

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК  
ПОВОЛЖЬЯ**

**№3 2019**

**Направления:**

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

**02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

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

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

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

**Казань**

**2019**

**УДК 60**

**ББК 30-1**

**Н-66**

**Н-66** Научно-технический вестник Поволжья. №3 2019г. – Казань:  
ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – 154 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](http://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, 2019 г.**

## СОДЕРЖАНИЕ

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

- С.А. Духновский* ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГОДУНОВА-СУЛТАНГАЗИНА 9
- В.Ш. Ройтенберг* О ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЯХ БЕРНУЛЛИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ 12

**02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

- С.И. Гурский, В.А. Тафеенко* ВЛИЯНИЕ ДВУХЗАРЯДНЫХ КАТИОНОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ АНИОНА 3-ЦИАНО-4-ДИЦИАНОМЕТИЛЕН-5-ОКСО-4,5-ДИГИДРО-1Н-ПИРРОЛ-2-ОЛАТА В АЦЕТОНИТРИЛЕ 16
- И.М. Ильина, Е.А. Петровичева* ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРЕДРЕАКТОРОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ 21
- Г.Е. Кокиева, А.И. Павлова, И.Н. Аммосов, Д.А. Соколов, Г.Н. Сидоров, М.Р. Слепцов, А.А. Корякин, А.Г. Васильев* ПРОЦЕСС АЭРИРОВАНИЯ В АЭРАТОРЕ КОЛОНКОВОГО ТИПА 25
- Г.Е. Кокиева, А.И. Павлова, А.К. Иванов* ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА В ОБОРУДОВАНИИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ 28
- А.В. Митрофанова, Е.А. Фортальнова, М.Г. Сафроненко, Е.Д. Политова, А.В. Мосунов* ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО ТИТАНАТА ФЕРРИТА ВИСМУТА, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ Nb(V) 31
- Е.Ю. Образцова, А.В. Рухов, И.А. Жабкина, Е.С. Бакунин* ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АДСОРБЦИИ КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛОВОГО ОРАНЖЕВОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ОКИСЛЕННОГО НАНОГРАФИТА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ 35
- И.С. Полковников, В.В. Пантелеева, А.Б. Шеин* АНОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА МОНОСИЛИЦИДЕ МАРГАНЦА В РАСТВОРАХ ХЛОРОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ 39

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

- А.Ю. Барыкин, Д.И. Нуретдинов, А.М. Фролов, С.М. Кучев* ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕСУРСА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ 43
- А.П. Буйносов, К.Н. Яковлев, А.В. Хваловский* ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ НА ИЗНОС БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР 46
- Н.Н. Заболотская, Г.Ф. Журавлева* ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА НА ПАО «КАМАЗ» 50
- О.Ю. Кустов, И.В. Храпцов, Р.В. Бульбович, М.А. Лобов* ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАКЛОННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ В ИНТЕФЕРОМЕТРЕ 53
- В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, С.И. Лантев* ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА ГАЗОТУРБОВОЗОВ В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО НА ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ 57

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

<i>Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, П.М. Дёмкин, К.Ю. Панькин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ДИОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНОГО ТОКА	61
<i>Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, К.Ю. Панькин, П.М. Дёмкин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСХЕМ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕХОД-КОРПУС	65
<i>Н.Н. Беспалов, А.В. Евишев, Д.С. Кондрашин</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ	69
<i>М.П. Данилаев, Н.В. Дорогов, Ф.А. Карамов, В.А. Куклин, А.В. Пушкарева</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДВУХФАЗНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПОТОК С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ СУБМИКРОННОГО РАЗМЕРА	74
<i>А.В. Мускатыньев, П.П. Балясов</i> ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА В НАПРЯЖЕНИЕ	78
<i>И.В. Нелин, М.К. Седанкин, С.Г. Веснин, В.А. Скуратов, С.Д. Мерцалов</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОЧКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ	82
<i>П.В. Писарев, А.А. Паньков, А.Н. Аношкин</i> ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ И КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ	87
<i>А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов, Л.А. Гайнулова</i> АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ	91

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

<i>А.И. Акимов, И.А. Акимов, Д.И. Сиделов</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОСЕВОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ	95
<i>В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, К.Г. Галстян, С.Л. Леванов</i> ОБОСНОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕЙТРОННОГО КОНВЕРТЕРА НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА В РАМКАХ ПРОЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ НГТУ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА	99
<i>В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.А. Бобров</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ДРОССЕЛЕЙ И ФИЛЬТРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРЁХФАЗНЫХ СЕТЯХ	102
<i>Л.З. Гумерова</i> ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ» ДЛЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ	107
<i>В.Н. Дютин</i> МОДЕЛЬ ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА	111
<i>Т.И. Епанчинцев</i> ОТКРЕПЛЕНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ОТ НЕВОЗБУДИМОГО ПРЕПЯТСТВИЯ В ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ МИОКАРДА С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ	115

<i>Н.А. Мунасыпов</i> ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ С АДДИТИВНЫМ КРИТЕРИЕМ ЭФФЕКТИВНОСТИ	119
<i>В.В. Олоничев, Б.А. Староверов, М.А. Смирнов</i> ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ	123
<i>Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова</i> СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТАХ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ	126
<i>Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова</i> АЛГОРИТМ РАБОТЫ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТАХ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА	129
<i>А.Б. Сорокин, Е.В. Бражникова, В.И. Тихвинский</i> СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	133
<i>Л.А. Феокистова, Т.В. Рзаева</i> НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ ANSI	136
<i>Д.Ю. Чернышов, В.И. Марчук, С.В. Маков, А.Ю. Минаев</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ	140
<b>АННОТАЦИИ</b>	144

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

<i>S.A. Dukhnovsky</i> EXPONENTIAL STABILITY OF SOLUTIONS OF THE KINETIC SYSTEM OF GODUNOV-SULTANGAZIN EQUATIONS	9
<i>V.Sh. Roitenberg</i> ON BERNOULLI DIFFERENTIAL EQUATION WITH PERIODIC COEFFICIENTS	12

**02.00.00 — CHEMICAL SCIENCES**

<i>S.I. Gurskiy, V.A. Tafeenko</i> EFFECT OF DOUBLY-CHARGED TRANSITION METAL CATIONS ON LUMINESCENCE OF 3-CYANO-4-DICYANOMETHYLENE-5-OXO-4,5-DIHYDRO-1H-PYRROLE-2-OLATE ANION IN ACETONITRILE	16
<i>I.M. Ilyina, E.A. Petrovicheva</i> THE EFFECT OF CONSTRUCTION WORKING ZONES ON PREDICTOR OF TURBULENT FLOW	21
<i>G.E. Kokieva, A.I. Pavlova, I.N. Ammosov, D.A. Sokolov, G.N. Sidorov, M.R. Slepsov, A.A. Koryakin, A.G. Vasiliev</i> THE PROCESS OF AERATION IN THE AERATOR CORE TYPE	25
<i>G.E. Kokieva, A.I. Pavlova, A.K. Ivanov</i> THE INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF MICROBIAL SYNTHESIS IN HARDWARE OF A NEW DESIGN	28
<i>A.V. Mitrofanova, E.A. Fortalnova, M.G. Safronenko, E.D. Politova, A.V. Mosunov</i> PHASE FORMATION AND PROPERTIES OF SOLID SOLUTIONS BASED ON LAYERED BISMUTH TITANATE FERRITE CONTAINING Nb(V) CATIONS	31
<i>E.Yu. Obraztsova, A.V. Rukhov, I.A. Gabkina, E.S. Bakunin</i> PHYSICAL AND CHEMICAL FEATURES OF ADSORPTION OF METHYL ORANGE DYE ON THE SURFACE OF OXIDIZED NANOGRAFITE SYNTHESIZED BY ELECTROCHEMICAL METHOD	35
<i>I.S. Polkovnikov, V.V. Panteleeva, A.B. Shein</i> ANODIC PROCESSES ON MANGANESE MONOSILICIDE IN HYDROCHLORIC ACID	39

**05.02.00 — TECHNICAL SCIENCES — MECHANICAL ENGINEERING AND ENGINEERING SCIENCE**

<i>A.Yu. Barykin, D.I. Nuretdinov, A.M. Frolov, S.M. Kuchev</i> RESEARCH OF THE INTERRELATION OF OPERATIONAL PARAMETERS AND THE RESOURCE OF THE MOTOR ENGINE	43
<i>A.P. Buinosov, K.N. Yakovlev, A.V. Chvalovsky</i> THE INFLUENCE OF THE OPERATING CONDITIONS OF THE LOCOMOTIVES ON THE WEAR OF WHEEL PAIR TREADS	46
<i>N.N. Zabolotskaya, G.F. Zhuravleva</i> ADVANTAGES OF INTRODUCING THE SYSTEM OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AT KAMAZ PJSC	50
<i>O.Yu. Kustov, I.V. Khramtsov, R.V. Bulbovich, M.A. Lobov</i> ESTIMATION OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF SOUND-ABSORBING STRUCTURE AT INCLINED ORIENTATION IN INTERFEROMETER	53
<i>V.S. Nagovitsyn, A.P. Buinosov, S.I. Laptev</i> ORGANIZATION OF REPAIR OF LOCOMOTIVE SERVICE LOCOMOTIVE DEPOT AT THE SITE OF THE RAILWAY	57

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

<i>N.N. Beshpalov, Y.V. Goryachkin, P.M. Dyomkin, K.Y. Pankin</i> MODELING OF ELECTRICAL AND THERMAL PROCESSES OCCURRING IN THE POWER DIODE AT THE IMPACT OF THE CURRENT	61
--	----

<i>N.N. Bespalov, Y.V. Goryachkin, K.Y Pankin, P.M. Dyomkin</i> MODELING TEST MODES FOR MICROCIRCUITS IN DETERMINING THE THERMAL RESISTANCE OF JUNCTION-CASE	65
<i>N.N. Bespalov, A.V. Evishev, D.S. Kondrashin</i> MODELING OF TEST MODES POWER SEMICONDUCTOR DEVICES IN A STATE OF LOW CONDUCTIVITY	69
<i>M.P. Danilaev, N.V. Dorogov, F.A. Karamov, V.A. Kuklin, A.V. Pushkareva</i> THE DEVICE FOR LOW-SPEED TWO-PHASE GAS FLOW FORMING WITH SUBMICRONIC SIZE SOLID PARTICLES	74
<i>A.V. Muskatniev, P.P. Balyasov</i> PULSE DURATION CONVERTER VOLTAGE	78
<i>I.V. Nelin, M.K. Sedankin, S.G. Vesnin, V.A. Skuratov, S.D. Mertsalov</i> MATHEMATICAL SIMULATION OF HEATING OF KIDNEY FOR SOLVING THE PROBLEMS OF RADIOMETRY	82
<i>P.V. Pisarev, A.A. Pankov, A.N. Anoshkin</i> NUMERICAL CALCULATION OF ACOUSTIC EFFICIENCY OF HELMHOLTZ RESONATORS OF PRIZMATIC AND CONICAL FORMS	87
<i>A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov, L.A. Gainulova</i> ANALYSIS OF THE PERFORMANCE SPEED AND SENSITIVITY OF THERMAL ELEMENTS FOR THERMAL ANALYSIS OF SUBSTANCES	91

