина тока является мерой измеряемого ускорения. Кроме всего прочего, прибор герметичен и наполнен газообразным азотом, тем самым обеспечивается газодинамическое демпфирование в приборе [2].

Неотъемлемой частью прибора является усилитель, где происходит выделение и усиление полезного сигнала. Данная система представляет собой микросборку на базе операционных усилителей (ОУ) с внешними RC-цепями. Электрическая схема усилителя представлена на рис. 2.

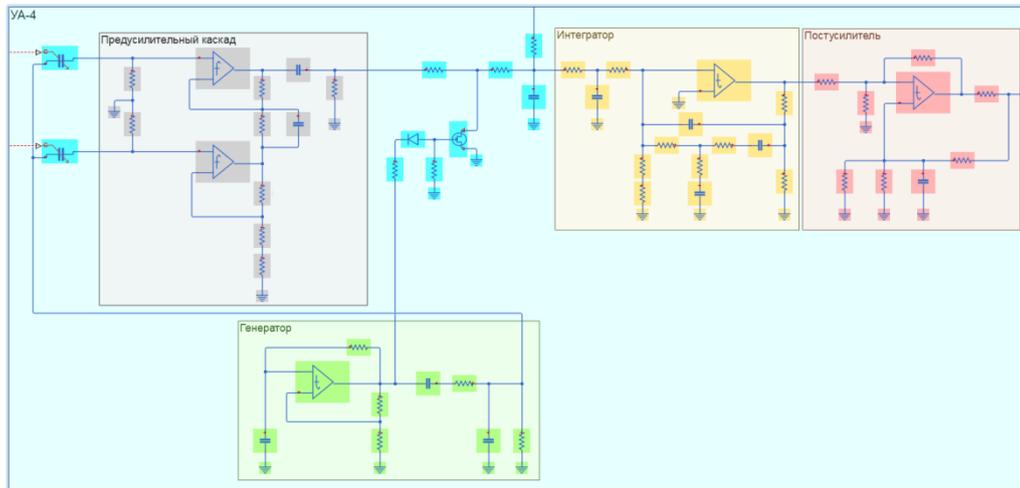


Рис. 2 – Электрическая схема усилителя акселерометра

В целом работу усилителя можно описать так: генератор прямоугольного сигнала питает обкладки дифференциального датчика перемещения, который представляет собой пару переменных конденсаторов. При отклонении пластины емкости конденсаторов меняются, и сигнал, прошедший через них, будет отличаться. Далее с помощью модернизированной схемы измерительного усилителя [3], построенного на двух ОУ, выделяется полезная составляющая. Выделенный и усиленный сигнал рассогласования подается на вход интегратора, выступающего в качестве аналоговой запоминающей ячейки. На завершающем этапе сигнал проходит через постусилитель с высоким КПД и после чего снимается с помощью масштабного резистора, номинал которого варьируется в зависимости от диапазона измеряемого ускорения.

1. Вывод уравнения движения ЧЭ

Использовались следующие предположения: пластина ЧЭ недеформируемая и имеет одну степень свободы (угол поворота θ). Уравнение движения можно записать в виде:

$$(J_c + ma^2)\ddot{\theta} = Q$$

где J_c – главный центральный момент инерции чувствительной массы; m – масса ЧЭ; a – расстояние до центра масс (ЦМ); $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение; Q – обобщенные силы, которые включают в себя совокупность всех воздействий, действующих на ЧЭ (силы, обусловленные жесткостью упругих элементов, ускорениями u и g , демпфированием, погрешностью механического тяжения, а также компенсирующей силой) и записываются в виде:

$$Q = nk_\theta\theta + K_\theta\dot{\theta} + am(g \cos(\gamma + \theta) + u \sin(\gamma - \beta + \theta)) + F_k a \cos \theta + M_t$$

где n – количество упругих элементов, k_θ – коэффициент жесткости упругого элемента, K_θ – коэффициент демпфирования, F_k – компенсирующая сила, M_t – момент тяжения.

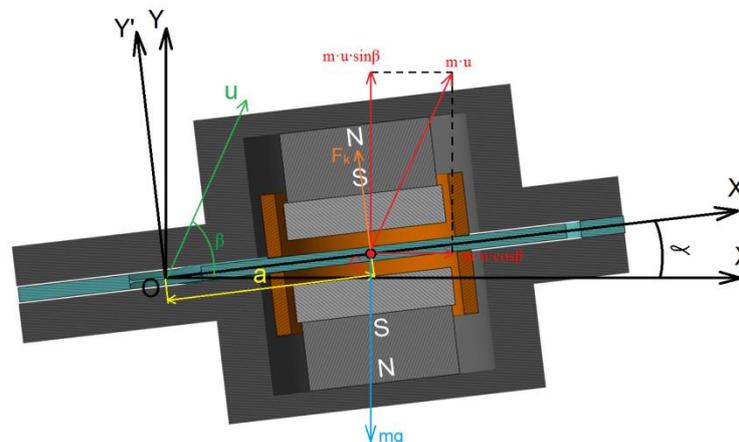


Рис. 3 – Силовые факторы и системы координат

OXY – неподвижная система координат, а OXY' – система, связанная с корпусом акселерометра. Положение OXY' определяется произвольным, но фиксированным в пределах от 0° до 360° , углом γ (0° – положение $1g$, 90° – положение $-0g$ и т.д.).

2. Описание электрического контура

Усилитель акселерометра состоит из следующих типов элементов: резистор, конденсатор, диод, транзистор, операционный усилитель.

Резистор представлен в простейшей форме как линейный резистор:

$$I = \frac{V}{R},$$

где I – ток; V – напряжение; R – сопротивление.

Конденсатор описывается следующим простейшим выражением:

$$I = C \frac{dV}{dt},$$

где C – емкость.

Экспоненциальная модель диода дает соотношение между током I и напряжением V диода:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\frac{qV}{NkT_{m1}}} - 1 \right) V > -BV, \quad I = -I_s \cdot \left(e^{\frac{-q(V+V_z)}{kT_{m1}}} - e^{\frac{qV}{NkT_{m1}}} \right) V \leq -BV,$$

где q – элементарный электрический заряд; k – постоянная Больцмана; BV – обратное пробивное напряжение; N – коэффициент эмиссии; I_s – ток насыщения; T_{m1} – температура, при которой указаны параметры диода.

Для представления полевого транзистора с n-каналом используются уравнения Шихмана-Ходжеса. Данная модель устанавливает связь выходного стокового тока транзистора I_D с напряжениями затвор-исток V_{GS} и сток-исток V_{DS} . Выходная вольтамперная характеристика (ВАХ) состоит из двух участков, соответствующих двум режимам работы транзистора. Триодный режим:

$$I_D = bV_{DS} \left(2(V_{GS} - V_t) - V_{DS} \right) \left(1 + \lambda V_{DS} \right), \text{ если } 0 < V_{DS} < V_{GS} - V_t;$$

и режим насыщения:

$$I_D = b \left(V_{GS} - V_t \right)^2 \left(1 + \lambda V_{DS} \right), \text{ если } 0 < V_{GS} - V_t < V_{DS},$$

где V_t – напряжение отсечки; β – параметр крутизны; λ – параметр модуляции длины канала.

Операционный усилитель описывается следующим уравнением:

$$V_{out} = \frac{A(V_p - V_m)}{\frac{s}{2\pi f} + 1} - I_{out} \cdot R_{out},$$

где A – коэффициент усиления; R_{out} – выходное сопротивление; I_{out} – выходной ток; s – оператор Лапласа; f – частота, на которой коэффициент усиления падает на 3 дБ относительно коэффициента усиления на постоянном токе; V_p и V_m – напряжения на положительном и отрицательном входах соответственно.

Уравнение движения ЧЭ является дифференциальным уравнением второго порядка, которое возможно представить в среде Simulink стандартными средствами как эквивалентную блок-схему, а электрический домен реализуется с помощью специального встроенного расширения Simscape Electronics. Данный пакет предназначен для физического моделирования работы различных систем, в том числе обеспечивает возможность симуляции работы аналоговой схем [4]. Соотношения для электрических компонентов представлены в расширении Simscape Electronics в виде отдельных подмоделей, из которых строится

эквивалентная модель электрической схемы усилителя. Таким образом, была построена полная электромеханическая модель акселерометра.

На рис. 4 представлены результаты моделирования. Приведен начальный момент времени работы прибора, что соответствует «включению» устройства, а также воздействие ускорения вдоль оси чувствительности. Процесс перерегулирования в начальный момент времени объясняется тем, что следящая система приводит маятник в «электрический ноль», который может отличаться от геометрического нулевого положения. Далее видно, как система обрабатывает воздействие в виде сглаженного ступенчатого линейного ускорения.

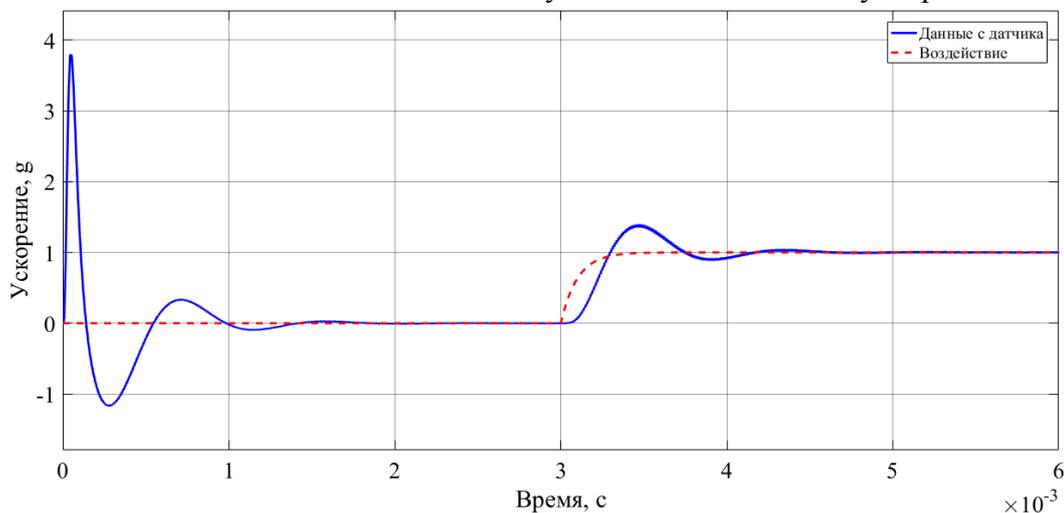


Рис. 4 – Результаты численного моделирования

Представлена полная электромеханическая модель компенсационного акселерометра с обратной связью. Описанный способ моделирования может быть использован не только для оценки динамического отклика системы, но и при проектировании электрической схемы усилителя с использованием отечественной элементной базы.

Список литературы

1. *Вавилов В.Д.* Интегральные датчики: Учебник // Нижегород. гос. техн. ун-т Н. Новгород. 2003. – С. 248.
2. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы: учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2007. – С. 244.
3. *Хорвиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ.– Изд. 3-е, стереотип.– М.: Мир, 1986. – С. 451.
4. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

05.13.18

Н.А. Рябкова, А.В. Казаков канд. техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра конструирования и технологий в электротехнике,
Пермь, nataha170694@yandex.ru

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

В данной статье разработана и решена модель процесса совместного течения трех полимерных жидкостей двумя методами: подвижной сетки и смеси. Для численной реализации использован программный пакет ANSYS Polyflow.

Ключевые слова: *сетка; смесь; течение; сравнение.*

Регулирование режима соэкструзии остается очень сложным для реализации процессом, несмотря на все технические достижения в этой области. Целью исследования было сравнение решения математической модели трехслойного наложения полимеров методом подвижной сетки и методом смеси. В первом методе каждому узлу сетки придается несколько степеней свободы (в зависимости от типа решаемой задачи). При этом координаты каждого узла могут динамически меняться от итерации к итерации согласно результирующим распределениям сил внутри потоков. В итоге конечная сетка счетного домена принимает форму конкретного потока. Для смешового метода сетка остается неподвижной, однако у каждого узла добавляется параметр, определяющий концентрацию того или иного компонента смеси. Затем, в соответствии с заранее заданными пропорциями, доопределяются остальные физико-реологические свойства смеси. При моделировании процесса, особое внимание уделяется области сходящегося трехслойного течения.[1] Схема расчетной области потока полимерных жидкостей в канале кабельной головки представлена на рис. 1.

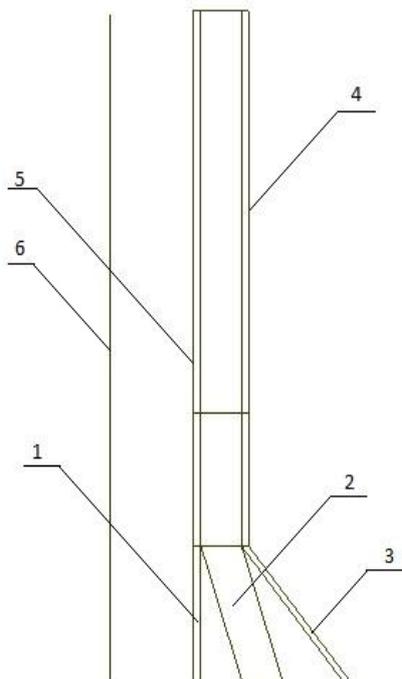


Рис. 1– Схема расчетной области трехслойного потока полимерных жидкостей:
1 – первый слой полимера; 2 – второй слой полимера; 3 – третий слой полимера;
4 – свободная поверхность; 5 - подвижная стенка; 6 – ось симметрии

С целью упрощения математической модели в работе были сделаны следующие допущения: процесс стационарный, массовые силы значительно меньше поверхностных, течение осесимметричное, на границах канала реализуется условие прилипания и непроницаемости, теплофизические характеристики постоянны.

В результате сделанных допущений система дифференциальных уравнений [2] для каждого из слоев потока в скоростях имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu_3^i \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{2\mu_3^i}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \mu_3^i v_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] = \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_3^i \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right] + \frac{\mu_3^i}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_3^i \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi, \quad (4)$$

где индекс i – определяет номер слоя в потоке и соответствующий ему материал; r, z – радиальная и продольная цилиндрические координаты; v_r, v_z – компоненты вектора скорости; Φ – диссипативный источник тепла; P – давление; T – температура; ρ – плотность; C – теплоемкость; λ – теплопроводность; μ_3 – эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры:

$$\mu_3 = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (5)$$

где μ_0 – начальная вязкость при T_0 ; β – температурный коэффициент вязкости; n – коэффициент аномалии вязкости; I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации.

Система дифференциальных уравнений (1) – (5) замыкалась следующими граничными условиями: на неподвижных стенках компоненты скорости равны нулю, продольная компонента скорости равна скорости движения жилы (0, 05 м/с), на входе в каналы задавалась величина объемного расхода, на выходе – граничные условия второго рода по скорости и температуре, температура твердых стенок канала 443 К, температура полимеров на входе в каналы 423 К, температура жилы 383 К. На границах раздела потоков задавались граничные условия равенства напряжений, скоростей, температур и потоков тепла.

Значения теплофизических и реологических свойств материалов экрана и изоляции приведены в таблице 1.

Таблица 1– Теплофизические и реологические свойства материалов

Материал	Вязкость $\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	Плотность $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	Теплоемкость $C, \text{Дж}/\text{кг}/\text{°C}$	Теплопроводность $\lambda, \text{Дж}/\text{м}/\text{с}/\text{°C}$	Коэфф. аномалии n
Экран	38523	1080	2500	0,182	0,251
Изоляция	14946	779	2500	0,182	0,542

На рисунке 2 представлены схемы границ потоков, получившихся в результате решения математической модели двумя способами. Из рисунка видно, что потоки имеют более четкие границы в методе подвижной сетки.

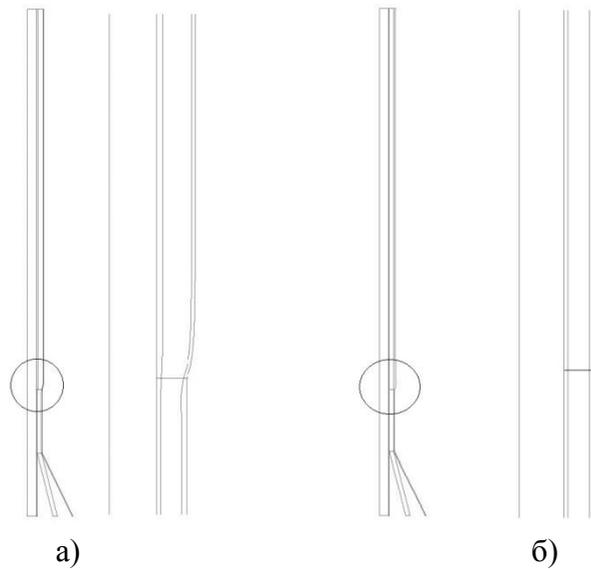


Рис. 2– а) – метод подвижной сетки, б) – метод смеси

Анализ температурного поля приведенного на рисунке 3 показывает достаточно равномерный характер прогрева материала. Максимальная температура при заданных расходах составляет 443,3 К, что выше температуры задаваемой на стенках каналов на 3,3 К и объясняется явлением диссипации энергии.

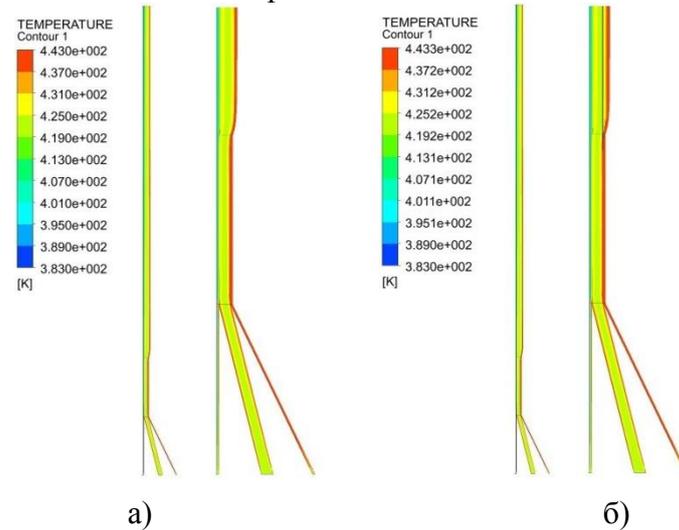


Рис. 3– а) – метод подвижной сетки, б) – метод смеси.

На рисунке 4 представлены поля скоростей.

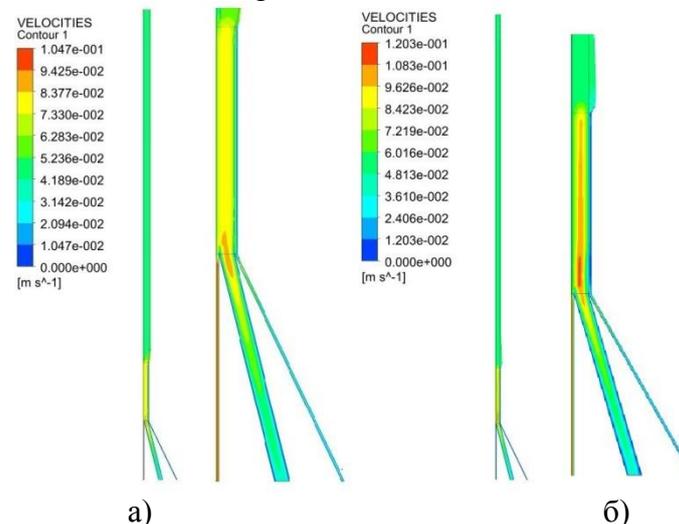


Рис. 4– а) – метод подвижной сетки, б) – метод смеси.

Результаты моделирования показывают большую скорость в месте соединения трех потоков. Максимальная скорость потока на этом участке составляет 0,12 м/с в методе смеси и 0,1 в методе подвижной сетки.

В результате проведенных исследований была разработана и решена двумя методами модель процесса совместного течения трех полимерных жидкостей. Полученные поля температур и скоростей отличаются друг от друга на незначительные величины. Метод подвижной сетки сложнее в реализации, чем метод смеси, но показывает наиболее приближенные к реальности результаты. Было выявлено, что метод подвижной сетки дает более четкие границы раздела потоков и больше подходит для численной реализации стратифицированных течений.

Список литературы

- 1 *Юрыгин, П.П.* Исследование стратифицированного течения резиновых смесей в дуплексных головках для выпуска заготовок кольцевого профиля [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук (9.04.14) / Павел Петрович Юрыгин; ЯГТУ. – Ярославль, 2014. – 164 с.
- 2 *Тадмор З., Гогос К.* Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632с.

05.13.00

^{1,2} Л.С. Сабитов канд. техн. наук, ² Н.Ф. Кашапов д-р техн. наук,
¹ В.К. Ильин д-р техн. наук, ¹ Ю.М. Стрелков, ² И.К. Киямов д-р эконом. наук

¹Казанский государственный энергетический университет,
²Казанский (Приволжский) федеральный университет,
 Казань, sabitov-kgasu@mail.ru

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГИБКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В работе представлены численно-аналитические методы расчета гибких систем на примере проводов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Предложен новый способ защиты сталеалюминиевых проводов ВЛЭП от усталостных колебательных напряжений на выходе из поддерживающего зажима. Также авторами разработана программа ЭВМ AutoRSS.04 позволяющая рассчитать все компоненты напряженно-деформированного состояния узла и подобрать оптимальную форму.