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

<i>A.I. Akimov, I.A. Akimov, D.I. Sidelov</i> INVESTIGATION OF TEMPERATURE STRESS AND STRAIN IN THE PRODUCTION OF MULTILAYER STRUCTURES WITH AXIAL AND CENTRAL SYMMETRY POLYMERIZATION	95
<i>V.V. Andreev, N.G. Andreev, K.G. Galstian, S.L. Levanov</i> JUSTIFICATION OF RADIATION SAFETY OF A NUTRON CONVERTER FOR ALL STAGES OF THE LIFE CYCLE IN THE PROJECT-ORIENTED EDUCATION OF NNSTU N.A. R.E. ALEKSEEV STUDENTS	99
<i>V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.A. Bobrov</i> SIMULATION OF POWER FACTOR CORRECTOR OPERATION MODES AND ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF INPUT INDUCTANCES AND FILTER CAPACITORS PARAMETERS ON THE QUALITY OF CONSUMED POWER ENERGY IN 3-PHASE GRIDS	102
<i>L.Z. Gumerova</i> EXPERIENCE OF USING CLOUD SERVICES IN TEACHING THE SUBJECT "INFORMATION TECHNOLOGIES IN PROFESSIONAL ACTIVITIES» FOR PEDAGOGICAL TRAINING AREAS	107
<i>V.N. Dyupin</i> MODEL OF VIRTUAL ADAPTATION SPACE	111
<i>T.I. Epanchintsev</i> SPIRAL WAVE UNPINNING FROM UNEXCITABLE OBSTACLE IN 2D CARDIAC MODEL USING HIGH-FREQUENCY STIMULATION	115
<i>N.A. Munasypov</i> ON ONE APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF RESOURCE DISTRIBUTION IN THE RECOGNITION SYSTEM WITH ADDITIVE CRITERION OF EFFICIENCY	119
<i>V.V. Olonichev, B.A. Staroverov, M.A. Smirnov</i> SOFTWARE PRODUCTIVITY INCREASING FOR MICROCONTROLLER BASED ADAPTIVE CONTROL SYSTEM	123
<i>L.A. Simonova, V.V. Abramova, G.M. Kapitonova</i> STRUCTURAL MODEL OF INFORMATION FLOWS MANAGEMENT SYSTEM IN ALTERNATIVE TECHNOLOGICAL ROUTES AT THE STAGE OF PRODUCTION PREPARATION USING MULTI-AGENT SYSTEM	126
<i>L.A. Simonova, V.V. Abramova, G.M. Kapitonova</i> ALGORITHM OF WORK OF MULTI-AGENT INFORMATION FLOWS MANAGEMENT SYSTEM IN ALTERNATIVE TECHNOLOGICAL ROUTES AT THE STAGE OF PRODUCTION PREPARATION	129
<i>A.B. Sorokin, E.V. Brazhnikova, V.I. Tihvinskij</i> SYSTEM STUDIES FOR THE DESIGN OF THE SITUATIONAL CENTERS, DECISION SUPPORT	133

<i>L.A. Feoktistova, T.V. Rzayeva</i> SOME PECULIARITIES OF DRAWING DESIGN DOCUMENTATION IN ANSI SYSTEM	136
<i>D.Y. Chernyshov, V.I. Marchuk, S.V. Makov, A.Y. Minaev</i> RESEARCH SOLUTIONS SELF-DIFFUSION OF ELECTROLYTES IN NONAQUEOUS NANOCARBON DISPERSION MATRICES	140
<b>ABSTRACTS</b>	144

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ — МАТЕМАТИКА (01.01.00)**

01.01.02

**С.А. Духновский**

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
кафедра прикладной математики,  
Москва, sergeidukhnvskijj@rambler.ru

**ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ КИНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГОДУНОВА-СУЛТАНГАЗИНА**

*В работе рассматривается кинетическая система уравнений Годунова-Султангазина. Система Годунова-Султангазина является частным случаем дискретного уравнения Больцмана. Формулируется теорема о стабилизации решений системы Годунова-Султангазина.*

Ключевые слова: *система Годунова-Султангазина, устойчивость, число Кнудсена.*

Основным уравнением в кинетической теории разряженных газов является нелинейное уравнение Больцмана [1-2]. Гипотеза для общих нелинейных гиперболических уравнений такова, что решения на больших временах распадаются на суперпозицию слабозаимодействующих солитонов и убывающую дисперсионную волну [3]. Дискретные кинетические системы уравнений обсуждаются в работах [4-10]. К таким системам относятся одномерные модели Карлемана и Годунова-Султангазина, двумерная и трехмерная модель Бродуэлла. Образование хаотической динамики для системы Карлемана описано в работе [11]. Численный эксперимент для системы Годунова-Султангазина исследован в [12]. Глобальные теоремы существования решения для данной системы уравнений приведены в работах [13-14].

Рассмотрим одномерную систему уравнений Годунова-Султангазина [2, 13-17]:

$$\begin{aligned} \partial_t u + \partial_x u &= \frac{1}{\varepsilon} (v^2 - uw), t > 0, x \in \mathbb{R}, \\ \partial_t v &= -\frac{2}{\varepsilon} (v^2 - uw), 0 < \varepsilon < 1, \\ \partial_t w - \partial_x w &= \frac{1}{\varepsilon} (v^2 - uw) \end{aligned} \tag{1}$$

с периодическими начальными условиями

$$\begin{aligned} u|_{t=0} &= u^0(x), v|_{t=0} = v^0(x), w|_{t=0} = w^0(x), \\ u^0(x) &= u^0(x + 2\pi), v^0(x) = v^0(x + 2\pi), w^0(x) = w^0(x + 2\pi). \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь  $u = u(x, t), v = v(x, t), w = w(x, t)$  - плотности трех групп частиц,  $\varepsilon$  - число Кнудсена.

Ищем решение задачи Коши (1), (2) в виде

$$u = u_e + \varepsilon^2 (u_e)^{1/2} \hat{u}, v = v_e + \varepsilon^2 (v_e)^{1/2} \hat{v}, w = w_e + \varepsilon^2 (w_e)^{1/2} \hat{w}, \tag{3}$$

где  $v_e^2 = u_e w_e > 0$  - состояние равновесия,

$$\hat{u}(t, x) = u_0(t) + \sum_{k \in Z_0} u_k(t) e^{ikx}, \hat{v}(t, x) = v_0(t) + \sum_{k \in Z_0} v_k(t) e^{ikx}, \hat{w}(t, x) = w_0(t) + \sum_{k \in Z_0} w_k(t) e^{ikx},$$

$$Z_0 = \{k = \pm 1, \pm 2, \dots\}.$$

Будем решать нашу задачу в весовом пространстве Соболева  $W_{2,\gamma}^1(R_+; H_\sigma)$  с соответствующей нормой:

$$\|\hat{u}\|_{W_{2,\gamma}^1(R_+;H_\sigma)} = \left\| \frac{d}{dt} \hat{u} \right\|_{L_{2,\gamma}(R_+;H_\sigma)} + \|\hat{u}\|_{L_{2,\gamma}(R_+;H_\sigma)},$$

где

$$\|\hat{u}\|_{L_{2,\gamma}(R_+;H_\sigma)}^2 = \int_0^{+\infty} e^{2\gamma t} |u_0(t)|^2 dt + \int_0^{+\infty} e^{2\gamma t} \sum_{k \in Z_0} |k|^{2\sigma} |u_k(t)|^2 dt < \infty, \gamma > 0,$$

$$\|\hat{u}\|_{H_\sigma}^2 = |u_0^0|^2 + \sum_{k \in Z_0} |k|^{2\sigma} |u_k^0|^2.$$

Подставляя (3) в исходную систему, получаем возмущенную систему уравнений Годунова-Султангазина:

$$\partial_t \hat{u} + \partial_x \hat{u} - \frac{1}{\varepsilon} w_e^{1/2} (2v_e^{1/2} \hat{v} - u_e^{1/2} \hat{w} - w_e^{1/2} \hat{u}) = \varepsilon w_e^{1/2} (\hat{v}^2 - \hat{u} \hat{w}), x \in \mathbb{R}, t > 0,$$

$$\partial_t \hat{v} + \frac{2}{\varepsilon} v_e^{1/2} (2v_e^{1/2} \hat{v} - u_e^{1/2} \hat{w} - w_e^{1/2} \hat{u}) = -2\varepsilon v_e^{1/2} (\hat{v}^2 - \hat{u} \hat{w}),$$

$$\partial_t \hat{w} - \partial_x \hat{w} - \frac{1}{\varepsilon} u_e^{1/2} (2v_e^{1/2} \hat{v} - u_e^{1/2} \hat{w} - w_e^{1/2} \hat{u}) = \varepsilon u_e^{1/2} (\hat{v}^2 - \hat{u} \hat{w})$$

с периодическими начальными условиями

$$\hat{u}|_{t=0} = \hat{u}^0(x), \hat{v}|_{t=0} = \hat{v}^0(x), \hat{w}|_{t=0} = \hat{w}^0(x).$$

**Теорема.** Пусть  $\sigma > 2$  и выполняется условие

$$\|\hat{u}^0\|_{H_\sigma} + \|\hat{v}^0\|_{H_\sigma} + \|\hat{w}^0\|_{H_\sigma} \leq \varepsilon^{3/4} q,$$

где  $q$  не зависит от  $\varepsilon$ . Тогда положительное состояние равновесия  $(u_e = const, v_e = const, w_e = const, v_e^2 = u_e w_e)$  является экспоненциально устойчивым:

$$\|u(x,t) - u_e\|_{H_\sigma} \leq c_1 e^{-2\gamma t},$$

$$\|v(x,t) - v_e\|_{H_\sigma} \leq c_2 e^{-2\gamma t},$$

$$\|w(x,t) - w_e\|_{H_\sigma} \leq c_3 e^{-2\gamma t},$$

где  $c_1, c_2, c_3$  - положительные константы, зависящие от суммы норм начальных данных.

**Список литературы**

1. Больцман Л. Избранные труды. М.: Наука. 1984. 590 с.
2. Broadwell J. E. Study of rarified shear flow by the discrete velocity method // J. Fluid Mech. 1964. Vol. 19, No. 3. P. 401-414.
3. Buslaev V. S., Komech A. I., Kopylova E. A., and Stuart D. On asymptotic stability of solitary waves in nonlinear Schrodinger equation coupled to nonlinear oscillator // Commun. Partial Differ. Equations. 2008. Vol. 33, No. 4, 669-705.
4. Годунов С.К., Султангазин У.М. О дискретных моделях кинетического уравнения Больцмана // Успехи математических наук. 1974. Т. 26. Вып. 3 (159). С. 3-51.
5. Веденяпин В.В. О разрешимости в целом задачи Коши для некоторых дискретных моделей уравнения Больцмана // Доклады Академии наук СССР. 1974. Т. 215, № 1. С. 21-23.
6. Радкевич Е.В. О дискретных кинетических уравнениях // Доклады Академии наук. 2012. Т. 447, № 4. С. 369-373.
7. Васильева О.А., Духновский С.А., Условие секулярности кинетической системы Карлемана // Вестник МГСУ. 2015. № 7. С. 33-40.
8. Духновский С.А., Аппроксимационное решение кинетической системы Карлемана // Строительство: наука и образование. 2017. Т. 7, Вып. 3(24). С. 10-18.
9. Радкевич Е.В. О поведении на больших временах решений задачи Коши для двумерного кинетического уравнения // Современная математика. Фундаментальные направления. 2013. Т. 47. С.108-139.
10. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова // М.: Физматлит. 2001. 112 с.
11. Radkevich E.V., Vasil'eva O.A. Generation of chaotic dynamics and local equilibrium for the Carleman equation // Journal of Mathematical Sciences. 2018. Vol. 224, No. 5. P. 764-794.
12. Васильева О.А. Численное исследование системы уравнений Годунова-Султангазина. Периодический случай // Вестник МГСУ. 2016. № 4. С. 27-35.
13. Nishida T., Mimura M. On the Broadwell's model for a simple discrete velocity gas // Proc. Japan Acad. 1974. Vol. 50, No. 10. P. 812-817.
14. Kawashima S. The asymptotic equivalence of the Broadwell model equation and its Navier-Stokes model equation // Japan. J. Math. 1981. Vol. 7, No. 1, P. 1-43.
15. Ильин О.В. Изучение существования решений и устойчивости кинетической системы Карлемана // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2007. Т. 47, № 12. С. 2076-2087.
16. Духновский С.А. О скорости стабилизации решений задачи Коши для уравнения Карлемана с периодическими начальными данными // Вест. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2017. Т. 21, № 1. С.7-41.
17. Vasil'eva O.A., Dukhnovskii S.A., Radkevich E.V. On the nature of local equilibrium in the Carleman and Godunov-Sultangazin equations // Journal of Mathematical Sciences. 2018. Vol. 235, No. 4. P. 393-453.

01.01.02

**В.Ш. Ройтенберг канд. физ.-мат. наук**

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

### О ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЯХ БЕРНУЛЛИ С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

Для уравнений Бернулли с периодическими коэффициентами рассматриваются фазовые портреты на компактификации цилиндрического фазового пространства. Описаны грубые уравнения – уравнения, топологическая структура фазовых портретов которых не меняется при малых возмущениях коэффициентов.

Ключевые слова: дифференциальное уравнение Бернулли с периодическими коэффициентами, цилиндрическое фазовое пространство, грубое уравнение, предельный цикл.

**Введение.** Будем рассматривать уравнения Бернулли

$$b: \dot{x} = b_1(t)x + b_2(t)x^\nu \quad (1)$$

где  $b_1(t)$  и  $b_2(t)$  –  $\omega$ -периодические  $C^1$ -функции, параметр  $\nu \in \mathbf{R} \setminus \{0,1\}$  и соответствующее ему векторное поле

$$(b_1(s)x + b_2(s)x^\nu)\partial/\partial x + \partial/\partial s \quad (2)$$

на фазовом пространстве  $\Phi = (0, \infty) \times \mathbf{R} / \omega\mathbf{Z}$ , которое будем обозначать той же буквой  $b$ , что и уравнение. Траектории этого векторного поля будем называть *траекториями уравнения (1) на  $\Phi$* .

Уравнения Бернулли с периодическими коэффициентами используются при моделировании ряда экономических и биологических процессов.

Как известно, уравнения Бернулли интегрируются в квадратурах. Однако, представляет интерес и анализ их фазовых портретов, которые естественно рассматривать не только в фазовом пространстве  $\Phi$ , но и на его компактификации, аналогично уравнениям Риккати и Абеля [1, 2].

Обозначим  $V(\omega, \nu)$  множество уравнений Бернулли вида (1) с фиксированным параметром  $\nu$ . Пусть  $C_\omega^1$  – банахово пространство  $\omega$ -периодических  $C^1$ -функций с  $C^1$ -нормой. Биекция  $C_\omega^1 \oplus C_\omega^1 \rightarrow V(\omega, \nu)$ , ставящая в соответствие элементу  $(b_1, b_2) \in C_\omega^1 \oplus C_\omega^1$  уравнение  $b$ , вводит в  $V(\omega, \nu)$  структуру банахово пространства.

**1. Уравнение Бернулли с параметром  $\nu \in (-\infty, 0) \cup (0, 1)$ .** Компактифицируем фазовое пространство. Обозначим  $[0, \infty]$  – компактификацию промежутка  $[0, \infty)$ . Превратим  $[0, \infty]$  в одномерное  $C^\infty$ -многообразие с краем, взяв в качестве карт  $(U_i, h_i)$ ,  $i = 1, 2, 3$ , где  $U_1 = (0, \infty)$ ,  $h_1(x) = x$ ,  $U_2 = [0, \infty)$ ,  $h_2(x) = x^{1-\nu}$ ,  $U_3 = (0, \infty]$ ,  $h_3(x) = 1/x$  при  $x \in (0, \infty)$  и  $h_3(x) = 0$  при  $x = \infty$ . За новое фазовое пространство возьмем  $\bar{\Phi} = [0, \infty] \times \mathbf{R} / \omega\mathbf{Z}$ . Его край состоит из двух «окружностей»  $\Gamma_0 = \{0\} \times \mathbf{R} / \omega\mathbf{Z}$  и  $\Gamma_\infty = \{\infty\} \times \mathbf{R} / \omega\mathbf{Z}$ .

Векторное поле (2) в координатах  $(y, s)$ ,  $y = h_2(x)$ ,  $x \in (0, \infty)$ , имеет вид

$$((1-\nu)b_1(s)y + (1-\nu)b_2(s))\partial/\partial y + \partial/\partial s, \quad (3)$$

а в координатах  $(z, s)$ ,  $z = h_3(x)$ ,  $x \in (0, \infty)$ , вид

$$(-b_1(s)z - b_2(s)z^{2-\nu})\partial/\partial z + \partial/\partial s. \quad (4)$$

Продолжим теперь векторное поле  $b$  до  $C^1$ -векторного поля  $\bar{b}$  на  $\bar{\Phi}$  определив  $\bar{b}$  равенством (3) в координатах  $(y, s)$ ,  $y = h_2(x)$ ,  $x \in U_2$  и равенством (4) в координатах  $(z, s)$ ,  $z = h_3(x)$ ,  $x \in U_3$ . Траектории поля  $\bar{b}$  будем называть *траекториями уравнения  $b$  на  $\bar{\Phi}$* .

В точках  $\Gamma_0$  поле  $\bar{b}$  имеет вид  $(1-\nu)b(s)\partial/\partial y + \partial/\partial s$ . Поэтому при  $b_2(s_0) = 0$  траектория поля  $\bar{b}$  в точке  $S_0 = (0, s_0)$  касается  $\Gamma_0$ . Точку  $S_0$  будем называть *особой точкой* поля  $\bar{b}$ . Если  $s_0$  – простой нуль ( $b'_2(s_0) \neq 0$ ), то  $S_0$  будем называть *простой особой точкой*.

Обозначим  $\Sigma V(\omega, \nu)$  множество уравнений  $b \in V(\omega, \nu)$ , для которых

1)  $m = m(b) = \int_0^\omega b_1(t)dt \neq 0$ , 2) все особые точки простые, 3) нет траектории, проходящих через две особых точки.

Так как  $2-\nu > 1$ , то при  $m > 0$  ( $m < 0$ ) «окружность»  $\Gamma_\infty$  – устойчивая (неустойчивая) периодическая траектория поля  $\bar{b}$ .

Векторное поле (3), рассматриваемое на  $\mathbb{R} \times \mathbb{R} / \omega \mathbb{Z}$ , имеет единственную периодическую траекторию  $y = \eta(t)$ ,  $s = t$ , являющуюся устойчивой (неустойчивой) гиперболической траекторией при  $m < 0$  ( $m > 0$ ). Если  $\forall t \in [0, \omega] \eta(t) > 0$ , то уравнения  $y = \eta(t)$ ,  $s = t$  задают и периодическую траекторию уравнения  $b$  в  $\bar{\Phi}$ .

**2. Уравнение Бернулли с параметром  $\nu \in (1, \infty)$ .** Поскольку в этом случае правая часть уравнения  $C^1$ -функция на  $[0, \infty)$ , то естественно рассматривать следующую структуру гладкого многообразия на  $[0, \infty]$  и, соответственно, на  $\bar{\Phi}$ . Возьмем в качестве локальных карт  $(U_i, h_i)$ ,  $i = 1, 2$ , где  $U_1 = [0, \infty)$ ,  $h_1(x) = x$ ,  $U_2 = (0, \infty]$ ,  $h_2(x) = x^{1-\nu}$  при  $x \in (0, \infty)$  и  $h_3(x) = 0$  при  $x = \infty$ . Тогда в карте  $(U_1, h_1)$  векторное поле  $\bar{b}$  имеет вид (2), а в карте  $(U_2, h_2)$  вид (3). Множество  $\Sigma V(\omega, \nu)$  определим, как и в предыдущем случае, условиями 1)–3). Тогда  $\Gamma_0$  – устойчивая (неустойчивая) гиперболическая периодическая траектория при  $m < 0$  ( $m > 0$ ), нулям  $s_0$  функции  $b_2$ , соответствуют *особые точки*  $S_0 = (\infty, s_0) \in \Gamma_\infty$  в которых поле  $\bar{b}$  касается  $\Gamma_\infty$ . Уравнения  $y = \eta(t)$ ,  $s = t$ , задающие периодическую траекторию поля (3), рассматриваемого на  $\mathbf{R} \times \mathbf{R} / \omega \mathbf{Z}$ , задают при условии  $\forall t \in [0, \omega] \eta(t) > 0$  и гиперболическую периодическую траекторию поля  $\bar{b}$ .