Ключевые слова: гибкая система, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.

Анализ статистических данных по отказам элементов ВЛ показал, что значительное число их отказов связано с повреждаемостью проводов, изоляторов и арматуры, и только 13% отказов вызвано повреждением опор. Предложенный способ, представленный на рисунок 10, может быть использован для защиты их проводов от усталостных вибрационных повреждений, а также повреждений, вызванной пляской проводов, обусловленной сочетанием ветровых нагрузок с гололедно-изморозевыми отложениями на проводах.

В месте установки поддерживающего зажима к проводу 2, коаксиально ему, посредством термитной сварки приваривают защитный элемент из алюминия, представляющий собой тело вращения, в наружную поверхность которого вваривают преформированные в спирали стальные алюминированные проволоки, центральная часть защитного элемента, монтируемая в поддерживающий зажим, имеет диаметр D_0 , равный (1,4-2) диаметра провода $d_{п}$, который по длине консольной части L_0 уменьшается до диаметра провода $d_{п}$, при этом диаметр консольных частей защитного элемента $D(x)$ в местах после выхода из поддерживающего зажима определяют в зависимости от текущей координаты x , отсчитываемой от крайних точек поддерживающего зажима, из уравнения

$$D(x) = 2\sqrt[3]{a + bx + cx^2 + ex^3}, \tag{1}$$

где $a = \frac{D_0^3}{8}$; $b = -\frac{D_0^3 - d_{п}^3}{4L_0} + e \cdot L_0^2$; $c = \frac{D_0^3 - d_{п}^3}{8L_0^2} - 2e \cdot L_0$; $e = \frac{7}{32} \cdot \frac{D_0^3 - d_{п}^3}{L_0^3}$.

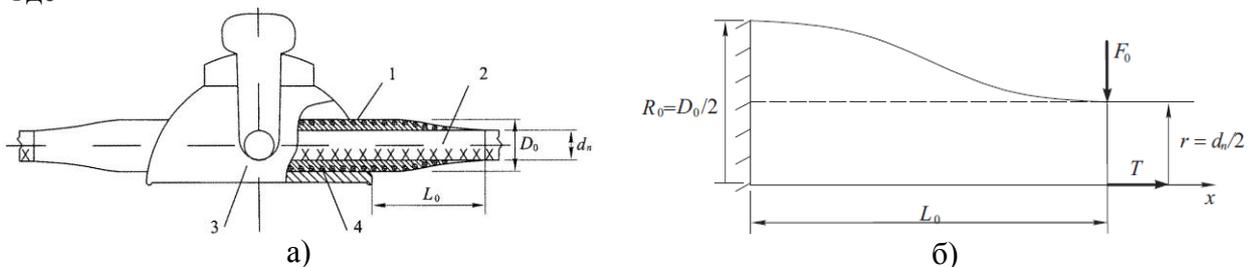


Рис. 1 – Новая конструкция узла сопряжения токоведущих проводов с изолятором ВЛ (патент 2615178 РФ): а) общий вид; б) оптимальная форма консольной части защитного элемента

Технический результат состоит в значительном повышении ресурсной стойкости провода при его вибрации, а также снижении максимального суммарного напряжения от растяжения провода и от его изгиба в наиболее опасном сечении провода, месте его выхода из поддерживающего зажима, в случае возникновения пляски проводов, когда они подвергаются существенным механическим перегрузкам.

Формула (1) получена для расчётной схемы соединения провода с изолятором, показанной на рис. 1. Согласно ей провод, с приваренным к нему защитным элементом, на выходе из поддерживающего зажима представлен в виде консоли круглого сечения, длиной L_0 , с жестко закрепленным концом большего сечения, радиусом $R_0=D_0/2$, нагруженной на свободном конце, радиусом $r=d_{II}/2$, поперечной силой F_0 , которая создает изгибающий момент на консоли $M_{изг}$, имеющий наибольшее значение в месте ее закрепления. К свободному концу консоли также приложена постоянная сила натяжения T , величина которой согласно Нормам не должна превышать 13% от разрывного усилия провода.

На рис. 2 представлена блок-схема алгоритма реализации методики расчёта НДС стыкового соединения токоведущего провода опоры ВЛ с изолятором. Методика реализована в специально разработанной программе AutoRSS.04 [5].

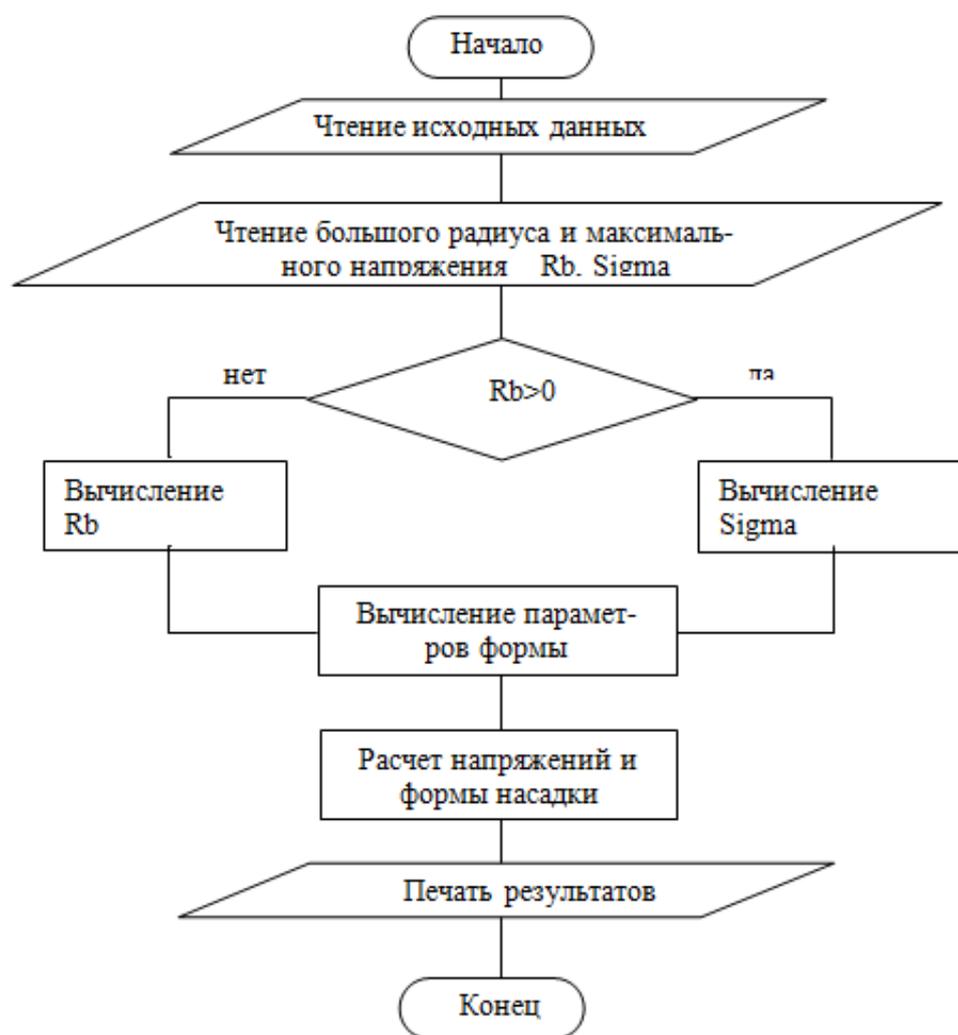


Рисунок 2 – Алгоритм реализации методики программы AutoRSS.04

В Таблице 1 и на рис. 3 приведены результаты расчёта в программе AutoRSS.04.

Таблица 1 – Результаты расчёта НДС стыка провода опоры ВЛ с изолятором

х	радиус	радиус (без перехода)	Sigma
0	0,1525	0,1525	176,9847
0,008	0,15108	0,15054	174,4459
0,016	0,1494	0,14853	172,8422
0,024	0,14748	0,14647	172,0675
0,032	0,14534	0,14437	172,0336
0,04	0,14302	0,1422	172,6637
0,048	0,14054	0,13998	173,8868
0,056	0,13794	0,13771	175,6319
0,064	0,13523	0,13536	177,8209
0,072	0,13245	0,13295	180,36
0,08	0,12962	0,13047	183,126
0,088	0,12677	0,12791	185,9477
0,096	0,12393	0,12526	188,5739
0,104	0,12113	0,12253	190,6215
0,112	0,11839	0,11971	191,4842
0,12	0,11575	0,11679	190,168
0,128	0,11323	0,11376	184,9767
0,136	0,11085	0,11062	172,8809
0,144	0,10865	0,10737	148,1548
0,152	0,10666	0,104	99,17453
0,16	0,10489	0,1005	0,00006

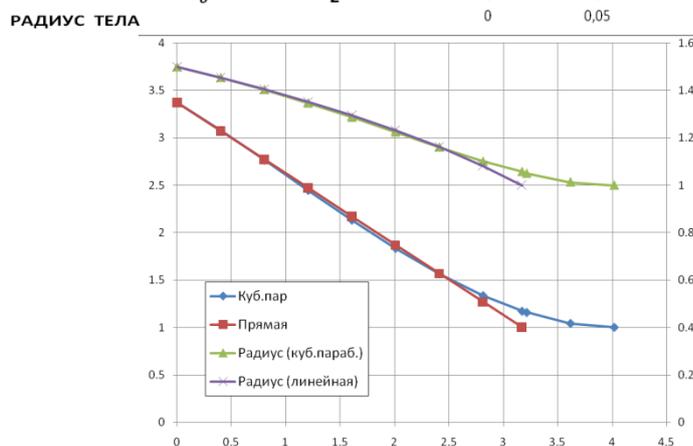
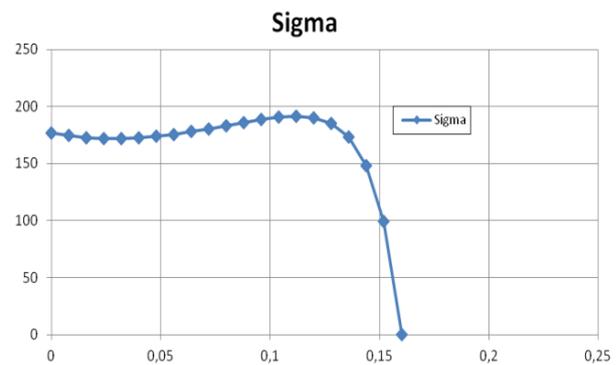
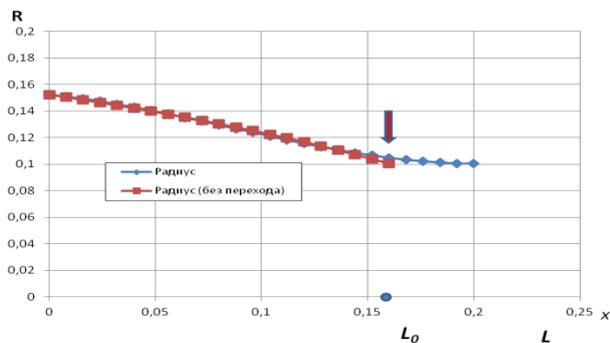


Рис. 3 – Результаты расчёта НДС стыка провода опоры ВЛ с изолятором

Выводы:

Наряду с повышением ресурсной стойкости провода предложенный способ позволяет предотвратить аварии линий электропередачи из-за механических перегрузок проводов в случае возникновения пляски проводов, вызванной сочетанием значительных ветровых нагрузок с гололедными отложениями. В наиболее опасном сечении провода, в месте его выхода из поддерживающего зажима, возникает суммарное напряжение от растяжения провода и от его изгиба. При этом эффективность предложенного способа защиты от повреждения проводов в этом случае определяется значительным снижением в опасном сечении провода, с коаксиально приваренным к нему защитным элементом, максимального напряжения σ_{Σ} , равного сумме напряжений от растяжения $\sigma_p = 4T/\pi D_0^2$ и от изгиба $\sigma_{изг} = 32M_{изгmax}/\pi D_0^3$. Это обусловлено тем, что площадь сечения системы провод с защитным элементом и ее момент сопротивления существенно, соответственно в 4 и 8 раз превышают указанные величины собственно для провода.

Список литературы

1. *Новицкий П.В., Кнорринг В.Г., Гутников В.С.*, Цифровые приборы с частотными датчиками. Л., «Энергия», 1970. – 424 с.
2. Проектирование датчиков для измерения механических величин, под редакцией *Осадченко Е.П., М.*, «Машиностроение», 1979. – 480 с.
3. *Колосов В.Г., Рыжов С.В.* Повышение ресурсной стойкости проводов ВЛ при вибрации путём установки спиральных прожекторов в лодочки поддерживающих зажимов // *Электро*, 2005. - №6 – С. 45-51.
4. Пат. 2615178 Российская Федерация, МПК Е 04 Н 12/10 Способ защиты сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи от усталостных колебательных повреждений на выходе из поддерживающего зажима /*Л.С. Сабитов, И.Л. Кузнецов, Ю.М. Стрелков, А.К. Мезиков, А.И. Никифоров*; опубл. 04.04.2017 Бюл. 10.
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662990 от 22.11.2017 «AutoRSS.04» *Сабитов Л.С., Кузнецов И.Л., Стрелков Ю.М.* Заявка 2017617846 от 21.07.2017г.

05.13.00

Е.П. Сеногноева, А.С. Морозов, А.В. Ромодин канд. техн. наук

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет,
электротехнический факультет, кафедра микропроцессорных средств автоматизации,
Пермь, romodin@msa.pstu.ru

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

Статья посвящена методике оценке структурной надежности системы электроснабжения предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Разработана модель и алгоритм работы оценки структурной надежности электрооборудования. Приводится апробация представленного подхода.

Ключевые слова: *система электроснабжения, структурная надежность, методика оценки, модель, алгоритм.*

Срок эксплуатации, износ оборудования оказывают сильное влияние на структурную надежность (далее по тексту - надежность) систем электроснабжения (СЭС) для потребителей ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Перерыв питания в СЭС, повреждение, авария влечет за собой экономический ущерб для предприятия. Поэтому разработка методики оценки и обеспечения заданного уровня надежности СЭС, является актуальной задачей для предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Для разработки методики необходимо: выбрать метод и разработать модель оценки надежности СЭС. При выборе метода оценки надежности проведен структурный анализ подходов, описанных в [1, 5]:

Аналитический метод [5]. Достоинства: наглядность, простота расчета. Недостатки: отражение только текущего состояния объекта (как факт), не учет структурных связей между объектами в системе. Ограничения: расчет с учетом эксплуатационных характеристик.

Логико-вероятностный метод [1]. Достоинства: оценка показателя риска отказа и экономического ущерба от отказа. Недостатки: трудоемкие математические расчеты, составление структурной схемы.

Таблично-логический метод [1]. Достоинства: можно выявить все виды возможных аварий, возникающих при наложении отказов элементов главной схемы на ремонтные и эксплуатационные режимы.

Метод Монте-Карло [1]. Недостатки: сложен в реализации, трудоемкие расчеты. Достоинства: может «сработать» там, где другие методы не справляются.

Исходя из имеющихся входных данных на предприятие ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» выбираем аналитический метод, так он обладает достаточной точностью, нагляден и прост в оценке показателя надежности и учитывает эксплуатационные характеристики оборудования.

Так как аналитический метод предполагает только количественную оценку, то требуется его дополнить. В результате дополнения метод позволит оценить надежность всей СЭС, как численно, так и качественно. Если по оценки надежность системы низкая, то можно точно решить, какое оборудование находится в наиболее худшем состоянии исходя из значения вероятности безотказной работы (P_t). На основе этого значения дополненный метод позволит предпринять те или иные мероприятия по повышению надежности оборудования и всей системы в целом.

Для реализации методики была разработана модель оценки надежности СЭС нефтедобывающей отрасли на рисунке 1.

Описание компонентов модели представлены в таблице 1.

Для реализации модели используется алгоритм на рисунке 2.

Рассмотрим пример участка схемы электроснабжения нефтедобычи из [3]. Исходные показатели взяты из этого источника требуется дополнить данными: дата ввода в эксплуатацию

/ дата последнего ремонта, текущая дата, срок службы, срок эксплуатации и P_i (таблица 2).

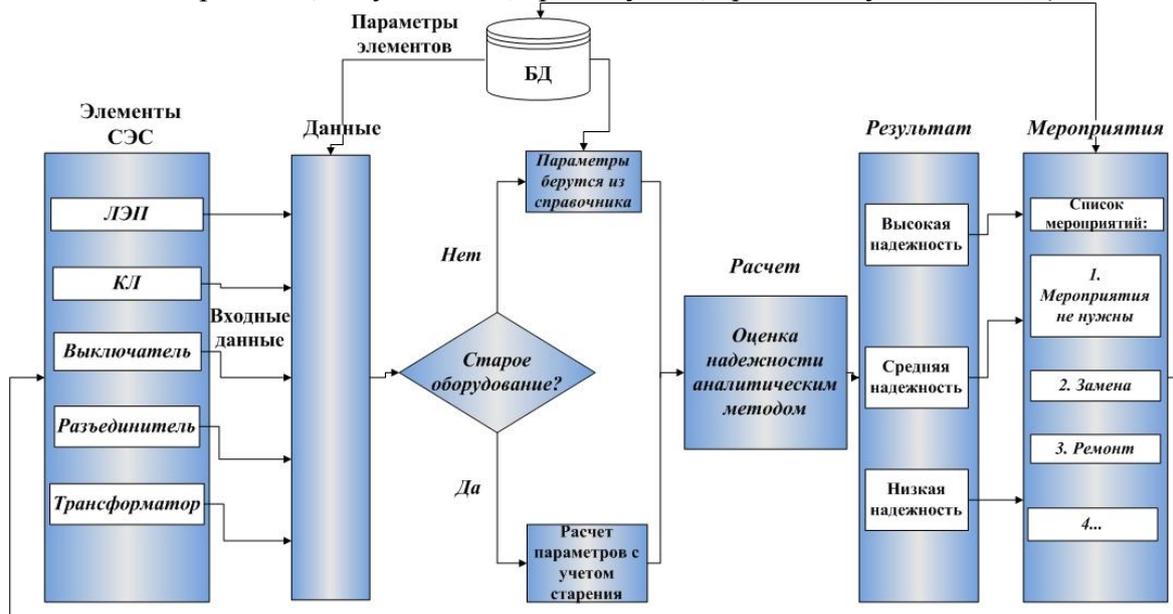


Рис. 1 – Модель оценки надежности СЭС нефтяного месторождения

Таблица 1 – Описание компонентов модели

Название блока	Описание компонента модели
Блок «Элементы СЭС»	Содержит список элементов на схеме. Список представлен в виде таблицы и включает в себя поля: тип элемента, № элемента на схеме.
Блок «Данные»	Поступает информация о параметрах элементах, такая как: дата ввода в эксплуатацию /дата последнего ремонта, текущая дата, срок службы, срок эксплуатации, $U_{ном}$, $P_{ном}$, l .
Блок «Условие: старое оборудование?»	Включает ответ на вопрос да или нет. Если да, то производим расчет параметров (ω , T_b , T_{cp}) с учетом старения элементов. Если нет, то параметры берутся из справочника [5].
Блок «Расчет»	Происходит оценка надежности с помощью аналитического метода [4].
Блок «Результат»	Содержит результат с численной и качественной оценкой надежности (P_i): высокая, средняя, низкая.
Блок «Мероприятия»	Содержит список мероприятий: номер, элемент, мероприятие.



Рис. 2 – Алгоритм реализации методики оценки надежности СЭС нефтяного месторождения

Таблица 2 – Параметры элементов СЭС нефтедобычи

Тип элемента	№ элемента	Дата ввода в эксплуатацию/ дата последнего ремонта	Текущая дата	Срок службы, год	Срок эксплуатации, год	P_t
Выключатель масляный	1,3	01.01.2000	01.01.2017	25	17	0,86
Трансформатор масляный	5	01.01.2005	01.01.2017	20	12	0,91
Выключатель элегазовый	6	01.01.2000	01.01.2017	25	17	0,69
Трансформатор сухой	7	01.01.2010	01.01.2017	20	7	0,95
Автоматический выключатель	8	01.01.2012	01.01.2017	15	5	0,78
	9	01.01.2013	01.01.2017		4	0,82
	11	01.01.2013	01.01.2017		4	0,82
	13	01.01.2013	01.01.2017		4	0,82
	15	01.01.2010	01.01.2017		7	0,70
	17	01.01.2011	01.01.2017		6	0,74
Кабельная линия	2,4	01.01.2007	01.01.2017	30	10	0,97
	10,12	01.01.2013	01.01.2017		4	0,99
	14,16	01.01.2013	01.01.2017		4	0,98
	18	01.01.2014	01.01.2017		3	0,98

Для экспресс-оценки надежности системы методом эквивалентирования воспользуемся формулами для параллельного и последовательного соединения из [4]. В ходе расчета были получены значения для всей системы в целом равные: $\omega_c = 0,0880 \frac{1}{\text{год}}$, $T_{bc} = 0,0030$ год, $P_{tc} = 0,45$.