**3. Грубость уравнений Бернулли.** Уравнение  $b \in V(\omega, \nu)$  назовем *грубым*, если существует такая его окрестность  $V$  в  $V(\omega, \nu)$ , что для любого уравнения  $b_* \in V$  существует гомеоморфизм  $h: \bar{\Phi} \rightarrow \bar{\Phi}$ , переводящий траектории уравнения  $b_*$  на  $\bar{\Phi}$  в траектории уравнения  $b_*$  на  $\bar{\Phi}$ .

**Теорема.** (А) Множество  $\Sigma V(\omega, \nu)$  открыто и всюду плотно в  $V(\omega, \nu)$ .

(Б) Уравнение Бернулли  $b \in V(\omega, \nu)$ ,  $\nu \in \mathbf{R} \setminus \{0, 1\}$ , является грубым тогда и только тогда, когда  $b \in \Sigma V(\omega, \nu)$ .

**Доказательство.** Рассмотрим случай  $\nu \in (-\infty, 0) \cup (0, 1)$ . Случай  $\nu \in (1, \infty)$  рассматривается аналогично.

Сначала докажем плотность  $\Sigma V(\omega, \nu)$ . Пусть  $b \in V(\omega, \nu)$ . Зададим произвольное число  $\varepsilon > 0$ . По теореме Вейерштрасса о приближении существует уравнение  $b^* \in V(\omega, \nu)$ :  $\dot{x} = b_1(t)x + b_2^*(t)x^\nu$ , такое, что функция  $b_2^*$  аналитическая и не постоянная, а  $\|b^* - b\| < \varepsilon/2$ .

Рассмотрим уравнение  $b^{\alpha, \beta} \in V(\omega, \nu)$ :  $\dot{x} = (b_1(t) - \alpha)x + (b_2^*(t) + \beta)x^\nu$ . При достаточно малом  $\delta > 0$  для всех  $\alpha, \beta \in (0, \delta)$   $\|b^{\alpha, \beta} - b\| < \varepsilon$ ,  $m(b^{\alpha, \beta}) = \int_0^\omega b_1(t)dt - \alpha\omega \neq 0$ ,  $b_2^*(t) + \beta$  имеет на  $[0, \omega]$

только простые нули. Фиксируем  $\alpha_0, \beta_0 \in (0, \delta)$ . Уравнение  $b^{\alpha, \beta_0}$ ,  $\alpha \in (\alpha_0, \delta)$ , имеет те же особые точки, что и  $b^{\alpha_0, \beta_0}$ . Обозначим  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$  – поднятие векторного поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$  на  $[0, \infty) \times \mathbf{R}$ . Пусть  $\bar{b}^{\alpha_1, \beta_0}$ ,  $\alpha_1 \in (\alpha_0, \delta)$ , имеет дугу  $L_1$  траектории, идущую из особой точки  $S_1 = (\infty, s_1)$  в особую точку  $S_2 = (\infty, s_2)$ . Предположим, что существует дуга  $L$  траектории поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ ,  $\alpha \in (\alpha_0, \delta)$ , идущая из  $S_1$  в  $S_2$  при  $\alpha \neq \alpha_1$ . Так как при  $\alpha \neq \alpha_1$  в точках  $L_1$

$$\begin{vmatrix} (b_1(s) - \alpha_1)x + (b_2^*(s) + \beta_0)x^v & 1 \\ (b_1(s) - \alpha)x + (b_2^*(s) + \beta_0)x^v & 1 \end{vmatrix} = (\alpha - \alpha_1)x \neq 0,$$

то траектории поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$  трансверсальны  $L_1$  во всех точках  $L_1$ , отличных от  $S_1$  и  $S_2$ . Тогда либо а)  $L_1$  и  $L$  пересекаются только в точках  $S_1$  и  $S_2$ , либо они имеют еще одну общую точку  $N$ . В случае а) пусть  $D$  односвязное открытое множество в  $[0, \infty) \times \mathbf{R}$ , ограниченное простой замкнутой кривой, составленной из дуг  $L_1$  и  $L$ , а в случае б) составленной из частей этих дуг между точкам  $S_1$  и  $N$ . В случае а) либо положительная, либо отрицательная полутраектория поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ , начинающаяся в точках  $L \setminus \{S_1, S_2\}$ , не выходит из  $D$ . Но это невозможно. Аналогично получаем противоречие и в случае б). Из полученного противоречия следует, что сделанное предположение неверно и траектория поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ , идущая из особой точки  $S_1$  в особую точку  $S_2$  может существовать только при одном значении параметра  $\alpha \in (\alpha_0, \delta)$ . Так как существует только счетное число пар особых точек поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ , то число значений параметра  $\alpha \in (\alpha_0, \delta)$  при которых может существовать траектория поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ , идущая из особой точки в особую точку, не более чем счетное. Следовательно, найдется такое  $\alpha \in (\alpha_0, \delta)$ , что у  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$  нет траекторий, идущих из особой точки в особую точку. То же самое будем иметь для траекторий поля  $\bar{b}^{\alpha, \beta_0}$ . Следовательно.  $b^{\alpha, \beta_0} \in \Sigma B(\omega, \nu)$ , и потому  $\Sigma B(\omega, \nu)$  всюду плотно в  $B(\omega, \nu)$ .

Докажем, что из грубости уравнения  $b \in B(\omega, \nu)$  следует, что  $b \in \Sigma B(\omega, \nu)$ . Пусть  $V$  окрестность, фигурирующая в определении грубости. В силу доказанной плотности  $\Sigma B(\omega, \nu)$  в  $B(\omega, \nu)$  уравнение имеет  $\Gamma_0$  конечное число особых точек, для каждой особой точки  $S_0 = (\infty, s_0)$  функция  $b_2(s)$  меняет знак в  $s_0$ , нет траекторий, соединяющих две особые точки,  $\Gamma_\infty$  – изолированная траектория. Предположим на время, что  $b \notin \Sigma B(\omega, \nu)$ . Тогда или 1)  $b$  имеет непростую особую точку  $S_0 = (s_0, 0)$  или 2)  $m(b) = 0$ .

В случае 1) пусть  $b_2(t_1)b_2(t_2) < 0$  при  $s_0 - \delta < t_1 < s_0 < t_2 < s_0 + \delta$ . Рассмотрим уравнение  $b^\mu$ :  $\dot{x} = b_1(t)x + (b_2(t) - \mu\sigma\chi(t)(t - s_0))x^v$ , где  $\sigma = \text{sgn } b_2(t)$  в точках  $t \in (s_0, s_0 + \delta)$ ,  $\chi(t)$  – гладкая,  $\omega$ -периодическая функция,  $\chi(t) = 1$  при  $t \in (s_0 - \delta/3, s_0 + \delta/3)$ ,  $\chi(t) = 0$  при  $t \in (s_0 + \delta/2, s_0 + \omega - \delta/2)$ . Тогда при достаточно малом  $\mu > 0$  уравнение  $b^\mu \in V$  и имеет больше особых точек чем  $b$ . Но это противоречит выбору окрестности  $V$ . Полученное противоречие доказывает, что случай 1) невозможен.

В случае 2) рассмотрим уравнение  $b^\mu$ :  $\dot{x} = (b_1(t) + \mu)x + b_2(t)x^v$ . При достаточно малом  $|\mu|$   $b^\mu \in V$ ,  $m(b^\mu) = \omega\mu$ . Возьмем  $\mu < 0$  ( $\mu > 0$ ), если  $\Gamma_\infty$  – устойчивая (неустойчивая) периодическая траектория уравнения  $b$ , тогда  $\Gamma_\infty$  – устойчивая (неустойчивая) периодическая траектория уравнения  $b^\mu$ . Поэтому уравнения  $b^\mu$  и  $b$  не могут быть топологически эквивалентными в  $\bar{\Phi}$ , что противоречит выбору окрестности  $V$ .

Таким образом, оба случая 1) и 2) невозможны. Сделанное предположение неверно и  $b \in \Sigma V(\omega, \nu)$ .

Грубость уравнений из  $V(\omega, \nu)$  доказывается аналогично достаточным условиям грубости в [3].

#### **Список литературы**

1. *Ройтенберг В.Ш.* О грубости уравнений Абеля с периодическими коэффициентами. Ярославский педагогический вестник. 2012. Т. 3 (Естественные науки), № 3. С. 16–21.
2. *Ройтенберг В.Ш.* Об уравнениях Риккати с периодическими коэффициентами. Математические методы в технике и технологиях. 2013. Т. 1. С. 7–9.
3. *Андронов А.А., Леонтович Е.А., Гордон И.И., Майер А.Г.* Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967. 488 с.

**ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ (02.00.00)**

02.00.04

**<sup>1</sup>С.И. Гурский канд. хим. наук, <sup>2</sup>В.А. Тафеенко канд. хим. наук**<sup>1</sup>Национальный Исследовательский  
Московский Государственный Строительный Университет,  
Институт строительства и архитектуры,<sup>2</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова,  
Химический факультет,  
Москва, stanislav.gurskiy@gmail.com, tafeenko-victor@yandex.ru**ВЛИЯНИЕ ДВУХЗАРЯДНЫХ КАТИОНОВ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ  
НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ АНИОНА 3-ЦИАНО-4-ДИЦИАНОМЕТИЛЕН-5-ОКСО-  
4,5-ДИГИДРО-1Н-ПИРРОЛ-2-ОЛАТА В АЦЕТОНИТРИЛЕ**

*В статье представлены данные по фотолюминесценции 3-циано-4-дицианометилен-5-оксо-4,5-дигидро-1Н-пиррол-2-олата калия К(НА) в растворе в ацетонитриле в результате добавления перхлората меди(II). Эффект увеличения, вызванный катионами меди(II), оказался селективен по отношению к влиянию двухзарядных катионов других переходных металлов на люминесценцию аниона НА<sup>-</sup>. На основании данных хромато-масс-спектрометрии предложена модель, объясняющая влияние меди(II) на интенсивность люминесценции НА<sup>-</sup>.*

Ключевые слова: люминесценция, сенсор на медь(II), хромато-масс-спектрометрия.

Оптические свойства органических соединений определяются как электронной структурой составляющих их молекул, так и взаимодействием между молекулами. Следовательно, изменять физические характеристики материала, основанного на органических молекулах, можно двумя способами. Первый способ – изменение электронного строения молекулы, задающей интересующее свойство. Второй способ – усиление/ослабление взаимодействий между данной молекулой и окружающими ее молекулами. Первый способ нашел широкое применение. Второй способ сегодня активно исследуется. Среди разных типов взаимодействий с матрицей выделяют  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействие[1], водородную связь[2] и координационную связь с катионами переходных металлов[3], как оказывающие наиболее сильное влияние на физические свойства органических молекул.

Объектом для исследования влияния матрицы на физические свойства органических молекул нами был выбран анион 3-циано-4-дицианометилен-5-оксо-4,5-дигидро-1Н-пиррол-2-олат ( $C_8H_1N_4O_2^-$ , НА<sup>-</sup>). Анион НА<sup>-</sup> способен участвовать в  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействии с соседними анионами НА<sup>-</sup>, образуя стопки или стенки из анионов, водородных связях с соседними анионами НА<sup>-</sup> и молекулами растворителя, координационных и ионных связях с катионами металлов[4, 5]. Ранее нами было исследовано влияние диэлектрической проницаемости растворителя в растворе,  $\pi$ - $\pi$ -взаимодействия, водородной связи в димере [НА<sup>-</sup>]<sub>2</sub> на длину волны спектра эмиссии НА<sup>-</sup> в кристаллическом состоянии, координационной связи с катионами одно- и двухвалентной меди на интенсивность спектра эмиссии НА<sup>-</sup> в кристаллическом состоянии и в растворителе [4, 5].

В настоящей работе мы исследовали влияние двухзарядных катионов других переходных металлов на интенсивность максимума спектра люминесценции НА<sup>-</sup> в растворе.

### Экспериментальная часть

В качестве исходных реактивов использовали 2,2,3,3-тетрацианоциклопропанкарбоновую кислоту (синтезировали по методике, описанной в [6]; продукт синтеза – это комплекс кислоты и 1,4-диоксана (1:1); вычислено для  $C_{12}H_{10}N_4O_4$  (%): С, 52.6; Н, 3.7; N, 20.4, найдено (%): С, 52.5; Н, 3.3; N, 20.7.),  $K(NA)$  (синтезировали по методике, описанной в [7]; вычислено для  $C_8H_1KN_4O_2$  (%): С, 42.85; Н, 0.45; N, 24.99, найдено (%): С, 43.30; Н, 0.90; N, 24.60.),  $\{[Cu(NA)_2(H_2O)_2]\}_n \cdot 2nH_2O$  (синтезировали по методике, описанной в [7]; вычислено для  $C_{16}H_{10}CuN_8O_8$  (%): С, 37.99; Н, 1.99; N, 22.15, найдено (%): С, 38.08; Н, 2.06; N, 22.07), ацетонитрил ( $\geq 99.9$  %, для спектроскопии). Соли  $Cu(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Mn(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Ni(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Co(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ,  $Zn(ClO_4)_2 \cdot 6H_2O$  были импортные, производитель Sigma Aldrich, чистота 98 %.

Спектры фотолюминесценции растворов записывали на люминесцентном спектрометре Perkin Elmer LS 55 при комнатной температуре при одинаковых настройках спектрометра. Длину волны возбуждения образца (275 нм) выбирали на основании спектра возбуждения раствора соли  $K(NA)$ . Интенсивность максимума спектра эмиссии раствора  $K(NA)$  ( $3.0 \cdot 10^{-5}$  моль/л) в  $CH_3CN$  до и после добавления перхлората металла (максимальную концентрацию катиона металла задавали  $3.0 \cdot 10^{-4}$  моль/л) измеряли для длины волны эмиссии 489 нм – длина волны максимума спектра эмиссии  $NA^-$  в ацетонитриле. Затем находили отношение интенсивностей после и до добавления соли металла.

Хромато-масс-спектрометрию проводили на спектрометре Waters ACQUITY UPLC/TQD с использованием термостатированной ( $35 \pm 0.02$  °C) колонки Acquity UPLC BEH C18,  $5.0 \times 0.21$  см, 1.8  $\mu m$ . Разделение проводили смесью А + Б (5-95% фазы Б, 0-3 минуты; А – 5 объемн. %  $CH_3CN$  + 95 объемн. %  $H_2O$  (20мМ  $HCOOH$ , pH 2.7), Б – 100 %  $CH_3CN$  (20мМ  $HCOOH$ )). Ионы, полученные в результате электрораспыления, улавливали на квадрупольном детекторе (интервал по  $M/z$  50-1000) в режимах регистрации как положительных, так и отрицательных ионов. Съемке хромато-масс-спектра раствора соли  $\{[Cu(NA)_2(H_2O)_2]\}_n \cdot 2nH_2O$  в  $CH_3CN$  предшествовала экстракция  $Cu^{2+}$  из раствора.

Катионы  $d$ -металлов с неполной электронной оболочкой как правило тушат эмиссию органических люминофоров. Механизмом тушения эмиссии молекулы под действием катиона  $d$ -металла может быть 1) перескок электрона между катионом металла и молекулой люминофора вследствие возбуждения; 2) обмен энергией между возбужденной молекулой люминофора и катионом металла по механизму Декстера [3]. Однако вместо тушения добавление двухзарядных катионов  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  вызывает увеличение интенсивности люминесценции аниона  $NA^-$  в растворе  $CH_3CN$ . Добавление катионов  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  так же увеличивает интенсивность люминесценции аниона  $NA^-$  в растворе  $CH_3CN$ , и только добавление  $Co^{2+}$  вызывает уменьшение интенсивности люминесценции аниона. Увеличение интенсивности люминесценции аниона  $NA^-$  в результате добавления катионов  $Mn^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  достигает 4.2, 5.4, 105, 6.3, 5.9-кратного значения, соответственно. Эффект 105-кратного увеличения интенсивности люминесценции аниона  $NA^-$  в  $CH_3CN$ , вызываемый добавлением катионов  $Cu^{2+}$ , является селективным среди двухзарядных катионов других переходных металлов (рис.1).

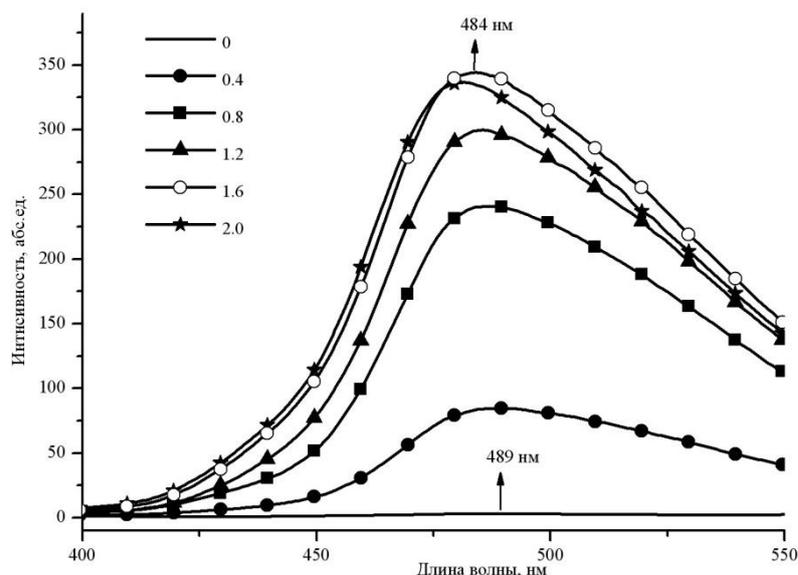


Рис. 1– Спектры фотолюминесценции раствора  $K(NA)$  ( $3.0 \cdot 10^{-5}$  M) в  $CH_3CN$  с добавлением соответствующего числа эквивалентов (подпись к каждой линии)

$Cu(H_2O)_6(ClO_4)_2$ . Возбуждающее излучение 275 нм

Растворение комплекса  $\{[Cu(NA)_2(H_2O)_2]\}_n \cdot 2nH_2O$ , в котором катионы меди(II) тушат люминесценцию аниона  $NA^-$ , в  $CH_3CN$  так же приводит к увеличению интенсивности люминесценции аниона [5].

Какова причина 105-кратного увеличения интенсивности люминесценции  $NA^-$  в  $CH_3CN$  в результате добавления катионов  $Cu^{2+}$ ? Ранее нами была предложена модель, объясняющая данный эффект образованием в растворе комплекса  $[(Cu^{2+})(A^{2-})]$ , обладающего более интенсивной люминесценцией по сравнению с  $NA^-$  [5].

Увеличение интенсивности люминесценции  $NA^-$  в ацетонитриле в результате добавления  $Cu^{2+}$  может быть также вызвано образованием новых люминесцентных соединений вследствие протекания окислительно-восстановительных реакций и/или реакций гидролиза между  $NA^-$  и медью(II). Известно, что  $Cu^{2+}$  в  $CH_3CN$  является сильным окислителем [8]. Для проверки данного предположения раствор соли  $\{[Cu(NA)_2(H_2O)_2]\}_n \cdot 2nH_2O$  в  $CH_3CN$  исследовали с помощью метода хромато-масс-спектрометрии (предварительно из раствора была экстрагирована медь(II)). Хроматограмма раствора содержит пять пиков (рис.2).

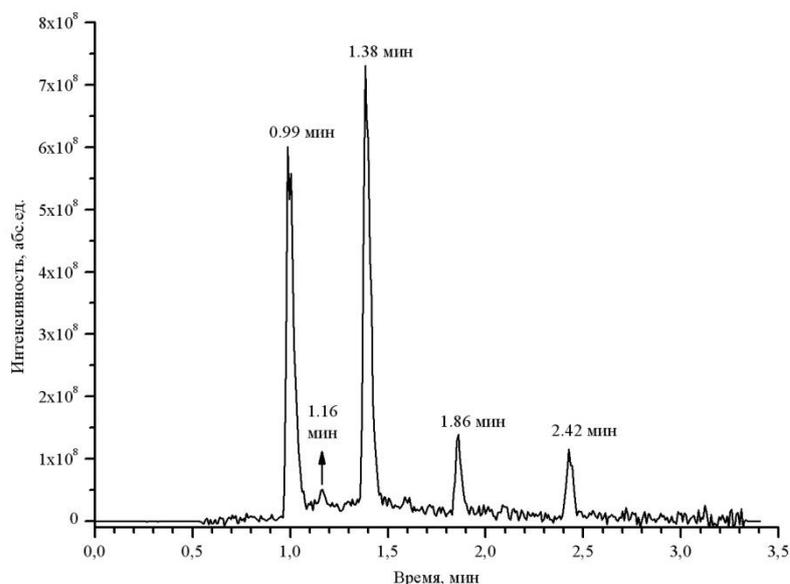


Рис. 2– Хроматограмма (квадрупольный детектор, режим регистрации отрицательных ионов) раствора соли  $\{[Cu(NA)_2(H_2O)_2]\}_n \cdot 2nH_2O$  ( $1.1 \cdot 10^{-3}$  M) в  $CH_3CN$

Времени удерживания 0.99 минут отвечает масс-спектр, содержащий единственный сигнал при  $M/z = 185$  (заряд -1). Это исходный анион  $HA^-$  ( $C_8H_1N_4O_2^-$ , точная ионная масса 185.0 г/моль). Масс-спектры, соответствующие временам удерживания 1.16, 1.38, 1.86, 2.42 минут, содержат сигналы при  $M/z = 274, 208, 280, 190$  (заряд -1), соответственно. Это массы ионов (заряд -1), соответствующие новым соединениям, образовавшимся в исходном растворе соли  $\{[Cu(HA)_2(H_2O)_2]_n \cdot 2nH_2O$  в  $CH_3CN$  в результате реакций между анионом  $HA^-$  и катионом меди(II). Масс-спектр раствора  $K(HA) + Cu(H_2O)_6(ClO_4)_2$  в  $CH_3CN$  так же содержит сигнал с  $M/z = 208$  и зарядом -1 [5]. Нами предложена схема серии возможных реакций окисления медью(II) аниона  $HA^-$  и гидролиза продуктов, в результате которых образуются три иона с зарядом -1 и точной ионной массой 208.0 (рис.3).