Так как в методике были предложены диапазоны надежности: низкая ($x < 0,4$); средняя ($0,4 < x < 0,86$) и высокая ($x > 0,86$). Проанализировав данную систему по рассчитанным параметрам надежности можно сказать, что система находится не в лучшем состоянии и имеет средний диапазон надежности. Вероятность отказа системы выше, чем без отказа. Для повышения безотказной работы изменить нужно эксплуатационные характеристики наиболее худших элементов (т. е. применить мероприятия) для таких элементов: выключатель элегазовый (6), автоматический выключатель (8), автоматический выключатель (9, 11, 13), автоматический выключатель (15, 17), выключатель масляный (1, 3). Приведем мероприятия для каждого из худших элементов в таблице 3. После применения мероприятий для 1, 2, 3, 10 и для всех элементов, получим график изменения значения надежности на рисунке 3.

Таблица 3 – Пример мероприятий по повышению надежности элементов

Название худшего элемента	Описание мероприятий
Выключатель элегазовый	Проверка и выравнивание давление элегаза; проверка герметичности полюсов баков и всех соединений газовой системы, устранение выявленных утечек; очистка изоляторов вводов от внешних загрязнений, проверка отсутствия трещин и сколов; проверка работы мониторов давления газа, регулировка.
Выключатель автоматический	Очистить детали автомата от пыли, грязи и копоти; проверить затяжку болтов, винтов и гаек; проверить состояние главных контактов; проверить зазоры в контактной системе; зачистить контакты цепей управления, при необходимости заменить запасными; зачистить контакты цепей управления, при необходимости заменить запасными; проверить работу механизма свободного расцепления; проверить работу дополнительных (специальных) расцепителей и максимально-токовых расцепителей.
Выключатель масляный	Замена изношенных уплотнений, заливка дегазированным маслом или, при необходимости, полная замена масла, ремонт контактных узлов вводов, при необходимости, замена вводов всех напряжений; ремонт дугогасительных камер с заменой изношенных деталей, внутри баковой изоляции и шунтирующих устройств; трансформаторное масло: сушка, очистка, дегазация (для вводов), регенерация.



Рис. 3 – Значения надежности при изменении параметров элементов

Из рисунка 3 можно сделать вывод, что при своевременном проведении мероприятий по повышению структурной надежности оборудования, увеличивается ее срок службы.

Разработанная методика позволит оценить уровень структурной надежности и подобрать мероприятия, направленные на снижение количества и продолжительности перерывов электроснабжения нефтепромысловых объектов

Список литературы

1. *Русан В. И., Пухальская О. Ю.* Метод расчета надежности схем распределительных электрических сетей сельскохозяйственного назначения на основе применения функций алгебры логики // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2012. №2.
2. *Петроченков А. Б., Ромодин А. В.* Разработка подходов к построению комплекса «Энергооптимизатор» // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2013. № 4. С. 20-25.
3. *Е.П. Сеногноева, А.А. Бачурин.* РАСЧЕТ И ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ УЧАСТКА СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСИ // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. - №4. С. 182-184.
4. *Анищенко. В.А.* Основы надежности систем электроснабжения: пособие для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» специализации 1-43 01 03 01 «Электроснабжение промышленных предприятий» / В.А. Анищенко, И.В. Колосова. - Мн.: БИТУ, 2007.
5. *Гук. Ю.Б.* Теория надежности в энергетике. Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1990. – 208 с.

05.13.11

А.Б. Сорокин канд. техн. наук, Е.А. Зикеева

МИРЭА - Московский технологический университет,
Институт информационных технологий, кафедра вычислительной техники,
Москва, ab__sorokin@mail.ru, zikeeva97@yandex.ru

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ТЕКСТУРЕ МАТЕРИАЛА

Проведено исследование алгоритмов определения численных коэффициентов различных свойств материала, реализовано программное приложение для определения типа материала на основе значений его свойств.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, распознавание объектов, определение текстуры материала, машинное обучение.

Существует ряд задач, требующих определения текстур объектов, фигурирующих на анализируемом изображении. Например, исследование местности по изображениям, получаемым с помощью самолетных и спутниковых устройств, автоматизация работы роботов, в задачи которых входит распознавание, удержание и перемещение объектов, биомедицинские исследования, и прочее.

Идея распознавания текстуры, описанная в данной работе, заключается в оценке численных значений различных ее свойств, так называемых текстурных описателей. Для набора тренировочных изображений с различной текстурой вычисляются значения текстурных описателей. Данные значения подаются на входы обучаемой нейронной сети, выходами которой являются показатели сходства ее с определенными типами.

Далее новое изображение подвергается подсчету того же набора текстурных описателей, которые рассчитывались и для тренировочных изображений и подаются на входы нейронной сети, которая оценивает его принадлежность к определенной текстуре. Для оценки свойств материала существует множество методов.

1. Методы, использующие матрицу смежности.

Один из аспектов текстуры связан с пространственным распределением и пространственной взаимозависимостью значений яркости локальной области изображения [1]. Статистики пространственной взаимозависимости значений яркости вычисляются по матрицам переходов значений яркости между ближайшими соседними точками (Рис. 1). Обозначим эту матрицу $P(i, j, d, \varphi)$, где i и j – яркости соседних точек на изображении, расположенных на расстоянии d друг от друга, при угловом направлении φ .

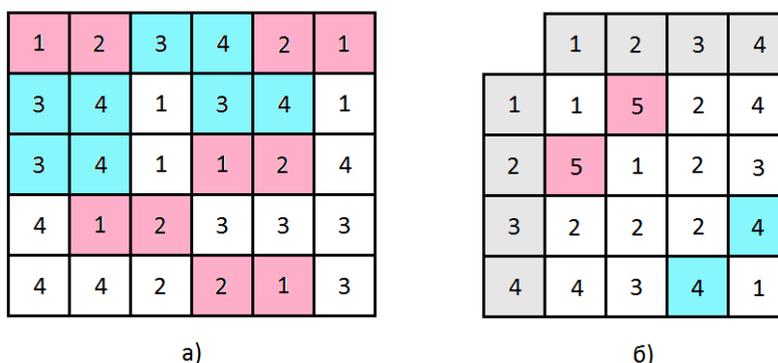


Рис. 1 - а) Исходная матрица изображения; б) Сформированная матрица смежности с параметрами $d = 1, \varphi = 0$

Размер матрицы определяется количеством градаций яркости изображения. Так, на рисунке выше показано исходное изображение с градациями интенсивности от 1 до 4 (для полутонового изображения градации меняются от 0 до 255). Значение каждого элемента матрицы равно количеству встречаемости пары пикселей с соответствующими значениями интенсивностей в заданных позициях друг относительно друга. Например, встречаемость пары со значением (1, 2) в исходном изображении при условии расположения смежной пары на одной строке равна 5, а встречаемость пары со значением (3, 4) – 4.

Поскольку число таких матриц может быть очень большим, обычно ограничиваются лишь рассмотрением пикселей, находящиеся в непосредственной близости, либо усредняют матрицы, составленные для различных ориентаций.

Опытным путем было определено, что в совокупности с матрицами низкого порядка, т.е. матрицами, определяемыми при низких значениях расстояния $d < 5$, выгодно использовать матрицы высокого порядка, для расстояния d между пикселями более 10.

По матрице совместной встречаемости вычисляется около двадцати признаков [2], ниже приведены наиболее употребляемые из них:

- Степень однородности или энергия (чем меньше значение – тем менее однородно изображение): $\sum_{i,j} p_{ij}^2$
- Энтропия: $\sum_{i,j} p_{ij} * \log_2 |p_{ij}|, p_{ij} \neq 0$
- Контраст: $\sum_{i,j} (i - j)^2 * p_{ij}$
- Гомогенность: $\sum_{i,j} \frac{p_{ij}}{1+(i-j)^2}$

2. Методы, основанные на измерении длин серий яркости.

Серия — это максимальная связанная совокупность вытянутых в прямую линию пикселей одинаковой яркости. Серия характеризуется яркостью, длиной и направлением.

На Рис 2б изображения матрица длин серий яркости, где I – значение яркости, J – длина серии, (I, J) – количество соответствующих серий.

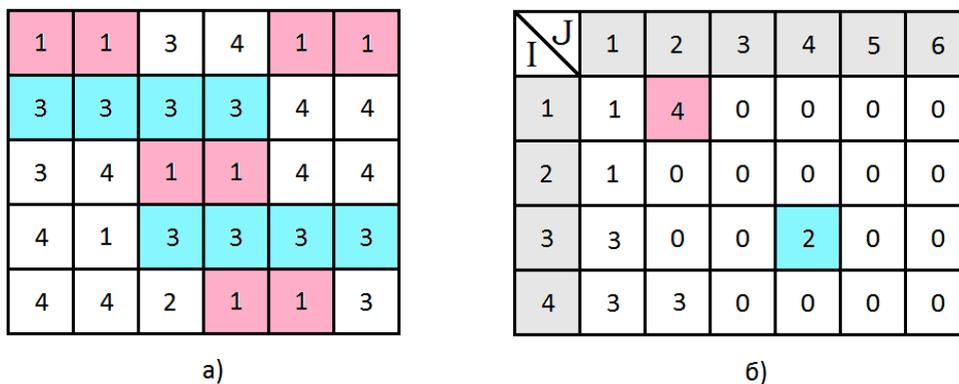


Рис. 2 - а) Исходная матрица изображения; б) Матрица длин серий яркости для направления $\varphi = 0$

Обозначим N_g – число возможных значений яркости (256), N_r – число возможных длин серий, а $p(i, j)$ – число серий длины j с яркостью i . Выделяют [3] следующие статистики величины $p(i, j)$ для анализа текстур:

- SRE — Short Run Emphasis (Обратные моменты возрастают при коротких сериях):

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} j^2 * p(i, j)}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)}$$

- LRE — Long Run Emphasis (Моменты увеличены при длинных сериях):

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} \frac{p(i, j)}{j^2}}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)}$$

- GLNU — Gray Level Non-uniformity (Неоднородность яркости):

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)}$$

- RLNU — Run Length Non-uniformity (Неоднородность длины серии):

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} (\sum_{j=1}^{N_r} p(i, j))^2}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)}$$

- RPC — Run Percentage (Доля изображения в сериях):

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} p(i, j)}{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_r} j * p(i, j)}$$

Таким образом, можно акцентировать различные свойства текстуры и использовать их в качестве ее признаков.

При реализации анализатора следует принимать во внимание, что некоторые параметры могут быть зависимы от размеров изображения. Учитывая это, следует привести размер всех анализируемых изображений к единому, либо значения определяемых свойств должны быть разделены на размер анализируемого изображения, в пикселях.

Кроме того, для последующего использования значений текстурных свойств в качестве входных значений нейронной сети, они должны быть помножены на некоторые коэффициенты, позволяющие привести значения к диапазону [0, 1]. Подобные коэффициенты в данной работе не приведены, поскольку для различного набора исследуемых типов текстур они могут отличаться. Кроме того, процедуру их поиска можно программно автоматизировать.

Реализация совокупности представленных в работе методов позволяют достичь 75% точности определения типа материала для следующего набора исследуемых текстур: дерево, ткань, вязаная ткань, кирпичная кладка, стекло, металл, золото, ржавчина, кожа, пластик. При этом наибольшая часть неверных ответов составляют ошибки в парах дерево-ткань и металл-стекло. Данную проблему можно решить, разработав алгоритм определения изотропности материала. Изотропные материалы имеют одинаковые свойства во всех направлениях, анизотропные - разные. Изотропными материалами являются металлы, камни, бетон, некоторые пластмассы. Текстура ткани со сниженной глубиной цвета также будет иметь высокое значение изотропности. Текстура же дерева в большинстве своем является анизотропной. Таким образом, ошибки в определении типа текстуры в парах дерево-ткань будут снижены. Предположительно, определение изотропности повысит качество оценки и в проблемной паре металл-стекло.

Помимо описанных методов для реализации искусственной нейронной сети использовались также методы, основанные на гистограмме пространственной разности яркостей.

Существуют и другие методы оценки текстурных свойств, такие как метод бегущих длин, метод LBP-гистограмм, и прочие. Используя их, можно также повысить вероятность правильных ответов искусственной нейронной сети.

Список литературы

1. Харалик, Р.М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИРЭ – 1979. – Т. 67. – № 5. 4
2. И.Л. Ковалева. Текстурные признаки изображений. Минск: БНТУ. – 2010., 26 с.
3. Скобцов Ю.А., Родин Ю.В., Оверко В.С. Моделирование и визуализация поведения потоков крови при патологических процессах. — Донецк: Издатель Заславский А.Ю., 2008. — 212 с.

05.13.18

Е.В. Субботин канд. техн. наук, Ю.М. Хасянова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
электротехнический факультет, кафедра конструирования и технологий в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ПРЕБЫВАНИЯ ПОЛИМЕРА ПРИ ТЕЧЕНИИ В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОШНЕКОВОГО ЭКСТРУДЕРА

В статье с помощью математического моделирования исследуется влияние технологических параметров работы одношнекового экструдера на распределение времен пребывания расплава полимера в зоне дозирования. Рассмотрено течение нагревостойкого полимерного материала в канале экструдера с кабельной головкой и открытым выходом.

Ключевые слова: экструзия, расплав полимера, математическое моделирование, распределение времен пребывания.

При экструзии современных полимерных композиций, эксплуатационные характеристики которых могут существенно зависеть от температуры [1], нередко требуется учитывать не только ее значение, но и время воздействия на материал. В связи с этим, особый интерес при переработке полимеров представляет информация о распределении времен пребывания (РВП) материала в экструдере [2].

В данной статье, с помощью математического моделирования [3], проводится исследование влияния технологических параметров работы одношнекового экструдера на РВП расплава нагревостойкого полимера в зоне дозирования.

Численный эксперимент проводился для экструдера (см. таблицу 1) с кабельной головкой и открытым выходом. Перерабатываемый материал - полиэфирэфиркетон (РЕЕК). Реологические и теплофизические свойства РЕЕК представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Геометрия одношнекового экструдера

Внутренний диаметр цилиндра (корпуса) D, мм	45,0
Наружный диаметр шнека, мм	44,8
Шаг винтовой нарезки, мм	45,0
Ширина канала W, мм	38,8
Ширина гребня винтовой нарезки S, мм	4,1
Длина геометрической зоны дозирования, витки	10
Глубина канала в зоне дозирования H_2 , мм	3
Угол подъема винтовой линии Θ , град	17,66°
Радиальный зазор между гребнем шнека и внутренней поверхностью корпуса, δ мм	0,1

Таблица 2 – Реологические и теплофизические свойства РЕЕК

n	μ_0	T_0	β	T_{II}	ρ_s	ρ_m	λ_s	λ_m	C_s	C_m
–	Па·с ⁿ	°C	1/°C	°C	кг/м ³		Вт/(м·°C)		Дж/(кг·°C)	
0,72	1290	360	0,008	345	1320	1120	0,290	0,290	1550	1860

Температура на входе в зону дозирования принималась равной 365°C, температура цилиндра и шнека – 370°C и 367°C соответственно.

Остальные технологические параметры для различных вариантов расчетов представлены в таблице 3.

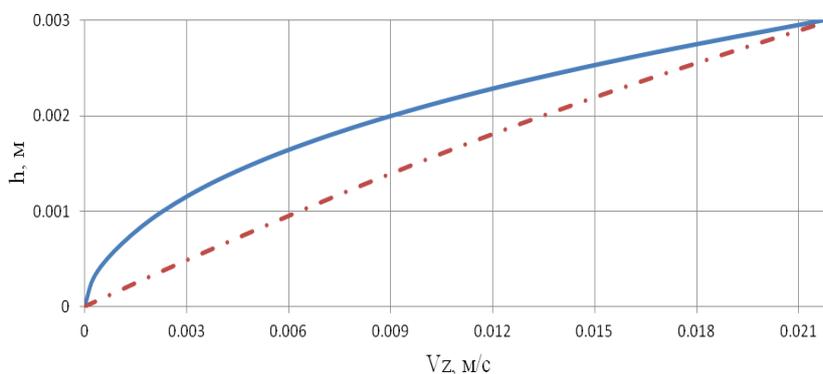
Таблица 3 – Варианты расчетов

Nш, об./мин	Tвх, °C	Tш, °C	Tц, °C	G ₀ , кг/с	
				С кабельной головкой	С открытым выходом
10	365	367	370	0,0009	0,0013
20				0,0017	0,0026
30				0,0025	0,0040
40				0,0034	0,0053
50				0,0042	0,0066
60				0,0049	0,0079

Численные исследования проводились с помощью программного комплекса ANSYS. Канал в зоне дозирования развернутый на плоскость разбивался на 380000 элементов. По полученным полям составляющих скоростей рассчитывались время пребывания и траектория движения частиц, каждая из которых представляла небольшой объем расплавленного полимера. Затем определялось РВП.

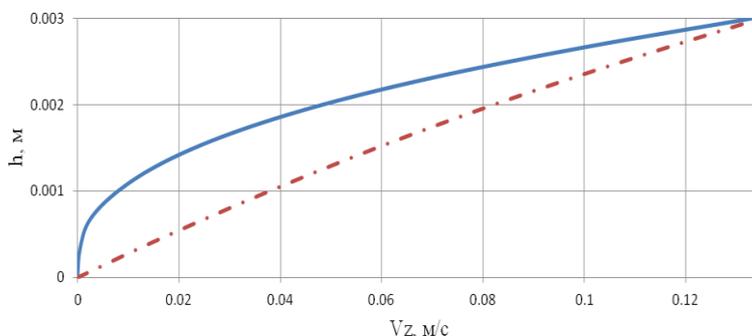
На рисунках 1 и 2 представлены эпюры продольной компоненты скорости и распределение времен пребывания для экструдера с кабельной головкой и открытым выходом.

Сравнительный анализ результатов показал, что с увеличением скорости вращения шнека происходит смещение РВП в область более низких временных значений, а его ширина, которая определяется как разница максимального и минимального времени пребывания, уменьшается.



— G=0.0009 кг/с - с кабельной головкой - - G=0.0013 кг/с - с открытым выходом

а



— G=0.0049 кг/с - с кабельной головкой - - G=0.0079 кг/с - с открытым выходом

б

Рис. 1 – Распределение продольной компоненты скорости по высоте канала на выходе из экструдера для: а – 10 об./мин, б – 60 об./мин

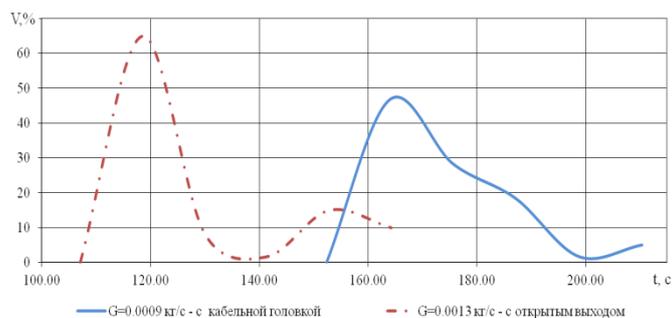
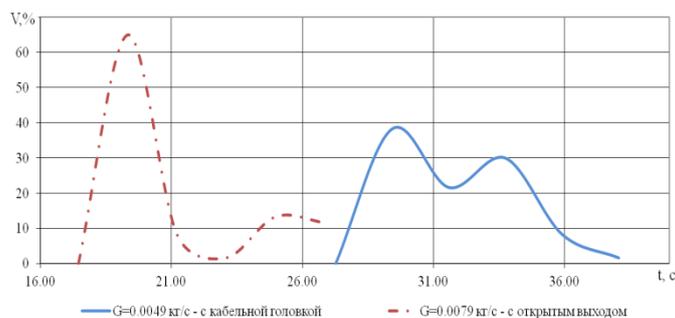
*а**б*

Рис. 2 – Распределение времен пребывания расплава полимера в зоне дозирования для:
а – 10 об./мин, *б* – 60 об./мин

Также следует отметить, что сопротивление на выходе экструдера, зависящее от кабельной головки, в общем случае приводит к увеличению времени пребывания полимера в экструдере и увеличению ширины РВП.

На рисунке 3 представлены зависимости ширины распределения времен пребывания от скорости вращения шнека для экструдера с кабельной головкой и открытым выходом. Видно, что данные зависимости носят нелинейный характер.