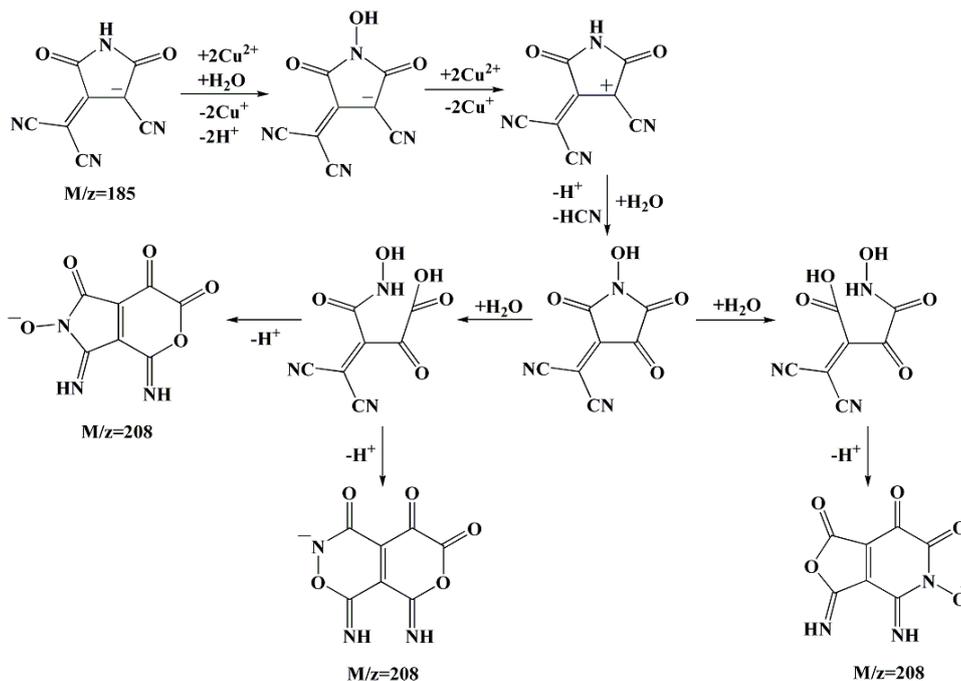


Рис. 3– Варианты возможных реакций между анионом  $HA^-$ ,  $Cu^{2+}$ , и водой в  $CH_3CN$

Таким образом, изменение интенсивности люминесценции аниона  $HA^-$  в  $CH_3CN$  в результате добавления катионов меди(II) может быть связано с образованием как нового комплекса  $[(Cu^{2+})(A^{2-})]$ , так и молекул нового люминофора в результате реакций окисления медью(II) аниона  $HA^-$  с последующим гидролизом продуктов окисления аниона.

**Выводы**

Обнаружено 105-кратное увеличение интенсивности фотолюминесценции соли  $K(HA)$  в ацетонитриле в результате добавления солей меди(II). Данный эффект, вызванный катионами меди(II), селективен по отношению к двухзарядным катионам других переходных металлов. Данные хромато-масс-спектрометрии свидетельствуют о том, что данный эффект может быть связан с образованием в растворе а) нового комплекса  $[(Cu^{2+})(A^{2-})]$ , б) молекул нового люминофора в результате реакций окисления медью(II) аниона  $HA^-$  с последующим гидролизом продуктов окисления аниона.

**Список литературы**

1. Zhang H., Zhang Z., Ye K., Zhang J., Wang Y. Organic crystals with tunable emission colors based on a single organic molecule and different molecular packing structures // *Adv. Mater.* 2006. Vol. 18. P. 2369-2372.
2. Zhou T., Jia T., Zhao S., Guo J., Zhang H., Wang Y. Acid-Stimuli-Luminescence and Carbonyl-Proton Interaction Dependent Emission Properties of 2,6-Biphenyl-4-pyrone Crystals // *Cryst. Growth Des.* 2012. Vol. 12. P. 179-184.
3. Fabbrizzi L., Licchelli M., Pallavicini P., Perotti A., Taglietti A., Sacchi D. Fluorescent sensors for transition metals based on electron-transfer and energy-transfer mechanisms // *Chem. Eur. J.* 1996. Vol. 2. P. 75-82.
4. Tafeenko V.A., Gurskiy S.I., Fazyzbekov M.F., Baranov A.N., Aslanov L.A. Luminescence properties of the structure built from 3-cyano-4-dicyanomethylene-5-oxo-4,5-dihydro-1H-pyrrol-2-olate and caesium // *Acta Crystallogr., Sect. C: Cryst. Struct. Commun.* 2010. Vol. 66. P. m32-m34.
5. Gurskiy S.I., Tafeenko V.A. The luminescent properties of structures built from 3-cyano-4-dicyanomethylene-5-oxo-4,5-dihydro-1H-pyrrol-2-olate and copper(I,II) cations // *CrystEngComm.* 2012. Vol. 14. P. 2721-2731.
6. Каюкова О.В., Каюков Я.С., Николаев А.Н., Насакин О.Е., Синтез 6,6-диалкил-4,8-диоксо-5,7-диоксаспиро[2.5]-октан-1,1,2,2-тетракарбонитрилов и тетрацианоциклопропанкарбоновой кислоты. // *ЖОрХ.* 2004. Т. 40. С. 1429-1430.
7. Каюкова О.В., Каюков Я.С., Николаев А.Н., Тафеенко В.А., Еришов О.В., Насакин О.Е. Реакция 1,1,2,2-тетрацианоциклопропанкарбоновой кислоты с иодидами. Синтез 3-циано-4-дицианометилиден-5-оксо-4,5-дигидро-1H-пиррол-2-олятов // *ЖОрХ.* 2005. Т.41. С. 535-538.
8. Cox B.G., Jedral W., Palou J. Oxidation of ascorbic acid by copper(II) and the ferrocenium ion in acetonitrile-water mixtures // *J. Chem. Soc. Dalton Trans.* 1988. P. 733-740.

02.00.00

И.М. Ильина канд. техн. наук, Е.А. Петровичева канд. техн. наук

Альметьевский государственный нефтяной институт,  
нефтегазовый факультет, кафедра физики и химии,  
Альметьевск, idailina@yandex.ru

## ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ПРЕДРЕАКТОРОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ

В статье приводятся результаты исследования формы профиля рабочей зоны трубчатых предреакторов. Вследствие этого интенсифицируется массообмен и теплопередача, что позволяет широко использовать эти аппараты для физико-химических процессов в ряде отраслей экономики.

Ключевые слова: предреактор, конфузор – диффузор, смешение.

### 1. Введение

Предреакторы диффузор-конфузорного типа, имеющие различную форму профилирующего канала используются на предприятиях нефтехимических и нефтегазовых комплексов. Аппараты этого типа характеризуются малой металло- и энергоемкостью, высоким уровнем влияния на обрабатываемую среду, быстро внедряются и легко используются в производственных процессах.

Изменение профиля канала предреактора увеличивает его эффективность на 10-25%, что наглядно показано в результатах исследований.

### 2. Методика эксперимента

С помощью программного комплекса CANAL, предложенного Ю.М. Даниловым проводились численные методы исследований течения несжимаемой жидкости (или газа) в каналах трубчатых турбулентных предреакторов диффузор – конфузорной формы [1-3].

Для численного моделирование движения жидкости в предреакторе использовалось уравнение Навье – Стокса для стационарного осесимметричного движения несжимаемой вязкой жидкости с установкой граничных условий.

С помощью численного метода решения уравнений гидродинамики существенно сокращаются объемы вычислений за счет использования метода прогонки при интегрировании уравнения неразрывности.

Поскольку одной из основных характеристик эффективности работы предреактора является удельная кинетическая турбулентная энергия  $k$  (или удельная скорость ее диссипации  $\varepsilon$ ), то есть основание полагать, что возможности предреактора не исчерпаны формой рис. 1.

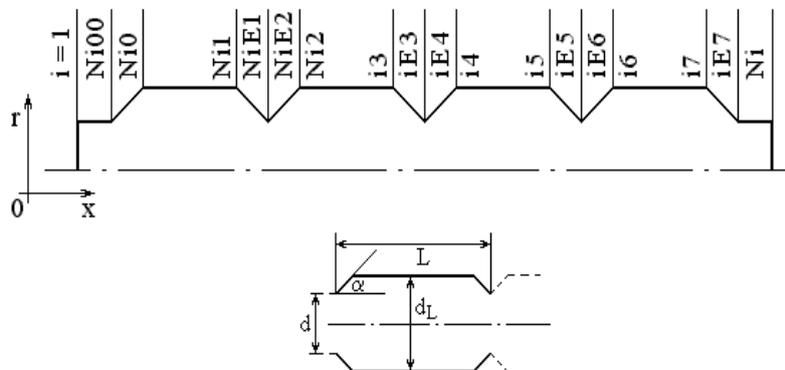


Рис. 1 – Форма образующей канала аппарата, исследуемая авторами  
Р.Г. Тахавутдинов и А.Г. Мухаметзяновой

В связи с этим нами решалась задача: исследовать влияние геометрической формы элементов предреактора на его эффективность в смысле увеличения удельных значений  $k$  (и следовательно  $\varepsilon$ ).

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

В работе приведены результаты численных экспериментов по изучению влияния формы и размеров проточной части трубчатого предреактора на его эффективность. В качестве критерия эффективности принята величина скорости диссипации кинетической энергии на единицу объема, определяющая время турбулентного микросмешения реагирующих компонентов.

Показано, что за счет изменения формы элементов предреактора можно повысить его эффективность на 10-25% (в некоторых случаях до 60%). В тех случаях, когда желательно уменьшить время пребывания смеси в реакторе, критерий оптимальности должен учитывать относительный объем зоны обратных токов [3].

В работах Тахавутдинова Р.Г., Мухаметзяновой А.Г. показано, что, начиная с  $Re \geq 900$ , характеристики однофазного потока несущественно зависят от молекулярной вязкости смеси  $\nu$ . В этих условиях были получены оптимальные соотношения между основными геометрическими размерами трубчатого предреактора [4]:

$$L/D = 1.7, D/d = 1.6, 30^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ.$$

Основная идея, заложенная в алгоритм оптимизации геометрической формы проточной части предреактора, состоит в сравнении среднеобъемной скорости диссипации  $\varepsilon$  с ее значением в «эталонном» аппарате  $\varepsilon_0$ , полученной в одинаковых условиях. За «эталонный» принят аппарат с указанными оптимальными размерами и углом наклона образующей в горловине  $\alpha = 45^\circ$ . Размеры входной части предреактора и скорость во входном сечении оставались постоянными. При одинаковой плотности смеси это равносильно постоянству расхода через аппарат. Размеры всех секций выбирались одинаковыми.

Диаметр горловины каждой из секций и диаметр выходного сечения равны диаметру на входе. При исследовании варьировалась форма образующей в окрестности горловины каждой из секций. Допустимое множество таких форм приведено в таблице.

В рассматриваемых трубчатых предреакторах существенное влияние на эффективность их работы оказывает степень гидродинамической однородности потока. Последняя может быть оценена степенью равномерности профиля скорости в поперечном сечении канала предреактора. Очевидно, идеальным в этом смысле является равномерное распределение осредненной скорости в поперечном сечении, что возможно лишь в условиях потенциального течения при скольжении потока около стенки. В реальных условиях за уступами в области горловины каждой секций предреактора возникает зона обратных течений. В результате этого часть смеси совершает движение в обратном направлении.

Таблица - Типы профилей

Тип	Форма образующей	Примечание
A		$0.2 \leq h \leq 0.5$
B		$0.2 \leq h \leq 0.5$ $0 < l \leq 0.5L$
C		$0.2 \leq h \leq 0.5$ $0 < l \leq 0.8L$ $0 < h_1 < h$
D		$0.2 \leq h \leq 0.5$ $0 \leq l \leq 0.8L$ $0 < h_1 < h$
E		$0 < l \leq h$

Тем самым увеличивается время ее пребывания в предреакторе по сравнению с необходимым. В связи с этим, эффективным следует считать тот профиль образующей предреактора, который, кроме обеспечения наибольшего значения  $\varepsilon$ , обуславливает еще и наименьший относительный объем смеси, вовлекаемой в обратное течение. В связи с этим, нами предлагается в качестве критерия оптимальности трубчатого предреактора ввести следующий комплекс [1]:

$$\Phi_e = \frac{\varepsilon (1 + q\Delta V_0)}{\varepsilon_0 (1 + q\Delta V)}$$

Здесь  $\Delta V$  – относительный объем смеси в зоне обратных потоков, индекс «0» соответствует форме предреактора типа А (табл.), который принят за эталон сравнения;  $q$  – весовой коэффициент ( $q \geq 0$ ), который может выбираться в зависимости от желания учесть влияние зоны обратных токов на эффективность предреактора.

На рис.2 приведены характерные результаты расчетов для предреактора с профилем Е. При их анализе видна тенденция к увеличению интенсивности турбулентности в 4-5 секциях.

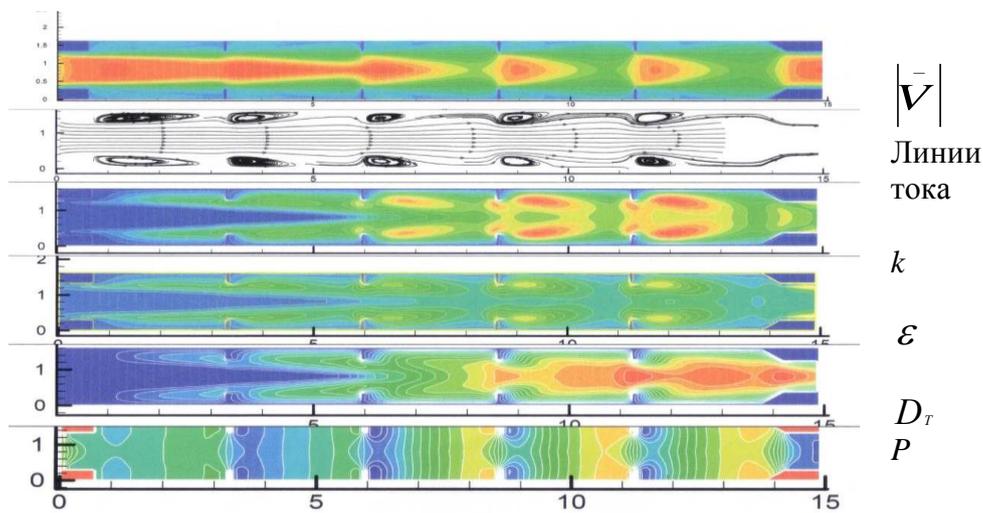


Рис. 2 – Результаты расчетов предреактора с профилем Е, где  $|V|$  – вектор скорости,  $k$  – кинетическая энергия,  $\varepsilon$  – скорость диссипации,  $D_T$  – коэффициент диффузии,  $P$  – давление. Обобщением полученных результатов могут служить графики, полученные на рис.3.

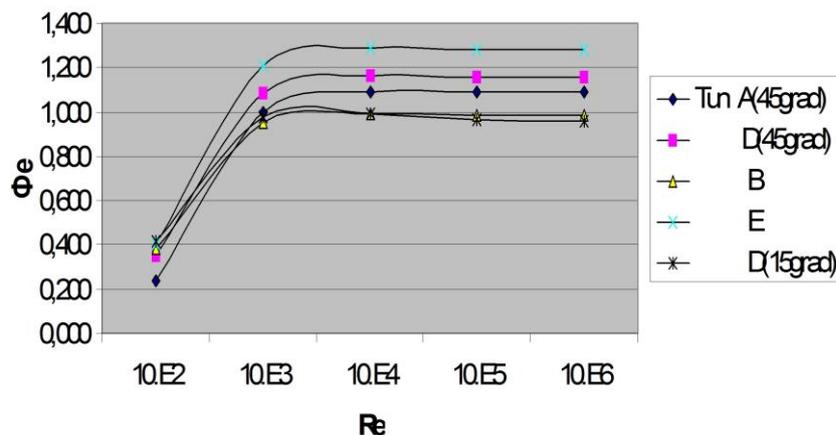


Рис. 3 – Изменение эффективности предреактора в зависимости от режима течения для профилей типа А,В,Д,Е

Вычисления были проделаны для чисел Рейнольдса от 800 до  $10^7$  для профилей типа А, В, Д, Е. Наибольшей эффективностью обладает профиль Е.

#### 4. Заключение

На основе разработанного специализированного программного комплекса CANAL, позволяющего моделировать движение потока в каналах предреактора, проведено исследование эффективности аппаратов с образующими различной формы.

В результате проведенных исследований установлено, что для использования в предреактора наиболее подходящим является профиль типа Е при соотношениях геометрических размеров  $L/D = 1,7$  ;  $D/d = 1,6$ .

#### Список литературы

1. *Ильина И.М.* Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Повышение эффективности трубчатых аппаратов на повышение эффективности трубчатых аппаратов на основе численного моделирования турбулентных течений в их проточной части. Казань, 2004.
2. *Петровичева Е.А., Ильина И.М.* Анализ схем турбулизаторов, используемых в малогабаритных трубчатых аппаратах. Сборник: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан. Альметьевский государственный нефтяной институт. 2016. С. 213-215.
3. *Ильина И.М., Петровичева Е.А.* Математическая модель течения жидкости в трубчатых аппаратах. Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. 2018. Т. 17. С. 207-210.
4. *Захаров В.П., Мухаметзянова А.Г., Тахавутдинов Р.Г., Дьяконов Г.С., Минскер К.С.* Создание однородных эмульсий в трубчатых турбулентных аппаратах диффузор – конфузальной конструкции // Журн. прикл. химии. 2002. Т. 75. №9.

02.00.00

**Г.Е. Кокиева д-р техн. наук, А.И. Павлова д-р ветеринар. наук, И.Н. Аммосов,  
Д.А. Соколов, Г.Н. Сидоров, М.Р. Слепцов, А.А. Корякин, А.Г. Васильев**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» в г.Якутск

### **ПРОЦЕСС АЭРИРОВАНИЯ В АЭРАТОРЕ КОЛОНКОВОГО ТИПА**

*В данной статье описывается синтез модели процесса культивирования. Этот метод позволяет регулировать степень аэрации и учитывать ее количество. Способствует удалению от клеток микроорганизма продуктов обмена и лизиса, с также обеспечивает равномерное распределение кислорода в культуральную жидкости по всему объему ферментатора.*

Ключевые слова: *массообмен, аппарат, биореактор, массопередача, газосодержание, производительность, циркуляция, зона.*

Кислород является труднорастворимым газом. Потребление кислорода происходит со скоростью, не зависящей от концентрации растворенного кислорода до тех пор, пока остается выше критической. Влияние величины скорости растворения кислорода на процесс роста микроорганизмов не требуется. Оборудования единичной мощности являются в основном аппаратами интенсивного массообмена. На данное время существует множество работ, посвященных определению величины газосодержания, его взаимосвязи с физико-химическими свойствами среды и режимными параметрами посвящены работы многих исследователей. Основу конструирования аппаратов для культивирования микроорганизмов осуществляющих подвод кислорода составляет принцип газлифта. Одним из основных гидродинамических параметров, характеризующих данные ферментатора является газосодержание и массообмен в культуральной жидкости, скорость жидкой и газовой фаз, кратности и скорости циркуляции. Кислород плохо растворяется в воде, и его концентрация в воде составляет 8,1 мг/л. Следовательно, для обеспечения процесса ферментации кислородом необходима непрерывный подвод кислорода в культуральную жидкость [1,2,5]. Применение в производстве барботажных ферментаторов имеет ряд своих преимуществ:

- Возможность конструирования деталей в различных частях оборудования, в частности аэратора, осуществляющего подвод кислорода и поддержание температуры культивируемой среды, за счет возможности применения теплообменной аппаратуры в различных зонах аппарата для культивирования микроорганизмов;

- Устройство механического перемешивания культуральной жидкости позволяет интенсивно производить перемешивание по всему объему полезного объема ферментатора, что в свою очередь увеличивает биомассу продукции кормового белка;

- Защита оборудования от агрессивных сред;

- Удобство вспомогательного оборудования;

На рис. 1 приведена структурная схема аппарата для культивирования микроорганизмов, состоящая из трёх зон:

- зона 1 – зона интенсивной массопередачи;

- зона 2 – зона охлаждения, включающая объём биореактора, в корпусе которого находится теплообменник; в этой зоне наряду с массопередачей и биосинтезом происходит охлаждение среды;

- зона 3 – циркуляционная зона; в этой зоне уменьшается газосодержание среды и интенсивность массопередачи.