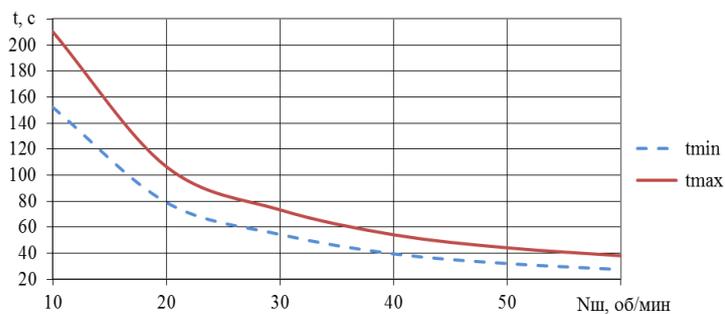
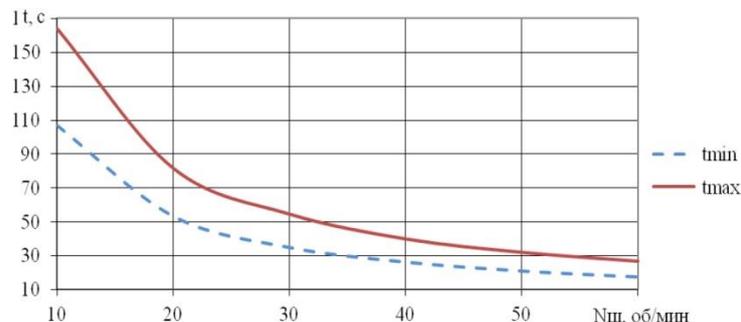
*а**б*

Рис. 3 – Зависимость минимального и максимального времени пребывания расплава полимера в зоне дозирования от скорости вращения шнека для экструдера с:
а – кабельной головкой, *б* – открытым выходом

Подводя итог, можно сделать вывод, что вероятность возникновения термической деструкции полимера в канале экструдера уменьшается при увеличении массового расхода и снижении сопротивления на выходе, вносимого кабельной головкой. Проведение подобных исследований будет иметь большое практическое значение для материалов, свойства которых могут существенно изменяться в условиях длительного температурного воздействия.

Список литературы

1. *Лина В., Чамов А.В.* Экструзия полимеров, не поддерживающих горение // Наука и техника. 2003. № 6(283). С. 17–20.
2. *Раувендааль К.* Экструзия полимеров / Пер. с англ. Под ред. А.Я. Малкина – СПб.: Профессия, 2006. 768 стр., ил.
3. *С.В. Еришов, Н.М. Труфанова, М.Д. Лукин.* Численное исследование процессов течения расплава полимера в канале зоны дозирования и формующем инструменте // Машиностроение, материаловедение. 2017. Т.19, №3. С. 163–178.

05.13.18

А.Э. Файзуллин, Н.М. Труфанова д-р техн. наук

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Электротехнический факультет, Кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, artur96.07@mail.ru, ktei@pstu.ru

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЕ

В данной работе была разработана математическая модель процессов теплопереноса нефти в вертикальной скважине, рассмотрено распределение температуры по длине нефтяной скважины и было исследовано влияние различных факторов на температурный режим работы скважины. Также проведено сравнение турбулентного и ламинарного течения нефтяной жидкости.

Ключевые слова: *нефтяная скважина, численные методы, теплоперенос, дебит, температурное поле.*

Одной из проблем в нефтяной отрасли является выпадение парафиновых отложений на внутренних поверхностях стенок труб, по которым движется нефтяная жидкость. Решение задачи по предотвращению формирования парафиновых отложений позволяет снизить текущие и капитальные затраты в технологии нефтедобычи. Для этого нужно поддерживать температуру в нефтяной скважине выше температуры выпадения парафиновых отложений. В данной работе температура выпадения парафина принималась равной 40 °С.

Постановка задачи.

Рассматриваем продольное сечение глубиной 2000м. Конструкция скважины изображена на рисунке 1.

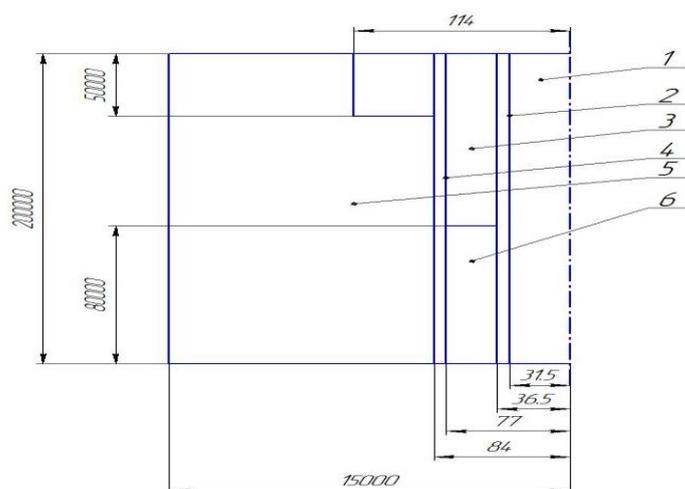


Рис. 1 Конструкция нефтяной скважины.

- 1) Нефтяная жидкость, которая добывается насосно-компрессорной трубой;
- 2) Насосно-компрессорная труба; 3) Воздух в затрубном пространстве; 4) Обсадная колонна; 5) Грунт, окружающий скважину; 6) Нефтяная жидкость, в затрубном пространстве

Математическая модель движения и теплопереноса в нефтяной скважине основывается на законах сохранения массы, количества движения и энергии.

Были приняты следующие допущения: задача осесимметричная, стационарная, течение турбулентное, теплофизические свойства твердых материалов и нефтяной жидкости не зависят от температуры, бесконечный массив земли заменен ограниченной областью, нефтяная жидкость - однородная среда.

С учетом сделанных допущений система дифференциальных уравнений имеет вид

Уравнение движения:

$$\rho(U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$\rho(U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

Уравнение теплопроводности для нефтяной жидкости:

$$\rho c \left(U_x \frac{\partial T}{\partial x} + U_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda_H \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + q_v \quad (3)$$

Уравнение теплопроводности для твердых элементов конструкции скважины и воздуха:

$$\lambda_i \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (4)$$

где x, y – декартовы координаты; U_x, U_y – компоненты вектора скорости нефти в насосно-компрессорной трубе; t – температура, °C; P – отклонения давления воздуха от гироскопического; ρ, μ – плотность и вязкость нефти; q_v – мощность внутреннего диссипативного источника тепла; λ_i – теплопроводность материалов (грунт, цемент, сталь, нефть, воздух).

На границе раздела разнородных сред задали равенство тепловых потоков и температур:

$$T|_n = T|_{n+1} \quad (5) \quad \lambda_n \frac{\partial T^{(n)}}{\partial x} = \lambda_{n+1} \frac{\partial T^{(n+1)}}{\partial x} \quad (6)$$

На границе массива земли, окружающего скважину, задали температуру, соответствующую геотерме:

$$T_{гр.зем.} = T(h), \quad (7)$$

В забое скважины задали температуру забоя ($T=57$ °C) и расход через столб насосно-компрессорной трубы (20 т/сут):

$$T|_{h=2000} = T_{забой} = 57^\circ C \quad (8) \quad Q|_{h=0} = Q|_{h=2000} = 20 \text{ м}^3/\text{сут} \quad (9)$$

Температура на поверхности земли равна -3 °C.

Таблица 1. Свойства конструктивных элементов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость C , Дж/(кг·K)	Теплопроводность λ Вт/(м·K)	Вязкость μ кг/(м·с)
Грунт	1900	1680	1,82	-
Цемент	1400	900	0,85	-
Сталь	8030	502,48	16,27	-
Нефть	743,5	2000	0,15	0,4416
Воздух	1,225	1006,43	0,0242	1,78e-05

Результаты исследования

В данной работе сделано исследование влияния температуры забоя и дебита на распределение температуры скважины. Так же было проведено сравнение турбулентного и ламинарного течения нефтяной жидкости. В результате были получены распределения температур нефтяной жидкости по глубине скважины, которая добывается насосно-компрессорной трубой (НКТ).

Задача решалась численно, методом конечных элементов. Для расчетов использовалась среда инженерных расчетов ANSYS Fluent.

Сходимость численного решения оценивалось по величине средней температуры на НКТ. Были определены: необходимое число узлов и количество итераций, которые составили 9200000 и 11000 соответственно.

В результате численной реализации поставленной задачи были получены поля температур во всем объеме нефтяной скважины. На рисунке 2 представлены поля температур для различных режимов течения - ламинарного и турбулентного. Из рисунка видно, что при турбулентном течении температура нефти по сечению выравнивается и ее значения

существенно ниже.

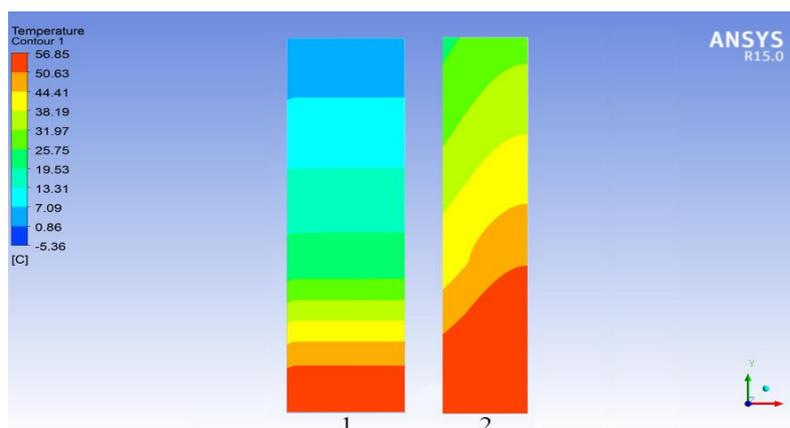


Рис. 2. Температурное поле скважины при различном режиме течения.
1 – Турбулентное течение; 2 – Ламинарное течение.

На рисунке 3 приведено изменение температуры в центре скважины для различных режимов течения нефтяной жидкости. Видно, что температура в устье скважины при турбулентном течении на 16°C меньше, чем при ламинарном течении. Это является существенным уменьшением, влияющим на длину участка возможного выпадения парафинов на стенке НКТ, которая при турбулентном течении возрастает на 30,9%.

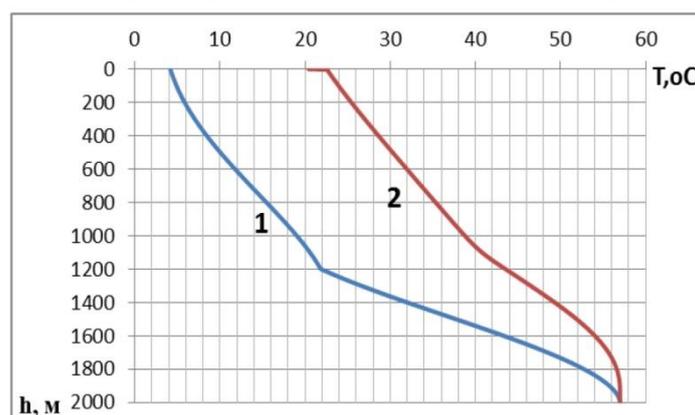


Рис.3. Распределения температур в центре скважины по глубине для скважин при различном режиме течения. 1 – Кривая, полученная при турбулентном течении;
2 – Кривая, полученная при ламинарном течении.

На рисунке 4 а можно увидеть, что с увеличением дебита, температура в нефтяной скважине увеличивается. Это объясняется тем, что нефтяная жидкость не успевает существенно охлаждаться, так как возрастает скорость движения нефтяной жидкости.

Зависимость температуры нефтяной жидкости в центре канала НКТ при дебите равном 20 т/сут в зависимости от температуры забоя приведена на рисунке 4 б. Можно отметить, что температура в забое влияет на распределение температуры в нефтяной скважине. Чем больше температура в забое, тем меньше участок выпадения парафиновых отложений. При увеличении температуры с 44°C до 64°C длина участка уменьшается на 3,3%.

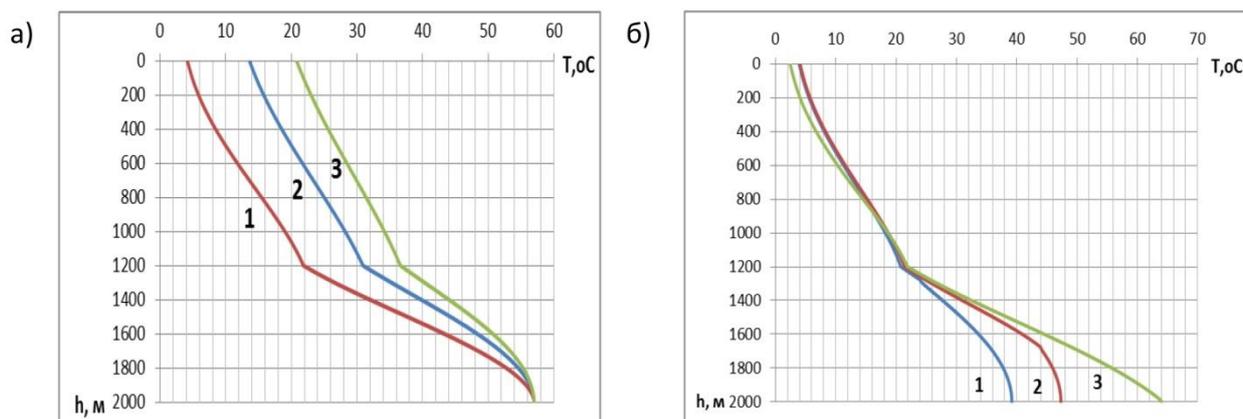


Рис. 4 а) Распределения температур в центре скважины по глубине для скважин с различным дебитом. 1 – Кривая, полученная при дебите 20 т/сут; 2 – Кривая, полученная при дебите 40 т/сут; 3 – Кривая, полученная при дебите 60 т/сут; б) Распределения температур в центре скважины по глубине для скважин с различной температурой забоя. 1 – Кривая, полученная при температуре в забое 24 °С; 2 – Кривая, полученная при температуре в забое 44 °С; 3 – Кривая, полученная при температуре в забое 64 °С.

Таким образом, разработанная математическая модель процессов тепломассопереноса в нефтяной скважине позволяет получить температурное поле по длине и поперечном сечении скважины и оценить влияние различных параметров (дебит, температура в забое, режим течения) на длину участка отложения парафина на стадии проектирования скважины. Это дает возможность принять меры по профилактике образования парафиновых отложений и снизить затраты по эксплуатации скважин.

Список литературы

1. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. - 653 с.
2. Сорокин С.А., Хавкин С.А. Особенности физико-химического механизма образования АСПО в скважинах // Бурение и нефть. 2007. №10. С. 30-31.
3. Tarom N., Hossain M.M. Using ANSYS to Realize a Semi-Analytical Method for Predicting Temperature Profile in Injection/Production Well // World Academy of Science, Engineering and Technology 72 2012
4. H.J. Ramey, Jr., Wellbore heat transmission, Journal of Petroleum Technology 14 (4), 872-875
5. Труфанова Н.М. Переработка полимеров: учеб. пособие. Пермь:Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009 -159 с.

05.13.18

А.Г. Щербинин д-р техн. наук, А.И. Кабирова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 Электротехнический факультет, кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
 Пермь, ktei@pstu.ru, alina.linchik@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

С помощью математического моделирования магнитных полей определены индуктивности силовых кабелей с токопроводящими жилами круглой и секторной формы. Для круглых токопроводящих жил проведено сравнение значений индуктивности, рассчитанных численным и аналитическим методами. Исследовано влияние толщины изоляции на индуктивность.

Ключевые слова: *индуктивность, изоляция, токопроводящая жила, численный метод, аналитический метод.*

Величина индуктивности силовых кабелей представляет интерес для потребителей кабельной продукции. Поскольку данная величина не нормируется, кабельные предприятия не проводят ее измерение. Поэтому вычисление индуктивности силовых кабелей является актуальной задачей.

Индуктивность кабелей, работающих на промышленной частоте, можно определить из решения магнитостатической задачи. При построении математической модели принимается, что изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля (рис. 1). Тогда дифференциальные уравнения для векторного магнитного потенциала для проводящей и диэлектрической среды выглядят следующим образом:

$$\text{Проводящая среда: } \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + J = 0 \quad (1)$$

$$\text{Диэлектрическая среда: } \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_a} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0 \quad (2)$$

где A – магнитный потенциал (в двухмерной постановке направлен по координате z); μ_a – абсолютная магнитная проницаемость; σ – удельная электропроводность; J – плотность тока в токопроводящей жиле (ТПЖ), определяемая по заданной величине постоянного тока по формуле

$$J = \frac{I}{S_c} \quad (3)$$

где S_c – площадь поперечного сечения проводника.

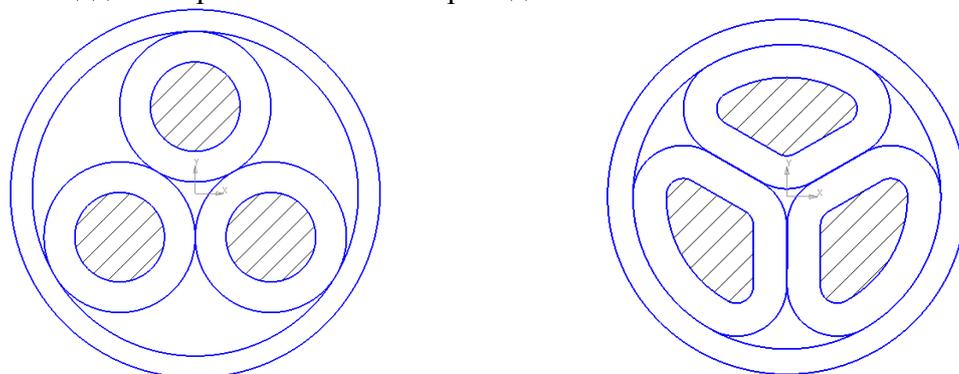


Рис. 1. Схема поперечного сечения кабеля с ТПЖ круглой и секторной формы [1] сечением 240 мм^2 с расчетной областью

На границе расчетной области задается условия Робина

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} A = 0, \quad (4)$$

которое реализует равенство нулю векторного магнитного потенциала на бесконечно удаленной границе. В формуле (4): ρ – расстояние от проводника до границы расчетной области.

Задача решается методом конечных элементов с помощью программного пакета моделирования ANSYS Maxwell. По полученному распределению векторного магнитного потенциала определяется напряженность магнитного поля (рис. 2, 3) и формируется матрица индуктивных коэффициентов, с помощью которой рассчитывается полная индуктивность кабеля[2].

Вычислим индуктивности силовых кабелей с круглыми и секторными токопроводящими жилами сечением 240 мм^2 с толщиной изоляции, изменяющейся от 1 мм до 6 мм с шагом 1 мм. Результаты вычисления индуктивных коэффициентов для кабеля с секторными ТПЖ и толщиной изоляции 6 мм представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Значения индуктивных коэффициентов

L_{11} , мкГн	L_{12} , мкГн	L_{13} , мкГн	L_{22} , мкГн	L_{23} , мкГн
1,00790	0,74527	0,74524	1,00790	0,74524

Значения частичных индуктивностей рассчитываются по формулам

$$\begin{cases} L_1 = L_{11} - L_{12} \\ L_2 = L_{22} - L_{23} \\ L_3 = L_{11} - L_{13} \end{cases} \quad (5)$$

Тогда полная индуктивность вычисляется как

$$L = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \quad (6)$$

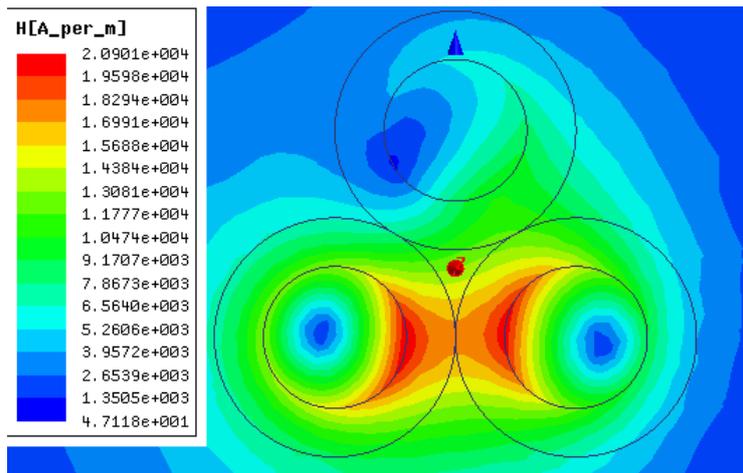


Рис.2 Распределение напряженности магнитного поля в поперечном сечении кабеля с круглыми ТПЖ

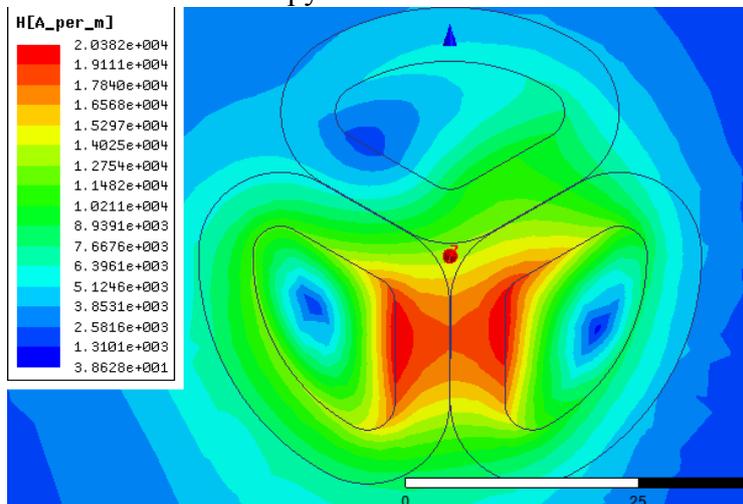


Рис.2 Распределение напряженности магнитного поля в поперечном сечении кабеля с секторными ТПЖ

Проверка полученных численным методом значений индуктивности кабеля с круглыми токопроводящими жилами производилась путем сравнения с индуктивностями, вычисленными по аналитическим формулам [2] (таблица 2). Из таблицы 2 видно, что расхождение между результатами вычислений не превышает 0,25%.

Таблица 2 - Индуктивность кабелей с круглыми токопроводящими жилами

Метод решения	Толщина изоляции, мм					
	1	2	3	4	5	6
Аналитический метод, мкГн	0,2103	0,2299	0,2477	0,2641	0,2792	0,2932
Численный метод, мкГн	2,101	0,2296	0,2473	0,2636	0,2787	0,2926
Отклонение, %	0,084	0,111	0,128	0,182	0,189	0,232

Вычисление индуктивностей для силовых кабелей с ТПЖ секторной формы возможно только с использованием численного моделирования.

На рис. 5 показаны зависимости индуктивности силовых кабелей с круглыми и секторными ТПЖ от толщины изоляции. Из рисунка видно, что для обоих кабелей увеличение толщины изоляции с 1 до 6 мм приводит к увеличению индуктивности примерно на 0,08 мкГн за счет увеличения межпроводниковой индуктивности. Кроме того, за счет более плотной конструкции кабелей с секторными жилами их индуктивность меньше индуктивности кабелей с круглыми ТПЖ на 0,03 мкГн.

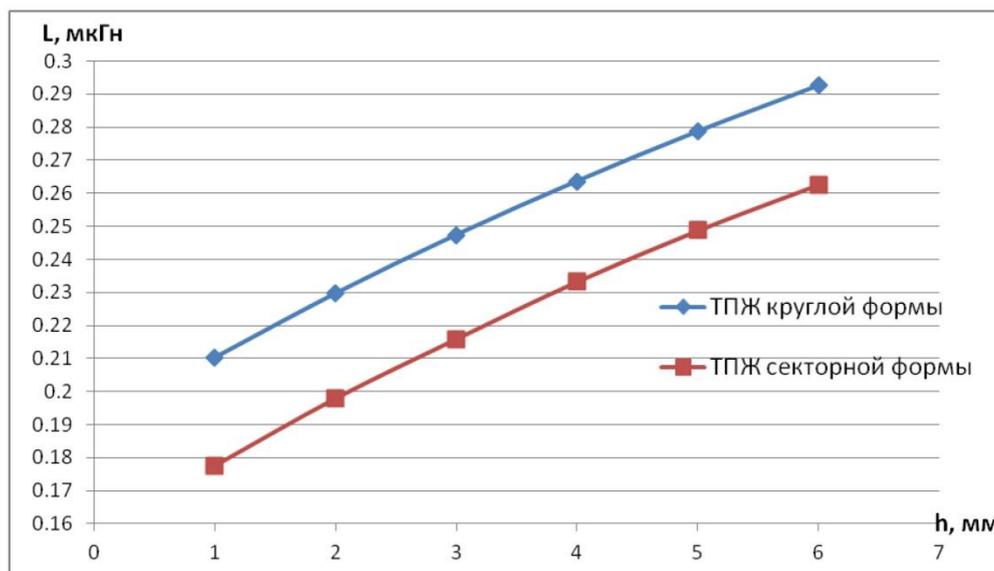


Рис. 5 Зависимость индуктивности ТПЖ от толщины изоляции

Таким образом, предложенную методику можно использовать для определения индуктивностей кабелей, имеющих более сложную конструкцию. Результаты расчёта могут быть использованы для практических целей при проектировании кабельных линий.

Список литературы

1. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. 2011. № 3 (328). С. 14–17.
2. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., Л.: Ленингр. Отд-ние, 1986. 179 с.

05.13.18

А.Г. Щербинин д-р техн. наук, Д.Ю. Корюкин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 Электротехнический факультет, кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
 Пермь, ktei@pstu.ru, koryukin-95@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ

В статье рассмотрено определение сопротивления переменному току токопроводящих жил секторной формы с учетом влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Объектом исследования являются круглые и секторные жилы сечением 240 мм². Получено распределение плотности тока в рассматриваемых жилах и проведен анализ результатов рассчитанных сопротивлений по методу описанному в ГОСТ Р МЭК, аналитическим способом, а также с использованием программного пакета моделирования ANSYS Maxwell.

Ключевые слова: сопротивление, плотность тока, поверхностный эффект, эффект близости, токопроводящая жила.

В кабельной технике для определения токовых нагрузок и расчета потерь в токопроводящих жилах используют ГОСТ Р МЭК 60287. Однако методика, описанная в данном документе, не позволяет точно определить сопротивление переменному току жил секторной формы и более сложных конструкций [1]. Таким образом, разработка модели электромагнитных процессов в секторных жилах и соответствующей ей методики определения сопротивления проводников переменному току является актуальной темой и представляет научный интерес.

Для определения сопротивления токопроводящих жил силовых кабелей с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости необходимо решать магнитодинамическую задачу [2,3].

Для решения поставленной задачи были сделаны следующие допущения: изменение магнитного поля происходит в поперечном сечении кабеля; токи смещения не учитываются; поскольку все величины изменяются по гармоническому закону, используется метод комплексных амплитуд. Исходя из принятых допущений, дифференциальные уравнения для комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала A для проводящей и диэлектрической среды выглядят следующим образом:

Проводящая среда

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - i\omega\sigma A + J_s = 0 \quad (1)$$

Диэлектрическая среда

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_\alpha} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = 0, \quad (2)$$

где A – магнитный потенциал (в двумерной постановке направлен по координате Z); μ_α – абсолютная магнитная проницаемость; σ – удельная электропроводность; J_s – плотность тока, определяемая законом Ома в дифференциальной форме $J_s = -\sigma \nabla \varphi$, величина J_s в пределах одного проводника есть величина постоянная; $J_e = i\omega\sigma A$ – вихревая плотность тока; i – мнимая единица.

Уравнение (1) дополняется уравнением для заданной величины тока в проводнике

$$I = \int_{S_c} J ds = \int_{S_c} (-i\omega\sigma A + J_s) ds, \quad (3)$$

где S_c – площадь поперечного сечения проводника; J – результирующая плотность тока.

Равенство нулю векторного магнитного потенциала на бесконечно удаленной границе реализуется с помощью граничного условия Робина:

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} A = 0 \quad (4)$$

Здесь: ρ – расстояние от центра проводника до границы области, на которой задано условие бесконечной границы.

Представленная магнитодинамическая задача решалась методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Maxwell [2,3].

В результате решения поставленной задачи получаем распределения векторного магнитного потенциала и плотности тока в токопроводящей жиле (ТПЖ).

На Рис. 1 и Рис. 2 показано распределение плотности тока в жилах круглой и секторной формы.

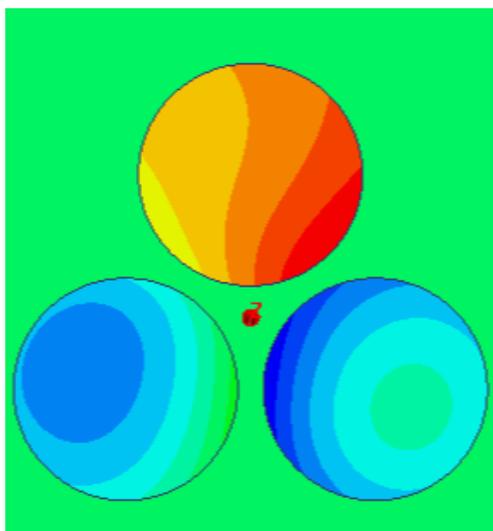


Рис.1 – Распределение плотности тока в круглой жиле с сечением 240 мм²

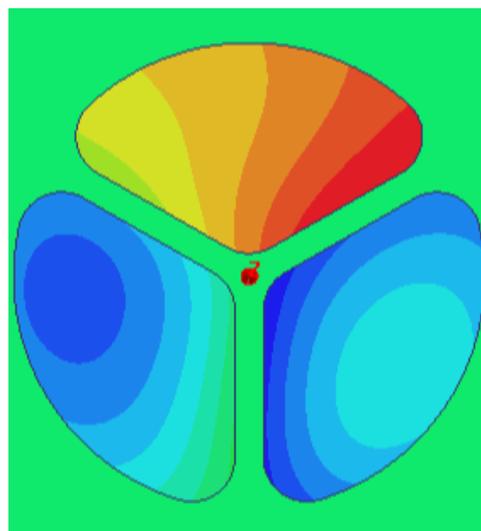


Рис.2 – Распределение плотности тока в секторной жиле с сечением 240 мм²

Сопротивление жилы переменному току определяется по формуле:

$$R = \frac{1}{I^2} \int_S \rho_c \cdot j^2 dS, \quad (5)$$

где I – заданный ток; S – площадь поперечного сечения проводника; ρ_c – удельное электрическое сопротивление жилы; j – плотность тока.

Отношение $\frac{R}{R'}$, где R' – сопротивление постоянному току, представляет собой сумму коэффициентов поверхностного эффекта, эффекта близости и единицы, тем самым показывает вклад указанных явлений в увеличение сопротивления проводника.

Сопротивление переменному току круглых одножильных конструкций, рассчитанное по ГОСТ Р МЭК, аналитическим способом и с помощью ANSYS Maxwell практически совпадают. Расхождение полученных результатов при решении каждым из методов не превышает 0.14%.

Проведено исследование сопротивления алюминиевых жил переменному току силовых кабелей круглой и секторной формы в зависимости от толщины изоляции, в результате которого рассчитана оценка вклада поверхностного эффекта и эффекта близости. На рис. 3 видно, что в круглой ТПЖ доля поверхностного эффекта составляет около 0.014, а значение эффекта близости изменяется от 0.05 до 0.02 при решении по ГОСТ Р МЭК и от 0.06 до 0.03 при использовании ANSYS Maxwell. В секторной жиле $\alpha = 0.017$, а β снижается с 0.07 до 0.03.

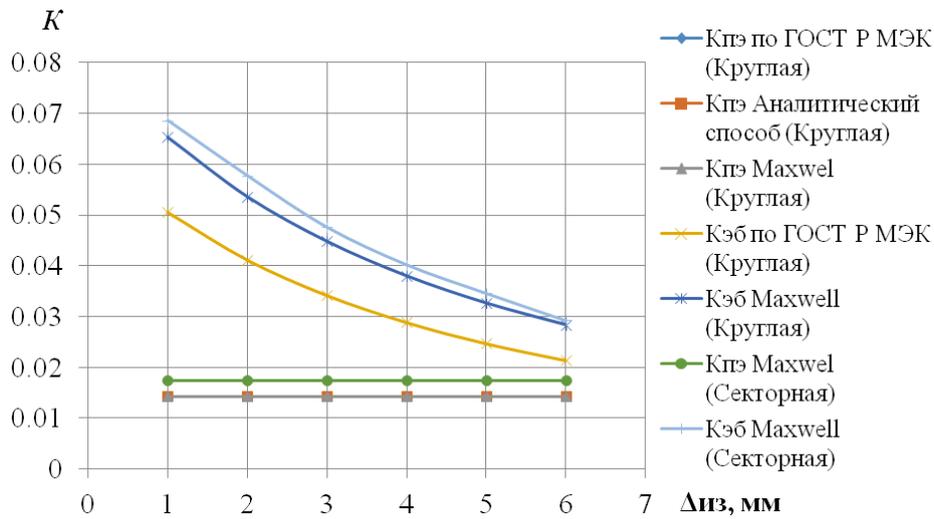


Рис.3 – Зависимость коэффициентов поверхностного эффекта и эффекта близости от толщины изоляции

На рис. 4 показано отношение сопротивлений переменному и постоянному току в зависимости от толщины изоляции для алюминиевого и медного проводников.

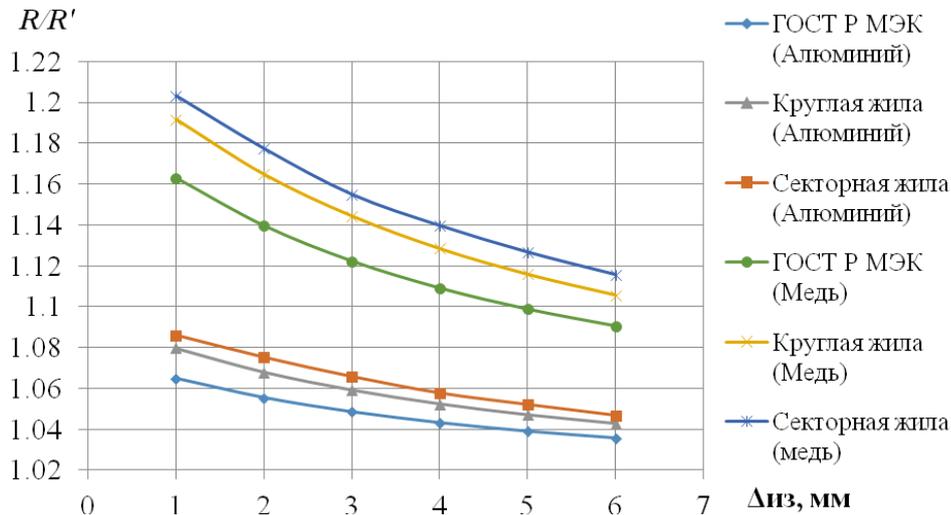


Рис.4 – Зависимость отношения сопротивлений переменному и постоянному току от толщины изоляции для различных материалов

Таким образом, предложенная методика позволяет определять сопротивление переменному току токопроводящих жил секторной и более сложной формы с учетом влияния поверхностного эффекта и эффекта близости.

Список литературы

1. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. 2011. № 3 (328). С. 14–17.
2. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. Москва: Физматлит, 2012. 430 с.
3. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 895 с.

05.13.18

А.Г. Щербинин д-р техн. наук, А.Н. Кузнецов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Электротехнический факультет, кафедра Конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, ktei@pstu.ru, lexa59ru@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ

Рассмотрено моделирование процессов тепловыделения нагруженных кабельных линий. Проведено определение токовых нагрузок силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 10 кВ с помощью программного комплекса ANSYS. Построены температурные поля для различных условий прокладки. Проведен сравнительный анализ результатов.

Ключевые слова: *токовая нагрузка кабеля, условия прокладки, математическое моделирование.*

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена находят широкое применение в электрических сетях всех классов напряжений [1]. Монтаж силовых кабелей может осуществляться на воздухе, либо в земле. При монтаже кабельных линий под землей используют траншеи и кабельные сооружения, такие как коллекторы, туннели, каналы и др. Одним из распространенных и простых способов прокладки кабельной линии является прокладка в траншее. Для силовых кабелей напряжением до 20 кВ глубина залегания кабельной линии от поверхности земли должна быть не менее 0,7 м.

Объектом численного моделирования является кабель марки АПвП с алюминиевой многопроволочной токопроводящей жилой (ТПЖ) сечением 240 мм² и изоляцией из сшитого (вулканизированного) полиэтилена.

Прокладку трехфазной кабельной линии на напряжение 10 кВ частотой 50 Гц можно организовать: с помощью одного трехжильного кабеля или трех одножильных кабелей. На рис. 1,а приведен способ прокладки кабельной линии сформированной из трех одножильных кабелей в горизонтальной плоскости, а на рис. 1,б – треугольником. Расстояние между одножильными горизонтально расположенными кабелями принималось равным диаметру кабеля.

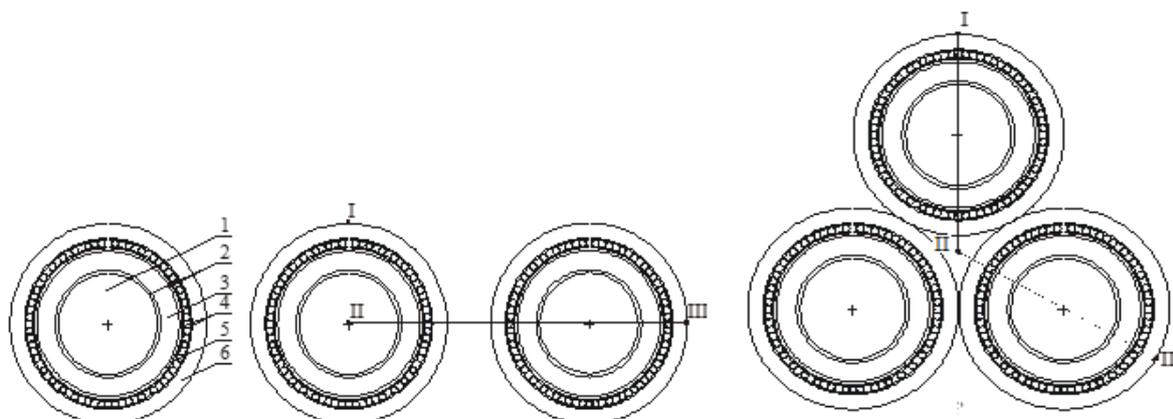


Рис.1. Кабели марки АПвП на напряжение 10 кВ.

а – три одножильные в горизонтальной плоскости; б – три одножильные треугольником.

1 – ТПЖ; 2 – два слоя экрана из полупроводящего вулканизированного полиэтилена;

3 – изоляция из вулканизированного полиэтилена; 4 – обмотка из нетканого полотна;

5 – экран из медных проволок; 6 – полиэтиленовая оболочка.

Задача определения токовых нагрузок кабелей может быть решена с помощью математического моделирования [2, 3] или стандартной методики ГОСТ Р МЭК 60287, которая вобрала множество нюансов касающихся конструкций различных видов кабелей и условий их прокладки. Однако, более универсальный и точный подход по определению токовых нагрузок – это моделирование. Примером может быть программный комплекс ANSYS, в основу которого положен метод конечных элементов.

При построении математической модели были сделаны следующие допущения: процесс стационарный; кабельные линии считаются бесконечно длинными, что позволяет рассматривать процесс в двумерной постановке и не учитывать диффузию тепла в продольном направлении; солнечная радиация на поверхности земли пренебрегается; теплофизические свойства массива земли и элементов конструкции кабеля постоянны.

С учётом сделанных допущений дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности примет вид [4]:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + q_v = 0 \quad (1)$$

где x, y , – декартовы координаты, м; t – температура, °С; q_v – мощность внутреннего источника тепла, Вт/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С).

Внутренний источник тепла q_v определяется по закону Джоуля Ленца:

$$q_v = \frac{I^2 R_{\approx}}{S}, \quad (2)$$

где I – ток, А; R_{\approx} – электрическое сопротивление ТПЖ переменному току, Ом/м; S – площадь поперечного сечения ТПЖ, м².

На поверхности земли задается граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (T - T_{cp}); \quad (3)$$

здесь α – коэффициент теплоотдачи воздуха ($\alpha = 10$ Вт/м²·°С); $T_{cp} = 20$ °С температура воздуха.

На боковой и нижней границе массива земли прикладываются адиабатические условия.

На границах раздела сред задается равенство тепловых потоков:

$$\lambda_i \cdot \frac{\partial t_i}{\partial n} = \lambda_{i+1} \cdot \frac{\partial t_{i+1}}{\partial n} \quad (4)$$

и равенство температур соприкасающихся поверхностей:

$$T_i = T_{i-1} \quad (5)$$

Поставленная задача решается методом конечных элементов в среде инженерных расчетов ANSYS Fluent. Для построения геометрической модели и разбиения ее на конечные элементы используется препроцессор ICEM CFD.

При определении токовых нагрузок кабеля используется итерационная процедура, в которой на каждом шаге решаются уравнения теплопроводности и определяется температурное поле в кабеле и в массиве земли. Далее подбирается такое значение рабочего тока, при котором максимальная температура в ТПЖ с заданной точностью равняется допустимому значению. Для силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена максимальная рабочая температура жилы равна 90°С.

На рис. 2 представлены результаты распределения температурного поля при прокладке кабелей в земле, расположенных в горизонтальной плоскости, а на рис. 3 – треугольником. При этом при горизонтальной прокладке кабелей номинальная токовая нагрузка получилась равной 471,8 А, а треугольником 469,1 А.

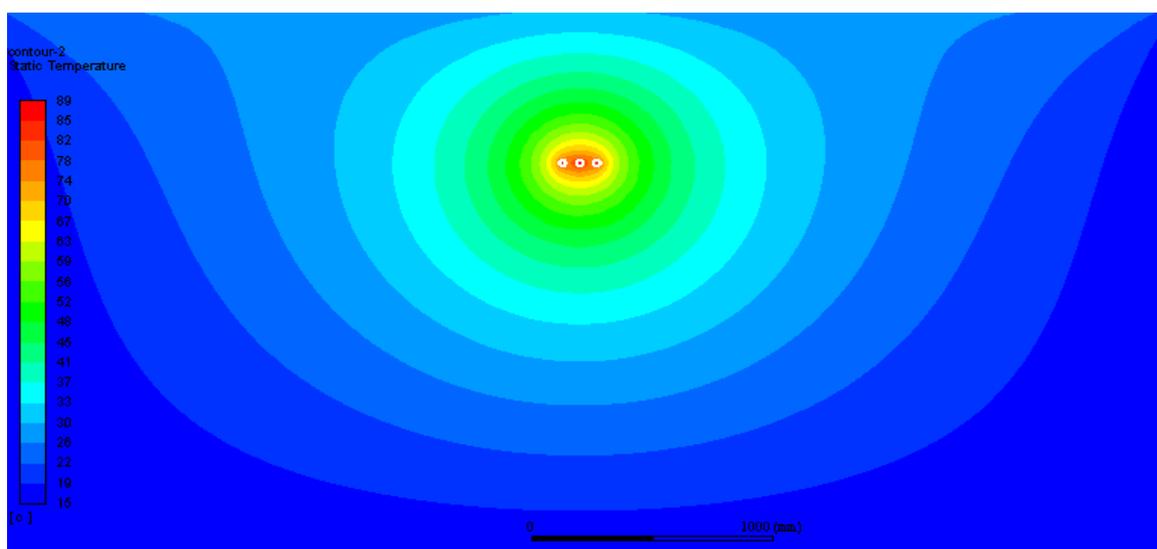


Рис. 2. Распределение температурного поля, при прокладке кабелей в горизонтальной плоскости

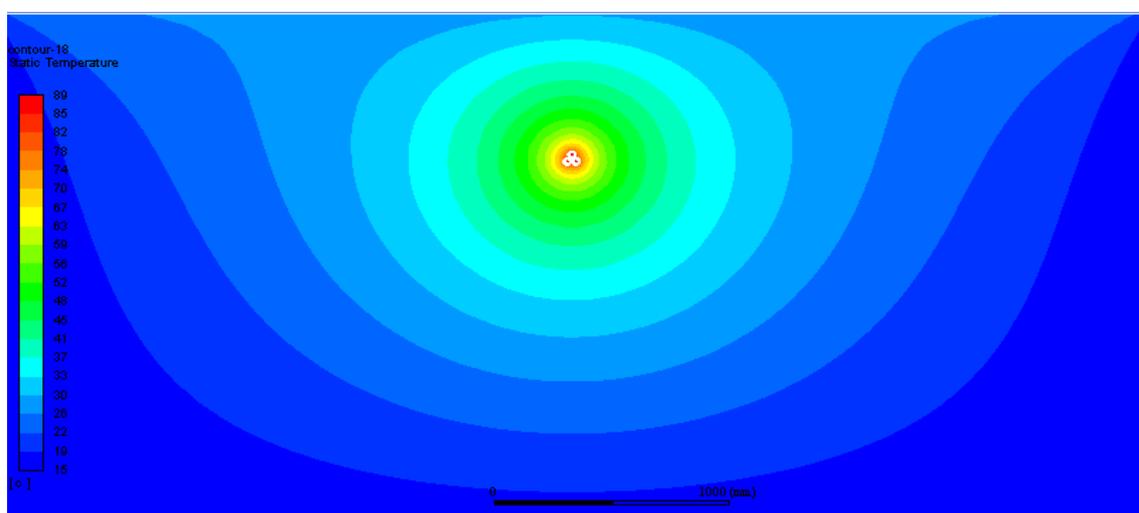


Рис. 3. Распределение температурного поля, при прокладке кабелей треугольником

В результате сравнения токовых нагрузок кабелей с различным расположением было выявлено, что при расположении кабелей в горизонтальной плоскости токовая нагрузка больше, чем при расположении кабелей треугольником. Это объясняется тем, что у кабелей при расположении в одной плоскости лучше условия для теплоотвода, чем у кабелей, расположенных треугольником.

Список литературы

1. Основы кабельной техники. Под ред. И. Б. Пешкова. Москва: Академия. 2006. 427 с.
2. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Савченко В.Г. Определение токовых нагрузок кабелей // «Электротехника». 2010. № 6. С. 61–64.
3. Щербинин А.Г., Терлыч А.Е., Мансуров А.С. Экспериментальные и численные исследования токовой нагрузки силовых кабелей в зависимости от условий прокладки. «Электротехника». 2015. № 11. С. 11-14.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 488 с.

05.13.18

А.Г. Щербинин д-р техн. наук, В.С. Черепок

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
кафедра конструирование и технологии в электротехнике,
Пермь, agshch@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ

Проведено исследование электрического поля силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами. По результатам исследования определена электрическая емкость и ее зависимость от толщины изоляции и радиуса закругления, при наличии и отсутствии металлической оболочки. Для реализации разработанной математической модели выбран программный комплекс ANSYS Maxwell.

Ключевые слова: *кабель с секторными жилами, электрическая емкость, электрическое поле.*

Для силовых кабелей электрическая емкость не является нормируемым параметром, но поскольку эксплуатирующие организации очень часто запрашивают у кабельных заводов значение емкости, поэтому ее расчет является актуальной задачей. Вычисление этого параметра существенно усложняется для силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами (ТПЖ) [1].

Рассмотрим влияние толщины изоляции и радиуса закругления секторной ТПЖ на величину электрической емкости силовых кабелей с металлической или полимерной оболочками (рис. 1).

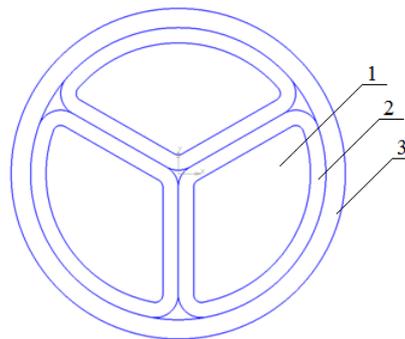


Рис. 1– Силовой кабель с секторными токопроводящими жилами

1 – токопроводящая жила; 2 – фазная изоляция; 3 – металлическая или полимерная оболочка

При построении математической модели сделаны следующие допущения: задача двумерная, электростатическая; электрический потенциал не изменяется по длине кабеля, то есть $\partial\varphi/\partial z = 0$; диэлектрическая проницаемость ϵ постоянна.

С учетом сделанных допущений, уравнение Лапласа в декартовой системе координат запишется в виде [2, 3]:

$$\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

К жилам кабеля приложены заданные значения потенциалов; электрический потенциал на металлической оболочке или на бесконечном удалении для кабеля с полимерной оболочкой принимается равным 0. Равенство нулю электрического потенциала на бесконечно удаленной границе реализуется с помощью граничного условия Робина [4]:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial\rho} + \frac{1}{\rho}\varphi = 0, \quad (2)$$

В качестве материала изоляции и полимерной оболочки используется полиэтилен с относительной диэлектрической проницаемостью равной 2,25.

Задача решается методом конечных элементов [5] в программном комплексе ANSYS Maxwell. На рис. 2 показано распределение потенциала при толщине изоляции $\Delta_{из} = 2$ мм и радиусе закругления $r = 1$ мм при наличии и отсутствии металлической оболочки соответственно.

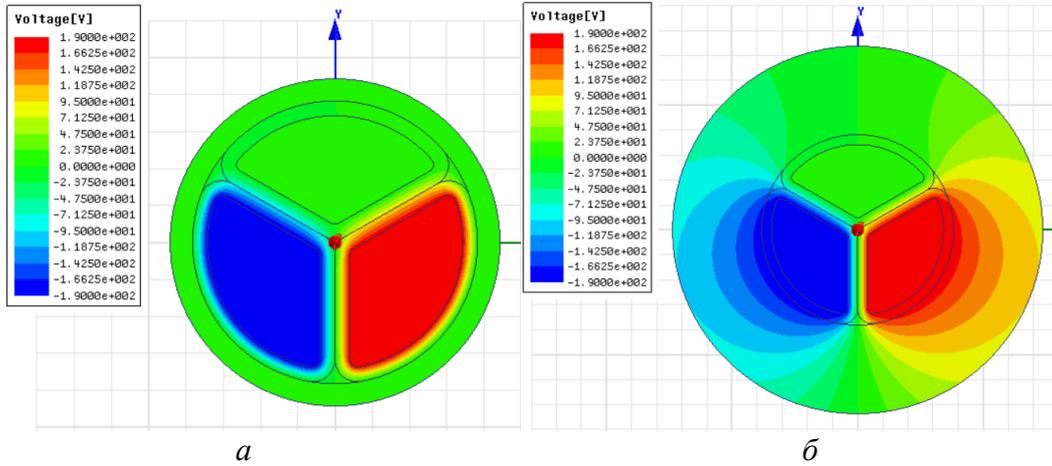


Рис. 2– Распределение потенциала: *a* – с учетом оболочки, *б* – без учета оболочки

По распределению потенциала можно построить распределение напряженности электрического поля, которое определяется через распределение потенциала по формуле $E = -grad\phi$. Наибольшие значения напряженности наблюдаются в изоляции между ТПЖ с положительным и отрицательным потенциалами, в областях с минимальными значениями радиуса закругления.

В результате решения электростатической задачи в ANSYS Maxwell также формируются матрицы емкостных коэффициентов, одна из которых приведена в таблице при толщине изоляции $\Delta_{из} = 2$ мм и радиусе закругления $r = 1$ мм.

Таблица – Матрица емкостных коэффициентов

β , пФ/м	1	2	3
1	192,58	-93,327	-93,321
2	-93,327	192,58	-93,324
3	-93,321	-93,324	192,58

Значения частичных емкостей вычисляются по формулам

$$\begin{aligned}
 C_{10} &= \beta_{11} + \beta_{12} + \beta_{13} \\
 C_{20} &= \beta_{21} + \beta_{22} + \beta_{23} \\
 C_{30} &= \beta_{31} + \beta_{32} + \beta_{33}, \\
 C_{12} &= -\beta_{12} \\
 C_{13} &= -\beta_{13} \\
 C_{23} &= -\beta_{23}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Емкость между проводниками 1 и 2 рассчитывается из электрической схемы замещения кабеля, представленной на рис. 3.

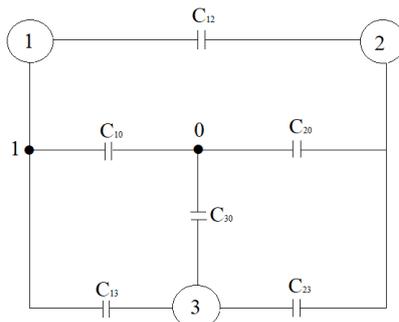


Рис. 3– Электрическая схема замещения кабеля

На рис. 4, *а* приведены зависимости емкости кабеля от толщины изоляции при радиусе закругления $r = 3$ мм, а на рис. 4, *б* – от радиуса закругления при толщине изоляции $\Delta_{\text{из}} = 4$ мм, при наличии и отсутствии металлической оболочки.

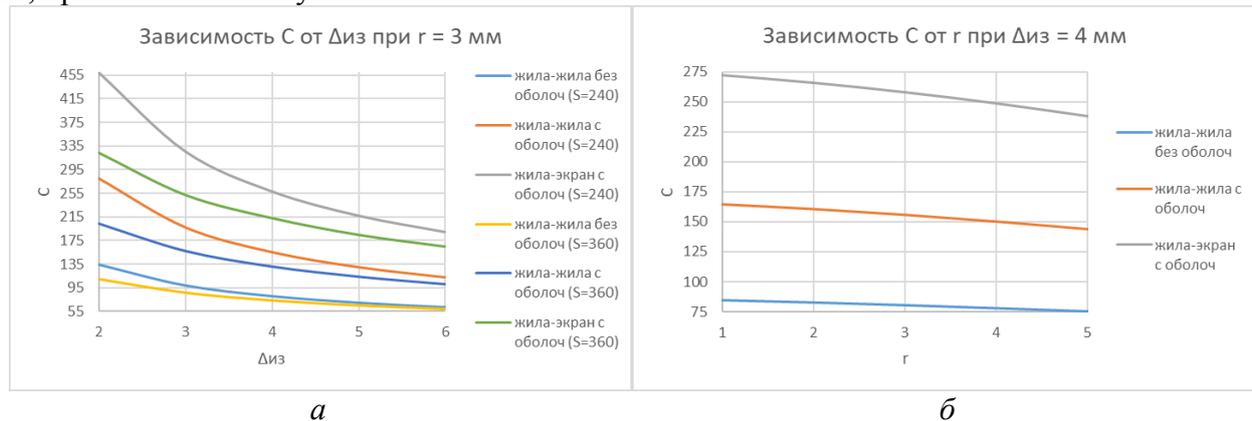


Рис. 4– Зависимость емкости от
а – толщины изоляции при $r = 3$ мм, *б* – радиуса закругления при $\Delta_{\text{из}} = 4$ мм

Из рис. 4, *а* видно, что при увеличении толщины изоляции $\Delta_{\text{из}}$ от 2 до 6 мм емкость кабеля снижается более чем на 50%. В литературе емкость трехжильных кабелей с секторными жилами рекомендуется определять по формулам для кабелей с круглыми жилами с заменой секторных жил круглыми, но с сечением, увеличенным на 50% при той же толщине изоляции [6]. В данном случае увеличенное на 50% сечение жилы равно 360 мм^2 . Зависимости емкости от толщины изоляции с увеличенным сечением ТПЖ круглой формы также приведены на этом рисунке 4, *а*. Для увеличенной круглой ТПЖ емкость между жилами при наличии металлической оболочки получается заниженной по отношению к сектору в среднем на 16%, а при отсутствии металлической оболочки – на 8%.

Из рис. 4, *б* видно, что при увеличении радиуса закругления r от 1 до 5 мм емкость кабеля снижается на 12%.

Предложенный в данной работе подход позволяет определять электрические емкости силовых кабелей с токопроводящими жилами любой формы, с металлическими экранами и без них.

Список литературы

1. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. 2011. № 3 (328). С. 14–17.
2. Основы кабельной техники: учеб. пособие /Л.А. Ковригин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 94 с.
3. Щербинин А.Г., Кабирова А.И. Математическое моделирование электрического поля кабеля с жилами секторной формы // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 5. С. 178-180.
4. Meeker D. Improvised Open Boundary Conditions for Magnetic Finite Elements // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. XX, NO. X 1. Pp. 1-6.
5. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 895 с.
6. Бачелис Д. С. и др. Электрические кабели, провода и шнуры (справочник). Под общ. ред. Н. И. Белоруссова. Изд. 3-е, перераб. М., «Энергия», 1971. 704 с.

**АННОТАЦИИ
ABSTRACTS****В.И. Антонов
ЛОГИЧЕСКАЯ ВЫВОДИМОСТЬ ФОРМУЛ И ИХ
СЕМАНТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ В РЕШЕТОЧНО
УПОРЯДОЧЕННЫХ КОЛЬЦАХ**

Ключевые слова: гейтинговозначный анализ, оценки, булевы оценки, хорновы теории, пучки, предпучки, нормальные l -кольца. В работе исследуются свойства оценок в решетоchno упорядоченных кольцах методами гейтинговозначного анализа. На этой основе изучаются хорновы теории разных классов l -колец.

**Ю.В. Швец, Н.В. Миллер, Н.И. Попова, И.А. Трефилова
СТЕПЕННАЯ ОЦЕНКА ДЛЯ ОДНОГО НЕСОБСТВЕННОГО
ИНТЕГРАЛА**

Ключевые слова: несобственный интеграл первого рода, гамма-функция, степенные оценки, интегральные неравенства, неполная гамма-функция.

В работе изучается несобственный интеграл первого рода с переменным нижним пределом

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_x^{\infty} e^{-t^{2p}} dt, \text{ где } \Gamma(x) \text{ — гамма-функция Эйлера.}$$

Оценивается четная степень $2k$ функции $S(x)$. Показано, что для $\forall x \in \mathbf{R}$ и $m \in [1; \sqrt[2k]{2k}]$ выполняется интегральное неравенство

$S^{2k}(x, p) < S(mx, p)$. Установлено также, что неравенство остается справедливым для $0 \leq m < 1$ и любого положительного x .

**Е.Н. Минаев, Д.С. Хорищенко, Д.В. Цыпин
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ПОЛЯ В ДВУХЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ
СИСТЕМАХ ПРИ РАЗНОРОДНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ
Ключевые слова:** математическое моделирование; электрическое поле, электрохимические системы.

На основе решения дифференциального уравнения Лапласа проведено моделирование электрического поля в плоскопараллельных системах со смешанными граничными условиями третьего рода и первого – третьего рода. Представлен метод решения, аналитические выражения для расчёта и результаты численного моделирования.

**А.П. Буйносов, О.И. Ветлугина
ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕКУЩЕГО РЕМОНТА ПЕРВОГО ОБЪЕМА
ЭЛЕКТРОВЗОВ ВЛ11 В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ
ДЕПО**

Ключевые слова: электровоз, депо, сервис, ремонт, объем, текущий, организация.

В статье рассматривается возможность выполнения текущего ремонта первого объема и технического обслуживания четвертого объема электровозов на пятилетнюю перспективу, согласно указаниям ОАО «РЖД» по реструктуризации локомотивного хозяйства. Дано обоснование пополнения технологического оборудования для выполнения процессов, связанных с введением в сервисных локомотивных депо текущего ремонта.

**И.В. Ивенина, Ю.Г. Смирнов, А.А. Лютоев, Е.И. Истомина
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕГЕНЕРАЦИИ НАНОЧАСТИЦ
МАГНЕТИТА В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ВОДЫ ОТ
ЭМУЛЬГИРОВАННОЙ НЕФТИ**

Ключевые слова: водонефтяная эмульсия, очистка воды от нефти, регенерация наночастиц магнетита.

Работа посвящена проблеме очистки пластовых вод от эмульгированной нефти при помощи наночастиц магнетита и силового воздействия магнитного поля. Предложено и обосновано технологическое решение, включающее обязательный этап

**V.I. Antonov
LOGICAL CONCLUSIONS FORMULAS AND THEIR
SEMANTIC ESTIMATION IN SOLVED ORDERED
RINGS**

Keywords: Heyting valued analysis, estimates, Boolean estimates, sheaves, presheaves, lattice ordered rings, normal l -rings.

The article considers the properties of evaluations lattice ordered rings methods of Heytings valued analysis. Based on this study Horn theory of various classes l -rings.

**Y.V. Shvets, N.V. Miller, N.I. Popova, I.A. Trefilova
POWER ESTIMATE FOR ONE IMPROPER INTEGRAL**

Keywords: improper integral of the first kind, gamma function, degree evaluations, integral inequalities, unimprovable estimates, incomplete gamma function.

The paper deals with the improper integral of the first kind with variable lower limit

$$S(x, p) = \frac{p}{\Gamma\left(\frac{1}{2p}\right)^x} \int_x^{\infty} e^{-t^{2p}} dt, \Gamma(x) \text{ —}$$

Euler gamma function. It is shown that for $\forall x \in \mathbf{R}$ and $m \in [1; \sqrt[2k]{2k}]$ integral inequality $S^{2k}(x, p) < S(mx, p)$ is done.

In addition, it is found out that this inequality is retained for $0 \leq m < 1$ with positive values of x .

**E.N. Minaev, D.S. Horishenko, D.V. Tsyypin
MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTRIC
FIELD IN THE TWO-ELECTRODE
ELECTROCHEMICAL SYSTEMS WITH THE
DIFFERENT BOUNDARY CONDITIONS**

Keywords: mathematical modeling, differential equation, electric field, electrochemical systems.

The method for calculation of electrical field in the two-electrode electrochemical systems is presented. Formulas for calculating of the electric field with the different boundary conditions are discovered. The results of the calculation of the electric potential are presented.

**A.P. Buiosov, O.I. Vetlugina
ORGANIZATION OF CURRENT REPAIR OF THE FIRST
VOLUME OF ELECTRIC VOLVES VL11 IN SERVICE
LOCOMOTIVE DEPOSITS**

Keywords: electric locomotive, depot, service, repair, volume, current, organization.

The article considers the possibility of performing the current repair of the first volume and maintenance of the fourth volume of electric locomotives for a five-year period, in accordance with the instructions of JSCo Russian Railways for the restructuring of locomotive facilities. The rationale for the replenishment of technological equipment for the implementation of the processes associated with the introduction of maintenance services in the locomotive depot is given.

**I.V. Ivenina, Yu.G. Smirnov, A.A. Lyutoev, E.I. Istomina
DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF
REGENERATION OF MAGNETITE NANOPARTICLES
IN THE PROCESS OF WATER TREATMENT FROM
EMULATED OIL**

Keywords: water-oil emulsion, water purification from oil, regeneration of magnetite nanoparticles.

The work is devoted to the problem of cleaning formation water from emulsified oil with the help of magnetite nanoparticles and force action of a magnetic field. A

регенерации частиц магнетита, решающее проблему поддержания степени их дисперсности.

technological solution that includes an obligatory stage of regeneration of magnetite particles that solves the problem of maintaining the degree of their dispersion is proposed and justified.

А.А. Каменских, К.С. Кречу
**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА ЗУБНОЙ ПАРЫ
 ЧЕРЕЗ ТРЕХСЛОЙНУЮ КАППУ**

A.A. Kamenskikh, K.S. Krecu
**NUMERICAL MODELING A PAIR OF TEETH
 CONTACT THROUGH THE THREE-LAYER
 MOUTHGUARD**

Ключевые слова: А-силикон, Ева, трехслойная каппа, контакт.
 В работе представлены результаты численного моделирования контакта зубов канонической формы без учета и с учетом трехслойной каппы. Выполнен анализ влияние уровня нагрузки на деформирование контактного узла. Установлено понижение уровня максимального контактного давления при использовании зубной шины максимально в 1,2 раза. Максимальный уровень интенсивности напряжений при контакте пары зубов через трехслойную каппу ниже в 1,33 и 1,49 раза в зубах верхнего и нижнего зубного ряда соответственно, чем при контакте без каппы.

Keywords: A-silicon, Eva, three-layered mouthguard design, contact.

The results of numerical modeling of the teeth canonical form contact without and with taking into account the three-layered mouthguard are presented in the paper. Analysis of the load level influence on the deformation of the contact node is made. The lowering the level of maximum contact pressure when using a mouthguard is set 1.2 times lower is established. The maximum level of stress intensity at contact of a pair of teeth through a three-layer mouthguard is lower by 1.33 and 1.49 times in the teeth of the upper and lower dentition respectively, than in contact without a mouthguard.

А.А. Каменских, Т.Н. Устюгова
**АНАЛИЗ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНТАКТА
 ЗУБНОЙ ПАРЫ ЧЕРЕЗ ПРОТЕТИЧЕСКУЮ КОНСТРУКЦИЮ**

A.A. Kamenskikh, T.N. Ustjugova
**THE ANALYSIS OF NUMERICAL SOLUTION
 PROBLEM OF CONTACT THE PAIR OF TEETH
 THROUGH MOUTHGUARD DESIGN**

Ключевые слова: Ева, зуб, протетическая конструкция, контакт.
 В работе представлены результаты моделирования контакта пары зубов без учета и с учетом протетической конструкции. Выполнен анализ сходимости численного решения задачи в зависимости от степени дискретизации системы, выбрана оптимальная конечно-элементная сетка с градиентным сгущением к зоне контакта. Проанализировано влияние уровня функциональной нагрузки на напряженно-деформированное состояние контактного узла в целом и зоны контакта в частности. Установлено понижение уровня максимального контактного давления при использовании зубной шины максимально в 3,05 и 2,1 раза в зоне контакта с зубом верхнего и нижнего зубного ряда соответственно.

Keywords: Eva, tooth, mouthguard design, contact.
 The results of modeling the contact of a pair of teeth without and with mouthguard design are presented in the paper. An analysis of the numerical solution convergence of the problem depending on the degree of the system discretization is performed, the optimal finite-element grid with a gradient thickening to the contact zones is chosen. The effect of the functional load level on the stress-strain state of the contact unit in general and the contact zones in particular is analyzed. Lowering the level of maximum contact pressure when using a mouthguard design is maximally in 3.05 and 2.1 times in the contact zone with the tooth of the upper and lower dentition respectively is established.

Е.О. Кузнецников, С.О. Маслов, А.В. Жданов
**ПРИМЕНЕНИЕ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ ПРИ
 РАЗРАБОТКЕ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ МАШИН**

E.O. Kuznechenkov, S.O. Maslov, A.V. Zhdanov
**APPLICATION OF ADDITIONAL REALITY IN
 DEVELOPING UNITS AND PARTS OF MACHINES**

Ключевые слова: виртуальная реальность, дополненная реальность, развлечение, наука, новшества, проектирование, обучение, инновации, технологии.
 В статье рассмотрен способ адаптации системы дополненной реальности в условиях обучения. Ее использование гарантирует максимальное понимание протекающих процессов даже для людей другой сферы деятельности. Так же расписаны шаги создания анимации 3D объектов.

Keywords: virtual reality, augmented reality, design, units and parts of machines.
 The article considers the way of adaptation of the augmented reality system in the learning environment. Its use guarantees a maximum understanding of ongoing processes, even for people of another field of activity. The steps for creating animation of 3D objects are also described.

Л.Н. Лесневский, М.А. Ляховецкий, Д.А. Макарьев,
 И.А. Николаев, С.Н. Сарбучев
**О ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
 ПОКРЫТИЙ В СОВРЕМЕННОМ БЕРЕЖЛИВОМ
 ПРОИЗВОДСТВЕ**

L.N. Lesnevskiy, M.A. Lyakhovetskiy, D.A. Makariev,
 I.A. Nikolaev, S.N. Sarbuchev
**POSSIBILITY OF PLASMA COATING TECHNOLOGY
 IN MODERN LEAN PRODUCTION**

Ключевые слова: сущность Лин (Lean), бережливое производство, потери, ресурс, износостойкое покрытие, твердая смазка, плазменные технологии.

Keywords: essence of Lean, lean production, losses, lifetime, wear resistant coating, hard lubricant, plasma technologies.
 The article discusses the essence of optimization techniques such as Lean production by the example of "Grundfos" company drainage pumps manufacture. The estimation of wear resistance hard lubricant plasma coatings is done. Results of this estimation can become a basis for decision-making on lifetime and reliability increase of drainage pump iron vane working surfaces. By-turn it is able to result to reduction losses and additional expenses on coating restoration or replacement of vane completely.

Рассмотрена сущность оптимизационных технологий Лин (Lean) на примере производства водоотводных насосов компании «Grundfos». Дана оценка эффективности использования плазменных технологий износостойких твердосмазочных покрытий (ТСП), результаты которой могут стать основой для принятия решения о повышении ресурса и надёжности рабочих поверхностей выполненных из чугуна крыльчаток этих насосов, что в свою очередь может привести к снижению потерь и дополнительных расходов на восстановление покрытия или замену крыльчатки целиком.

И.С. Цихалевский, А.П. Буйносов
ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ ГРУЗОВЫХ ЭЛЕКТРОВЗОВ
ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПРИМЕРЕ ПТОЛ СЕДЕЛЬНИКОВО

Ключевые слова: электровоз, постоянный ток, груз, обслуживание, техническое, пример, методика, производство, организация.

Для решения вопроса организации технического обслуживания грузовых электровозов постоянного тока различной секционности основным является расчет суточной и годовой программы технического обслуживания. В статье приведена методика для определения программы ТО-2 и экипажировки. Выполнен расчет на примере ПТОЛ Седельниково.

Н.Н. Беспалов, А.В. Зорькин, П.М. Дёмкин
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ
ИМПУЛЬСОВ ФОРМИРУЕМЫХ ИМПУЛЬСНЫМ
ИСТОЧНИКОМ НАПРЯЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ДЛИННУЮ ЛИНИЮ
НА ОСНОВЕ ВИТОЙ ПАРЫ

Ключевые слова: источник напряжения, импульс, витая пара, Multisim.

В данной статье приведено исследование прохождения электрических управляющих импульсов, формируемых импульсным источником напряжения, через длинную линию на основе витой пары при применении в устройствах силовой электроники.

С.В. Ершов, Д.В. Гилев
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ПРОЦЕССА
ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВЫХ СМЕСЕЙ

Ключевые слова: вулканизация; резиновая смесь; изоляция; реология; время вулканизации; вулканизирующий агент.

Вулканизованная резина получила широкое применение в качестве изоляции и различных защитных покрытий в кабельной промышленности. Экспериментальное исследование процесса вулканизации резиновой смеси и сравнительный анализ различных вулканизирующих агентов помогают существенно минимизировать временные и материальные затраты на производстве. В работе был проведен сравнительный анализ различных смесей резины. Так же представлены результаты исследования влияния температуры на скорость вулканизации, полученные на ротационном реометре DiscoveryHR-2 производства TA Instrument.

С.В. Ершов, С.В. Фоминых
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ИНДУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ
КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ПОЛИОЛЕФИНОВ

Ключевые слова: полимерные композиции, полиэтилен, дифференциальная сканирующая калориметрия, время окислительной индукции, температура окислительной индукции.

В настоящее время полимерные композиции на основе полиолефинов имеют широкое применение при производстве различных изделий. В процессе переработки эти материалы особенно сильно подвержены окислению. В статье приведены экспериментальные исследования окислительной индукции различных полимерных композиций на основе полиэтилена. Исследования производились на дифференциальном сканирующем калориметре DSCQ2000, производства TA Instruments. В результате были получены кривые зависимости теплового потока от температуры исследуемых полимерных композиций, а также зависимости времени окисления от температуры.

I.S. Tsikhalevsky, A.P. Buinosov
ORGANIZATION OF PRODUCTION OF TECHNICAL
MAINTENANCE OF LOADED ELECTRONICS OF DC
CONVENTION ON THE EXAMPLE OF PANEL
SEDELNIKOVO

Keywords: electric locomotive, direct current, cargo, maintenance, technical, example, technique, production, organization.

To solve the problem of organization of maintenance of freight DC electric locomotives of different sectionality is the main calculation of the daily and annual maintenance program. The article presents a method for determining the program TO-2 and equipment. The calculation is made on the example of PTOL Sedelnikovo.

N.N. Bepalov, A.V. Zorkin, P.M. Dyomkin
INVESTIGATION OF PASSING CONTROL IMPULSES
THROUGH THE LONG LINE BASED ON TWISTED
PAIR

Keywords: voltage source, pulse, twisted pair, Multisim.
In this article, we study the passage of electrical control pulses generated by a pulsed voltage source through a long line based on a twisted pair when used in power electronics devices.

S.V. Ershov, D.V. Gilev
EXPERIMENTAL STUDY OF THE TEMPERATURE
INFLUENCE ON THE VULCANIZATION PROCESS
SPEED OF RUBBER MIXTURES

Keywords: vulcanization; rubber compound; insulation; rheology; vulcanization time; vulcanizing agent.

Vulcanized rubber has been widely used as insulation and various protective covers in the cable industry. Vulcanization allows you to give the finished product the necessary mechanical characteristics. An experimental study of the rubber compound vulcanization process and a comparative analysis of various vulcanizing agents can help to substantially minimize the time and material costs of production. In the work, a comparative analysis of various rubber mixtures was carried out. Also the investigation results of the temperature effect on vulcanization rate, obtained on the rotary rheometer DiscoveryHR-2 manufactured by TA Instrument are presented.

S.V. Fominykh, S.V. Ershov
EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROCESS
OXIDATIVE INDUCTION OF POLYMER
COMPOSITIONS ON THE BASIS OF POLYOLEFINS

Keywords: polymer compositions; polyethylene; differential scanning calorimetry; oxidative induction time, oxidative induction temperature.

At present, polymer compositions based on polyolefins are widely used in the production of various products, during processing these materials are particularly susceptible to oxidation. The article presents experimental studies of the oxidation based on polyethylene. The studies were performed on a differential scanning calorimeter DSCQ2000, manufactured by TA Instruments. As a result, the curves of the dependence of the heat flux on the temperature of the investigated polymer compositions, and dependence of the oxidation time on temperature were received.

Т.В. Карасева, И.А. Туряева, А.Н. Долгов
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА БЕЗМАСОЧНОЙ
ЛИТОГРАФИИ НА КАЧЕСТВО ТЕСТОВЫХ ОБРАЗЦОВ

Ключевые слова: микроэлектроника, безмасочная литография, фоторезист, оптимальные параметры экспонирования.

В работе представлены результаты исследования качества тестовых образцов при безмасочной литографии. Проведен подбор оптимальных режимов экспонирования при данной литографии на подложках из разного материала с различной толщиной нанесенного фоторезиста.

А.В. Кутина, Б.Г. Сverdlov
ИНФОРМАТИВНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СИГНАЛЬНЫЕ
ПРИЗНАКИ БПЛА И ПТИЦ

Ключевые слова: БПЛА, птицы, распознавание, сигнальные признаки, методы «сверхразрешения».

В статье представлены некоторые радиолокационные признаки, свойственные таким типам целей, как БПЛА и птицы. Приведены результаты обработки и анализа их доплеровских спектров, полученных в результате эксперимента.

Е.В. Субботин, А.С. Поздеева
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА
ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ МЕТОДАМИ
ТЕРМОГРАВИМЕТРИИ

Ключевые слова: полимер, термогравиметрический анализ, энергия активации.

В работе рассмотрены методики исследования кинетики процесса термического разложения полимерных материалов, основанные на использовании термогравиметрического анализа. Для полиэтилена высокой плотности приведены результаты экспериментов по определению энергии активации.

А.Е. Терлыч, А.А. Макаров
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
САЖЕСОДЕРЖАЮЩИХ КОМПОЗИТОВ

Ключевые слова: композит, диэлектрическая проницаемость, электрическая прочность.

Исследована зависимость электрической прочности, диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости органических композитов от концентрации в них электротехнической сажи.

В.Н. Хмельев, А.Н. Сливин, А.В. Шалунов
СТЕНД ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНСОЛИДАЦИИ
ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛОВ

Ключевые слова: ультразвук, консолидация, металлы, стенд, оптимизация.

Представлены исследования специального стенда ультразвуковой (УЗ) консолидации тонких листов металлов, позволившие выявить влияние параметров (усилие сжатия, время УЗ воздействия, амплитуда УЗ колебаний) на прочность формируемых соединений листов меди.

А.И. Акимов, И.А. Акимов, В.А. Урбан
ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ, РАСЧЕТНЫХ ФОРМУЛ ТЕПЛООБМЕНА НА
ВТОРОМ ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА МНОГОСЛОЙНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ МЕТОДОМ
ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

Ключевые слова: многослойная конструкция, полимеризация, сферическая форма, автоклавы, авиационная промышленность, космическая техника, второй этап.

В работе рассматривается теплообмен в производстве многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации в автоклавах. Изделия такой формы широко используются в космической технике авиационной промышленности и в некоторых других отраслях народного хозяйства.

T.V. Karaseva, I.A. Turyaeva, A.N. Dolgov
THE RESEARCH OF THE QUALITY OF TEST SAMPLES
PRODUCED BY TECHNOLOGICAL PROCESS OF
MASKLESS LITHOGRAPHY

Keywords: microelectronics, maskless lithography, photoresist, direct-writing exposure parameters.

This paper presents the results of the research of the quality of test samples in maskless lithography systems. Optimum maskless lithography parameters are determined depending on different wafers and photoresist layer thickness.

A.V. Kutina, B.D. Sverdlov
INFORMATIVE RADAR SIGNAL SPECIFIERS OF UAVS
AND BIRDS

Keywords: UAV, birds, classification, signal specifiers, "superresolution" methods

This paper presents some radar specifiers inherent for such types of targets as UAVs and birds. Results of processing and analysis for their radar signatures received in the experiment are reduced.

E.V. Subbotin, A.S. Pozdeeva
DETERMINATION OF ACTIVATION ENERGY OF
PROCESS THERMAL DECOMPOSITION OF
POLYMERS BY THERMOGRAVIMETRY METHODS

Keywords: polymer, thermogravimetric analysis; activation energy.

In work research methods of kinetics of thermal decomposition process of polymer materials, based on use of thermogravimetric analysis are considered. For high-density polyethylene, the results of experiments on the determination of activation energy are presented.

A.E. Terlych, A.A. Makarov
INVESTIGATION OF ELECTRICAL
CHARACTERISTICS OF CARBON BLACK
SUSPENSION COMPOSITES

Keywords: composite, dielectric constant, electrical strength. The dependence of electrical strength, dielectric losses and dielectric constant of organic composites on the concentration of carbon black was received.

V.N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Shalunov
STAND OF ULTRASONIC CONSOLIDATION OF THIN
SHEETS OF METALS

Keywords: ultrasound, consolidation, metals, stand, optimization.

The researches of the special stand of ultrasonic consolidation of thin sheets of metals which have allowed to reveal influence of key parameters (compression effort, time, amplitude) on durability of the formed connections of sheets of copper are presented.

A.I. Akimov, I.A. Akimov, V.A. Urban
INVESTIGATION AND DEVELOPMENT OF
MATHEMATICAL MODELS, CALCULATED
FORMULAS OF HEAT EXCHANGE AT THE SECOND
STAGE OF MANUFACTURE OF MULTILAYER
CONSTRUCTIONS OF SPHERICAL FORM BY METHOD
OF POLYMERIZATION

Keywords: multi-layer construction, polymerization, spherical shape, autoclaves, aviation industry, space technology, the second stage.

The paper considers heat transfer in the production of spherical shaped multilayer structures by polymerization in autoclaves. Products of this form are widely used in the space technology of the aviation industry and in some other branches of the national economy.

Г.Ф. Ахмедьянова

ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ РЕСУРСОВ В ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ*Ключевые слова: оптимальное распределение, управляющие ресурсы, дистанционное обучение, надежность.*

В работе представлена постановка и решение задачи оптимального распределения ресурсов в организационно-технической системе с целью повышения надежности ее функционирования. Решение проведено с помощью метода Эйлера-Лагранжа. В качестве применения выявленной методики рассмотрена надежность системы дистанционного образования вуза. Показано, что управление надежностью как абстрактным объектом возможно при вложении ресурсов в четыре подсистемы: компьютерного оснащения, программного, методического обеспечения и книгообеспеченности. Распределение управляющих ресурсов проводится между этими компонентами. Сравнение теоретических результатов с практическими доказывает полезность разработанной методики.

А.В. Бродский

О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕКОМПОЗИЦИИ ФОРМАЛЬНО КОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ*Ключевые слова: САПР, математическая модель, задача оптимизации, структурные свойства, декомпозиция задачи, вычислительная схема.*

Статья посвящена актуальным вопросам разработки программных компонент САПР аэрокосмической техники. Рассматривается подход, который на основе анализа структурных свойств математической модели проектируемого изделия позволяет выполнить переход от вербального описания исходной задачи оптимизации к ее формальной постановке и провести анализ возможности ее разбиения на подзадачи меньшей трудоемкости. Сформулированы формальные условия выполнения декомпозиции и показаны различные аспекты ее значимости для задач оптимизации.

И.Я. Дятлов, Н.М. Труфанова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВОЙ СМЕСИ ПРИ ПОМОЩИ РОТАЦИОННОГО РЕОМЕТРА*Ключевые слова: резина; вулканизация; степень вулканизации; время вулканизации; реометр.*

В работе проведено лабораторное исследование процесса вулканизации резиновой смеси на ротационном реометре. В результате серии экспериментов были получены зависимости модуля накопления от температуры и времени вулканизации. По результатам эксперимента были получены зависимости степени сшивки и скорости производства кабеля с резиновой изоляцией от времени и температуры.

Д.К. Егорова, Д.М. Плодукхин

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ*Ключевые слова: снижение размерности, метод главных компонент, OpenMP, ускорение, эффективность.*

В работе приведена реализация параллельного алгоритма обработки многомерных данных – метода главных компонент. Метод реализован в среде Microsoft Visual Studio 2015 с использованием технологии OpenMP. Приведена оценка ускорения и эффективности алгоритма.

А.В. Иляхинский

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИРИХЛЕ КАК СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РЫНКА ЦЕННЫХ БУМАГ*Ключевые слова: системный анализ, функция плотности вероятности, распределение Дирихле, энтропия, финансовый рынок, котировки акций.*

На примере анализа состояния рынка ценных бумаг показана

G.F. Akhmedyanova

OPTIMAL DISTRIBUTION RESOURCE MANAGEMENT IN THE ORGANIZATIONAL-TECHNICAL SYSTEM*Keywords: optimal distribution, control resources, distance learning, reliability.*

The paper presents the formulation and solution of the problem of optimal allocation of resources in the organizational-technical system in order to improve the reliability of its operation. The solution was carried out using the Euler-Lagrange method. As the application of the revealed methodology, the reliability of the distance education system of the university was considered. It is shown that reliability management as an abstract object is possible when investing resources in four subsystems: computer hardware, software, methodological support, and book provision. The allocation of control resources is carried out between these components. Comparison of theoretical results with practical ones proves the usefulness of the developed methodology.

A.V. Brodskii

ABOUT DECOMPOSITION CAPABILITIES OF WELL-DEFINED FORMAL OPTIMIZATION PROBLEM IN CAD SYSTEM FOR AEROSPACE ENGINEERING*Keywords: CAD system, mathematical model, optimization problem, structural properties, task partition, computation scheme.*

This article presents the current issues in the development of CAD system program components. The paper considers an approach assuring the transfer from the verbal description of source optimization problem towards its formal definition and evaluation of capability of its partition to subtasks with less computational efforts. The approach is based on structural properties' analysis of designed items' mathematical model. The formal conditions of decomposition are formulated and various aspects of its importance for optimization problem are depicted.

I.Y. Djatlov, N.M. Trufanova

RUBBER CURING PROCESS RESEARCH VIA ROTATIONAL RHEOMETER*Keywords: rubber; curing; vulcanization; curing rate; curing time; curing degree; rheometer.*

The article presents a study of the vulcanization process using a rotational rheometer. The Storage Modulus temperature and time dependences were obtained. The production rates and curing degrees for rubber-insulated cables were calculated.

D.K. Egorova, D.M. Plodukhin

PARALLEL IMPLEMENTATION OF THE PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS*Keywords: dimensionality reduction, principal component analysis, OpenMP, acceleration, efficiency.*

The article presents an implementation of a parallel algorithm for processing multidimensional data, the principal component analysis. The method is implemented in Microsoft Visual Studio 2015 using OpenMP technology. Estimation of the acceleration and efficiency of the algorithm is given.

A.V. Ilyahinsky

DIRICHLET DISTRIBUTION AS A STATISTICAL MODEL OF SYSTEMIC ANALYSIS OF SECURITIES MARKET*Keywords: System analysis, probability density function, Dirichlet distribution, entropy, financial market, stock quotes.*

возможность применения распределения Дирихле в качестве модели процессов определяющих состояние сложных систем. Такое представление позволяет рассматривать моделируемую систему как единое целое, что значительно повышает эффективность управления с целью достижения поставленных целей.

Н.В. Истомин, Н.М. Труфанова
ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА ТОКОВУЮ
ПЕРЕДАВАЕМУЮ МОЩНОСТЬ КАБЕЛЕЙ, ПРОЛОЖЕННЫХ
ПО МОСТУ

Ключевые слова: тепломассоперенос, кабель, мост,
математическая модель.

Рассматривается трехмерная математическая модель сложного тепломассопереноса при прокладке кабелей по балочной конструкции моста. Выполнен анализ воздействия различных климатических условий на передаваемую мощность кабельных линий. Построены температурные поля в кабельных линиях с учетом лучистой энергии, естественной и вынужденной конвекции.

Е.Г. Кабулова, А.А. Бондарчук
ОЦЕНКА СХОДИМОСТИ ИТЕРАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ
ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Ключевые слова: задачи оптимизации, итерационные процедуры,
оценка сходимости, сжимаемые отображения.

Для оценки сходимости итерационной процедуры при решении задачи оптимального управления выходными технологическими параметрами предложено применение метода последовательных приближений на основе теории сжимаемых отображений. Доказано, что условия сходимости последовательных приближений к решению исследуемой задачи оптимизации сводятся не только к перебору решений систем уравнений, но и к существованию некоторой области, внутри которой выполняются достаточные условия сходимости.

А.В. Казаков, Е.И. Лекомцев
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТЕЧЕНИЯ В
КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ

Ключевые слова: стратифицированное течение,
осесимметричная постановка, закон Carreau-Yasuda, степенной
закон.

В данной статье смоделировано осесимметричное стратифицированное течение расплавов полимеров в кабельной головке. Произведён подбор законов течения полимерных материалов с помощью программного пакета ANSYS Polymat. Определены оптимальные технологические параметры процесса соэкструзии.

В.С. Карабцев, В.С. Каримов, Р.Р. Сайфиев
РАЗРАБОТКА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ
РАСЧЁТА ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ АВТОМОБИЛЯ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Ключевые слова: продольный профиль, извилистость, скоростной
режим, топливная экономичность, тягово-динамический расчет,
программная реализация.

В данной работе разработана методика расчёта топливной экономичности автомобиля с учетом продольного профиля дороги, его извилистости и безопасного скоростного режима. На основе полученной методики была разработана компьютерная программа, позволяющая автоматизировать процесс расчета тягово-динамических, топливно-экономических показателей автомобиля и определять диапазоны работы двигателя внутреннего сгорания.

For example, securities market analysis shows the possibility of the use of the Dirichlet distribution as process models the determinants of complex systems. Such representation is considered to be modeled as a single entity, which considerably increases the efficiency of governance with a view to achieving the goals.

N.V. Istomin, N.M. Trufanova
THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS ON THE
CURRENT TRANSMITTED POWER OF CABLES
PAVED ON THE BRIDGE

Keywords: heat and mass transfer, cable, bridge,
mathematical model.

A three-dimensional mathematical model of complex heat and mass transfer is considered when laying cables along a beam bridge structure. The analysis of the effect of different climatic conditions on the transmitted power of cable lines is performed. The temperature fields in the cable lines have been constructed taking into account radiant energy, natural and forced convection.

E.G. Kabulova, A.A. Bondarchuk
ESTIMATION OF CONVERGENCE OF ITERATIVE
SOLUTIONS IN THE FORMULATION OF OPTIMAL
CONTROL PROBLEMS

Keywords: the optimization problem, iterative procedure,
assessment of convergence, the compression of the display.
To assess the convergence of the iterative procedure in solving the problem of optimal control of the output process parameters, the application of the method of successive approximations based on the theory of compressible maps is proposed. It is proved that the conditions of convergence of successive approximations to the solution of the optimization problem under study are reduced not only to the search for solutions of systems of equations, but also to the existence of a certain area within which sufficient convergence conditions are satisfied.

A.V. Kazakov, E.I. Lekomcev
INVESTIGATION OF AXISYMMETRIC FLOW IN THE
CABLE DIES

Keywords: stratified flow, axisymmetric formulation,
Carreau-Yasuda law, Power law.

In this article the axisymmetric stratified flow of polymer melts in the cable die have been simulated. Selection of polymeric materials flow laws by means of the software ANSYS Polymat have been made. Technological parameters of coextrusion process have been identified.

V.S. Karabtsev, V.S. Karimov, R.R. Saifiev
DESIGN AND PROGRAM IMPLEMENTATION OF THE
METHOD OF CALCULATION OF FUEL EFFICIENCY
OF THE CAR WITH USE OF GEODETAILS

Keywords: long edged profile, tortuosity, high-speed mode,
fuel efficiency, traction and dynamic calculation, program
implementation.

In this work the method of calculation of fuel efficiency of the car taking into account a long edged profile of the road, its tortuosity and the safe high-speed mode is developed. On the basis of the received technique the program allowing to automate receiving traction and dynamic, fuel and economic indicators of the car and to determine ranges of engine operation of internal combustion was written.

В.В. Киселев, В.Д. Володин, А.А. Шаронов
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИМ
СЕРВОПРИВОДОМ С ДАТЧИКОМ ДАВЛЕНИЯ В КОНТУРЕ
РЕГУЛИРОВАНИЯ УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ

Ключевые слова: крано-манипуляторная установка, гидравлический сервопривод, датчик давления, угловое ускорение, ПИД-регулятор.

В статье приводится обоснование использования датчика давления в контуре регулирования ускорения системы управления гидравлическим сервоприводом. Рассмотрен трехконтурный сервопривод на основе коллекторного электродвигателя постоянного тока, где в качестве датчика ускорения используется шунт, измеряющий ток потребления электродвигателя. Выведена зависимость вращающего момента от тока потребления электродвигателя. Также выведена зависимость вращающего момента от давления рабочей жидкости для гидравлического сервопривода. На основе сравнения двух зависимостей был сделан вывод о возможности использования датчика давления в контуре регулирования ускорения в гидравлическом сервоприводе.

Д.А. Конотоп, П.В. Максимов
ПРИМЕНЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ
АНАЛИЗА КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ
МАЯТНИКОВОГО КВАРЦЕВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Ключевые слова: акселерометр, численное моделирование, ANSYS, механика деформируемого твердого тела (МДТТ).

В настоящее время существует необходимость разрабатывать устройства с большей эффективностью, чему способствует компьютерное моделирование. В работе рассматривается применение методов численного моделирования для оценки эффективности конструктивных изменений в кварцевом акселерометре с целью предотвращения нулевого сигнала. Установлено, что альтернативный вариант исполнения упругого элемента прибора приводит к существенному снижению погрешности механического тяжения. В работе также отражены возможные негативные особенности конструкции.

В.Н. Коханенко, М.Ф. Мицик, А.И. Кондратенко, Д.Б. Келексаев
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВУХМЕРНОГО ПОТОКА ЗА
БЕЗНАПОРНОЙ ТРУБОЙ КРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ
СВОБОДНОМ РАСТЕКАНИИ В ШИРОКОМ ОТВОДЯЩЕМ
РУСЛЕ

Ключевые слова: открытый водный бурный поток, безнапорный режим течения, трубы круглого сечения, горизонтальное широкое отводящее русло, свободное растекание, аналитический метод.

В работе предлагается аналитический метод определения параметров потока за круглыми трубами в безнапорном режиме течения бурного потока при его свободном растекании в широком горизонтальном русле. Произведен анализ факторов, влияющих на модель, и выявлены необходимые для достаточной адекватности на практике; установлено, что круглая форма трубы – это основной фактор. Движение потока в среднем принимается потенциальным. Определяется широкий спектр параметров, необходимых для конструирования крепления водопропускных сооружений и различного типа гасителей энергии, обеспечения актуальных скоростей потока за укрепленной частью русла не выше допускаемых.

П.В. Максимов, Д.А. Конотоп
ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА
С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АНАЛОГОВОГО КОНТУРА
ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Ключевые слова: акселерометр, электрический аналоговый контур, численное моделирование, MATLAB, Simulink.

В статье описывается способ численного моделирования работы маятникового компенсационного акселерометра с возможностью учета погрешностей тяжения, перекрестного ускорения; рассматриваются вопросы проектирования схемы усилителя

V.V. Kiselev, V.D. Volodin, A.A. Sharonov
HYDRAULIC SERVOMOTOR CONTROL SYSTEM
WITH PRESSRE SENSOR IN ANGULAR
ACCELERATION CONTROL LOOP

Keywords: crane, hydraulic servomotor, pressure sensor, angular acceleration, PID controller.

The justification of pressure sensor application in hydraulic servomotor control system's angular acceleration control loop feed-back provided in this paper. The subordinated control system for DC servomotor with current measurement circuit as feed-back reviewed in paper. DC motor torque's dependence of current is shown in paper. Hydraulic servomotor torque's dependence of pressure is shown in this paper to. Comparison of two these dependences gives justification of pressure sensor application in hydraulic servomotor control system.

D.A. Konotop, P.V. Maksimov
APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION FOR
ANALYSIS OF CONSTRUCTIVE PECULIARITIES OF
PENDULAR QUARTZ ACCELEROMETER

Keywords: accelerometer, numerical simulation, ANSYS, mechanics of deformable solids.

At present time, there is a need to develop devices with greater efficiency, which, undoubtedly, facilitates computer modeling. The application of the numerical modeling approach for estimating design changes in a quartz accelerometer with the purpose of preventing a zero signal is considered. It is established that an alternative embodiment of the elastic element of the device leads to a significant reduction in the error of mechanical tension. Possible negative design features are also reflected.

V.N. Kokhanenko, M.F. Mitsik, A.I. Kondratenko,
D.B. Keleksaev
CALCULATION OF PARAMETERS OF TWO-
DIMENSIONAL FLOW FOR NON-PRESSURE PIPE OF
CIRCULAR CROSS SECTION WITH FREE SPREADING
IN THE WIDE OUTLET CHANNEL

Keywords: open water turbulent flow, pressureless flow, round tubes, horizontal wide diverting channel, free flow, analytical method.

The paper proposes an analytical method for determining the flow parameters behind round tubes in the non-pressure flow regime of a rapid flow with its free spreading in a wide horizontal channel. The analysis of the factors influencing the model is made and the necessary for sufficient adequacy in practice are revealed; It is established that the round shape of the pipe is the main factor. The flow of the flow is assumed to be on the average potential. A wide range of parameters necessary for constructing the fastening of culverts and various types of energy dampers, ensuring the actual flow velocities beyond the reinforced part of the channel, is not defined.

P.V. Maksimov, D.A. Konotop
THE NUMERICAL MODEL OF PENDULUM
ACCELEROMETER WITH ELECTRICAL ANALOGUE
CIRCUIT OF FEEDBACK

Keywords: accelerometer, electrical analog circuit, numerical simulation, MATLAB, Simulink.

The article describes the approach of numerical simulation of the pendulum compensating accelerometer with the possibility of taking into account the errors of traction, cross acceleration, and also the design of the amplifier circuit of the

прибора. В ходе работы построена модель компенсационной электрической цепи, сформулирована связанная физико-механическая задача, для решения которой применялась платформа MATLAB/Simulink с использованием расширения Simscape Electronics.

Н.А. Рябкова, А.В. Казаков
СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ЧИСЛЕННОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Ключевые слова: сетка; смесь; течение; сравнение.

В данной статье разработана и решена модель процесса совместного течения трех полимерных жидкостей двумя методами: подвижной сетки и смеси. Для численной реализации использован программный пакет ANSYS Polyflow.

Л.С. Сабитов, Н.Ф. Кашапов, В.К. Ильин, Ю.М. Стрелков,
И.К. Киямов

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
 ГИБКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Ключевые слова: гибкая система, численно-аналитические методы, напряженно-деформированное состояние.

В работе представлены численно-аналитические методы расчета гибких систем на примере проводов воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Предложен новый способ защиты сталеалюминиевых проводов ВЛЭП от усталостных колебательных напряжений на выходе из поддерживающего зажима. Также авторами разработана программа ЭВМ AutoRSS.04 позволяющая рассчитать все компоненты напряженно-деформированного состояния узла и подобрать оптимальную форму.

Е.П. Сеногноева, А.С. Морозов, А.В. Ромодин
МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СТРУКТУРНОЙ НАДЕЖНОСТИ
СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ»

Ключевые слова: система электроснабжения, структурная надежность, методика оценки, модель, алгоритм.

Статья посвящена методике оценки структурной надежности системы электроснабжения предприятия ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Разработана модель и алгоритм работы оценки структурной надежности электрооборудования. Приводится апробация представленного подхода.

А.Б. Сорокин, Е.А. Зикеева
РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПО ТЕКСТУРЕ
МАТЕРИАЛА

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, распознавание объектов, определение текстуры материала, машинное обучение. Проведено исследование алгоритмов определения численных коэффициентов различных свойств материала, реализовано программное приложение для определения типа материала на основе значений его свойств.

Е.В. Субботин, Ю.М. Хасянова
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕН ПРЕБЫВАНИЯ ПОЛИМЕРА ПРИ
ТЕЧЕНИИ В ЗОНЕ ДОЗИРОВАНИЯ ОДНОШНЕКОВОГО
ЭКСТРУДЕРА

Ключевые слова: экструзия, расплав полимера, математическое моделирование, распределение времен пребывания.

В статье с помощью математического моделирования исследуется влияние технологических параметров работы одношнекового экструдера на распределение времен пребывания расплава полимера в зоне дозирования. Рассмотрено течение нагневостойкого полимерного материала в канале экструдера с кабельной головкой и открытым выходом.

device. In the course of the work the model of the compensation electric circuit was constructed. Thus, a coupled physico-mechanical problem was formulated, for which the MATLAB/Simulink platform was used using the Simscape Electronics extension.

N.A. Ryabkova, A.V. Kazakov
COMPARISON METHODS OF NUMERICAL SOLUTION
OF STRATIFIED FLOW

Keywords: grid; mixture; flow; comparison.

In this article has been developed and solved a model for the process of stratified flow of three polymeric liquids by two methods: a moving mesh and a mixture. For numerical realization was used the software ANSYS Polyflow.

L.S. Sabitov, N.F. Kashapov, V.K. Piyin, Yu.M. Strelkov,
I.K. Kiyamov
NUMERICAL-ANALYTICAL METHODS OF
CALCULATION OF STRESS-STRAIN STATE OF
FLEXIBLE SYSTEMS ON THE EXAMPLE OF POLES OF
OVERHEAD POWER LINES

Keywords: flexible system, numerical-analytical methods, stress-strain state.

The paper presents numerical and analytical methods for calculating flexible systems on the example of wires of overhead power lines (vlep). A new method of protection of steel-aluminum wires of vlep against fatigue oscillatory stresses at the output of the supporting clamp is proposed. Also, the authors developed a computer program Autors.04 allows you to calculate all the components of the stress-strain state of the node and choose the optimal shape.

E.P. Senognoeva, A.S. Morozov, A.V. Romodin
THE METHOD OF RELIABILITY ASSESSMENT OF
STRUCTURAL SYSTEMS OF POWER SUPPLY OF ООО
«LUKOIL-PERM»

Keywords: power supply system, structural reliability, assessment methodology, model, algorithm.

The article is devoted to the method of assessing the structural reliability of the power supply system of the company "LUKOIL-PERM". The model and algorithm of work of an assessment of structural reliability of electric equipment are developed. The approbation of the presented approach is given.

A.B. Sorokin, E.A. Zikeeva
OBJECT RECOGNITION USING ARTIFICIAL NEURAL
NETWORKS FOR THE TEXTURE OF THE MATERIAL

Keywords: artificial neural network, object recognition, determination of the texture of the material, machine learning.

The study of algorithms for determining the numerical coefficients of different properties of the material, implemented a software application to determine the type of material based on the values of its properties.

E.V. Subbotin, Y.M. Hasyanova
DETERMINATION RESIDENCE TIMES OF POLYMER
AT FLOW IN THE MELT ZONE OF SINGLE SCREW
EXTRUDER

Keywords: extrusion, polymer melt, mathematical modeling, residence times distribution.

In the article, the influence of technological parameters of the single screw extruder on the residence times distribution of polymer melt in the melt zone is studied using mathematical modeling. The flow of a heat-resistant polymer material in the extruder channel with a cable head and an open outlet is considered.

А.Э. Файзуллин, Н.М. Труфанова
АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЯНОЙ
СКВАЖИНЕ

Ключевые слова: нефтяная скважина, численные методы, теплоперенос, дебит, температурное поле.

В данной работе была разработана математическая модель процессов теплопереноса нефти в вертикальной скважине, рассмотрено распределение температуры по длине нефтяной скважины и было исследовано влияние различных факторов на температурный режим работы скважины. Также проведено сравнение турбулентного и ламинарного течения нефтяной жидкости.

А.Г. Щербинин, А.И. Кабирова
ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С
ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ключевые слова: индуктивность, изоляция, токопроводящая жила, численный метод, аналитический метод.

С помощью математического моделирования магнитных полей определены индуктивности силовых кабелей с токопроводящими жилами круглой и секторной формы. Для круглых токопроводящих жил проведено сравнение значений индуктивности, рассчитанных численным и аналитическим методами. Исследовано влияние толщины изоляции на индуктивность.

А.Г. Щербинин, Д.Ю. Корюкин
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ
ТОКОПРОВОДЯЩИХ ЖИЛ СЕКТОРНОЙ ФОРМЫ

Ключевые слова: сопротивление, плотность тока, поверхностный эффект, эффект близости, токопроводящая жила.

В статье рассмотрено определение сопротивления переменному току токопроводящих жил секторной формы с учетом влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Объектом исследования являются круглые и секторные жилы сечением 240 мм². Получено распределение плотности тока в рассматриваемых жилах и проведен анализ результатов рассчитанных сопротивлений по методу описанному в ГОСТ Р МЭК, аналитическим способом, а также с использованием программного пакета моделирования ANSYS Maxwell.

А.Г. Щербинин, А.Н. Кузнецов
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНОЙ
ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ,
ПРОЛОЖЕННЫХ В ЗЕМЛЕ

Ключевые слова: токовая нагрузка кабеля, условия прокладки, математическое моделирование.

Рассмотрено моделирование процессов тепловыделения нагруженных кабельных линий. Проведено определение токовых нагрузок силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 10 кВ с помощью программного комплекса ANSYS. Построены температурные поля для различных условий прокладки. Проведен сравнительный анализ результатов.

А.Г. Щербинин, В.С. Черепок
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ СИЛОВЫХ
КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ТОКОПРОВОДЯЩИМИ ЖИЛАМИ

Ключевые слова: кабель с секторными жилами, электрическая емкость, электрическое поле.

Проведено исследование электрического поля силовых кабелей с секторными токопроводящими жилами. По результатам исследования определена электрическая емкость и ее зависимость от толщины изоляции и радиуса закругления, при наличии и отсутствии металлической оболочки. Для реализации разработанной математической модели выбран программный комплекс ANSYS Maxwell.

A.E. Faizullin, N.M. Trufanova
ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES IN AN OIL
WELL

Keywords: oil well, numerical methods, heat and mass transfer, flow rate, temperature field.

In this article was developed a mathematical model of the processes of heat and mass transfer of oil in a vertical well, was considered the temperature distribution along the length of the oil well and was investigated the influence of various factors on the temperature regime of the well. We also compared turbulent and laminar flow of an oil fluid.

A.G. Shcherbinin, A.I. Kabirova
INVESTIGATION OF INDUCTIVITY OF POWER
CABLES BY MATHEMATICAL MODELING OF
MAGNETIC FIELDS

Keywords: inductance, insulation, conductor, numerical method, analytical method.

Inductance of power cables with conducting conductors of round and sectoral shape are determined by means of mathematical modeling of magnetic fields. A comparison of the inductance values was carried out for round conductors calculated by numerical and analytical methods. The influence of the insulation thickness on the inductance has been investigated.

A.G. Shcherbinin, D.Y. Koryukin
THE DETERMINATION OF THE AC RESISTANCE OF
CURRENT-CARRYING SECTOR-SHAPED
CONDUCTORS

Keywords: resistance, current density, surface effect, proximity effect, current-carrying conductor.

In this paper, determination of the AC resistance of current-carrying sector-shaped conductors, taking into account the surface effect and the proximity effect is considered. The objects of investigation are round and sector-shaped conductors with a cross section of 240 mm². The current density distribution in the conductors is obtained and the results of resistivity calculations are presented using the method described in the "GOST R IEC", in an analytical way, and using the ANSYS Maxwell simulation software package.

A.G. Shcherbinin, A.N. Kuznetsov
MATHEMATICAL MODELING OF THE STATIONARY
THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEM OF POWER
CABLES LAID IN THE GROUND

Keywords: cable current load, laying conditions, mathematical modeling.

In this paper the modeling of heat dissipation of cable lines is considered. The current loads of power cables with polyethylene insulation on the voltage of 10 kV are determined by standard methods and using the ANSYS software. Temperature fields for different laying conditions are constructed. A comparative analysis of the results is carried out.

A.G. Shcherbinin, V.S. Cherepok
INVESTIGATION OF THE ELECTRIC CAPACITY OF
THE POWER CABLES WITH SECTOR CORES

Keywords: cable with sector cores, electric capacity, electric field.

A study was made of the electric field of the power cables with sector cores. According to the results of the study, the electric capacity and its dependence of the thickness of the insulation and the radius of curvature obtained in the presence and absence of a metal shell. ANSYS Maxwell software package was chosen to implement the developed mathematical model.

Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

Договор публичной оферты по обработке персональных данных

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья" ООО "Научно-технический вестник Поволжья" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
ПОВОЛЖЬЯ

№7 2018

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 19.07.2018 Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

9,3 усл.печ.л. 10,7 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1416.

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»