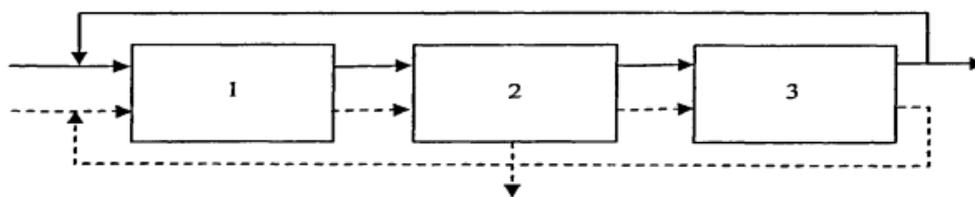


Рис. 1. Структурная схема аппарата для культивирования микроорганизмов:

1 – зона интенсивной массопередачи; 2 – зона охлаждения; 3 – зона циркуляции

В таблице 1 приведены данные культивирования в оборудовании

Таблица 1-Данные культивирования в оборудовании

Показатели							
№п/п	Время культивирования	$\mu_{\max}$		Накопление биомассы, млрд/мл		Минимальное время генерации $g_{\min}$ , час	Количество глюкозы за время культивирования, мл
		Оптическая плотность	Количество жизнеспособных клеток	Оптическая плотность	Количество жизнеспособных клеток		
Инструктивный режим							
1	14	1,3±0,01	0,9±0,004	5,4±0,15	4,8±0,01	0,6±0,1	35,4
2	12	1,1±0,07	0,98±0,05	6,7±0,2	5,9±0,21	0,71±0,01	36,2
Экспериментальный режим							
3	14	1,14±0,03	0,77±0,33	15,4±0,4	14,2±0,35	1,0±0,01	330,20
4	12	0,1±0,02	0,92±0,02	20,4±0,45	15,4±0,4	0,82±0,01	280,14
5	9	0,47±0,02	0,01±0,001	8,4±0,3	4,0±0,02	0,9±0,01	129,18
6	10	0,711±0,03	0,62±0,02	12,9±0,04	5,0±0,1	1,62±0,02	150,00

На поверхности культуральной среды в процессе культивирования микроорганизмов образуется пена. Диаметр пенного пузырька  $d_{\text{п}}$  определяется размером отверстий в барботере и физико-химическими свойствами культуральной жидкости:

$$d_{\text{п}} = \sqrt[3]{\frac{6d_0\varepsilon}{q(p_{\text{ж}} - p_{\text{г}})}} \quad (1)$$

где:  $d$  – диаметр отверстия; $\varepsilon$  – поверхностное натяжение; $q$  – ускорение свободного падения; $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости; $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа.

Тогда количество пузырьков:

$$n = \frac{6v_{\text{г}}}{\pi d_{\text{п}}^3} \quad (2)$$

где  $V_{\text{г}}$  – общий объемный расход воздуха при нормальных условиях.

При исследовании процесса абсорбции кислорода в питательной среде различной вязкости для расчета газосодержания принято уравнение:

$$\frac{\varphi}{(1-\varphi)^4} = 0,2 \left( \frac{D^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g}{\sigma} \right)^{0,62} * \left( \frac{D^3 \cdot \rho_{\text{ж}}^2 \cdot g}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{\frac{1}{12}} * \frac{W_{\text{г}}}{(D \cdot g)^{0,5}} \quad (3)$$

где  $D$  – диаметр аппарата.

На данный период времени рядом ученых проведены систематические исследования [5-8] и даны рекомендации для определения  $\varphi$  следующей зависимостью:

$$\varphi = \frac{1}{2 + \left( \frac{0,35}{W_{\text{г}}} \right) \left[ \left( \frac{\rho_{\text{ж}}}{l} \right) \left( \frac{\sigma}{782} \right) \right]^{1/3}} \quad (4)$$

При исследовании газосодержания в рециркуляционной колонне диаметром  $\varnothing$  0.15 м и высотой  $H = 10.5$  м авторами [4, 7] было получено следующее уравнение:

$$\varphi = W_r(0,24 + 1,35W_{cm}^{0,93})^{-1} \quad (5)$$

На поверхности раздела газ–жидкость воздушного пузырька образуются воздушные пленки. Они проходят через культуру, затрудняют диффузию кислорода по объему ферментатора и снижают образовавшееся сопротивление.

Исследованию процессов абсорбции кислорода в ферментаторах посвящен ряд работ [1,3,4].

Если рассматривать данный случай при плохо растворимом газе (кислород), значения  $m_{pc}$  и  $K_r$  велики, и диффузионным сопротивлением в газовой фазе можно пренебречь, и соблюдается неравенство:

$$\frac{1}{K_L a} \gg \frac{1}{K_r m_{pc}}, \quad (6)$$

Откуда следует:

$$k \approx k_{la} \quad (7)$$

На основании равенства  $k \approx k_{la}$  уравнение массопередачи:  $\frac{dc}{dy} = K_i * a (c_p - c) - K_b * x$ ,

Левый член уравнения:  $\frac{d^2 M}{dV_p dt} = k(C_p - C)$ , называющегося скоростью объемного массопереноса кислорода, или скоростью растворения кислорода, для абсорбции кислорода воздуха культуральной жидкостью запишется в следующем виде:

$$\frac{d^2 M}{dV_p dt} = K_L a (C_p - C). \quad (8)$$

Устойчивость и эффективность применяемых численных методов позволяют выполнить дальнейшую модификацию технологии расчета, включая подбор моделей турбулентности, с целью повышения точности расчетов.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что рациональное сочетание расчета и эксперимента позволяет расширить границы исследований, уменьшить объем экспериментов и значительно ускорить доводочные работы по созданию и совершенствованию перспективных конструкций ферментаторов.

### Список литературы

1. Кокиева Г.Е. Анализ особенностей эксплуатации аппаратов для культивирования. Сб. Потенциал развития отрасли связи Байкальского региона. – Новосибирск. – 2013.
2. Кокиева Г.Е. Анализ технологии измерения рабочих поверхностей при дефектации аппаратов для культивирования микроорганизмов. Научно-технический Вестник Поволжья. Сб. №3, 2014. – Казань.
3. Юдин Э.Г. Системный подход и принципы деятельности. – М.: Наука. – 1978. – 392 с.
4. Черноиванов В.И. Восстановление деталей машин. – М.: Мир. – 1977. 522 с.
5. Шарифуллин В.Н., Бояринов А.И., Гумеров А.М. Связь перемешивания и массопередачи на примере барботажно-эрлифтного аппарата. В кн.: Массообменные процессы и аппараты химической технологии. – Казань. – 1980. – С. 17-18.

02.00.00

**Г.Е. Кокиева д-р техн. наук, А.И. Павлова д-р ветеринар. наук,  
А.К. Иванов канд. физ.-мат. наук**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Якутская государственная сельскохозяйственная академия» в г. Якутск

### **ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА В ОБОРУДОВАНИИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

*В производствах БВК продуценты кормового белка являются аэробными микроорганизмами. Их выращивание в производственных ферментаторах обычно осуществляют непрерывным способом. Массообмен играет решающую роль в достижении заданной производительности аппарата, если соблюдаются технологические и микробиологические условия. Можно считать установленным тот факт, что микроорганизмы потребляют только растворенный кислород. Кислород является труднорастворимым газом. Потребление кислорода происходит со скоростью, не зависящей от концентрации растворенного кислорода до тех пор, пока остается выше критической. Влияние величины скорости растворения кислорода на процесс роста микроорганизмов не требуется.*

Ключевые слова: *экспериментальные исследования, микробный синтез, кормовой белок, скорость циркуляции жидкости, концентрация растворенного кислорода, кормовая добавка.*

Сельское хозяйство Якутии – это уникальная, особо сложная производственная, социально-экономическая и экологическая система, в которой такие сельскохозяйственные отрасли, как животноводство и земледелие развиваются в чрезвычайно суровых природно-климатических условиях.

Специфика региональной кормовой базы – заготовка сена, сочных кормов, а также собственное производство и завоз концентрированных кормов из-за пределов республики. Основными кормами в зимнем рационе являются сено, силос, сенаж, летом – трава естественных пастбищ. При этом обеспеченность скота питательными веществами ежегодно составляет 60–65% от научно-обоснованной нормы кормления. Такой постоянный недостаток кормов является лимитирующим фактором реализации генетического местных пород скота в Якутии. Представление об общих закономерностях процессов пищеварения и физиолого-биохимических механизмах ассимиляции питательных веществ сформировалось на основе результатов исследования домашних жвачных животных (крупно-рогатого скота, овец). На вскармливании животных уходит много кормов, необходимость покрытия дефицита белка в отечественной и мировой практике поставила задачу покрыть потребность кормов для вскармливания сельскохозяйственным животным. В настоящее время в Республике Саха (Якутия) накоплен уникальный опыт ведения кормления сельскохозяйственных в экстремальных климатических условиях Севера. Адаптированы, разработаны и применяются различные технологии на вечной мерзлоте. Для агропромышленного производства остаются актуальными вопросы повышения обеспеченности кормами. Ведущие производители обращают особое внимание не только на совершенствование технологии и методы получения кормовых добавок но и меры по их интенсификации и на устранение их вредного воздействия на окружающую среду и человека. Технология получения БВК обладающего фармакологическим действием. В технологических операциях по получению биопродукции принимает участие большое количество технологического оборудования. В качестве основного используются различного рода теплообменники, испарители, сепараторы, центрифуги, фильтр - прессы, вакуум-выпарные аппараты, флотаторы и мн.др. Кроме основного задействовано вспомогательное

оборудование – ёмкостное и промежуточные сосуды, насосы, компрессоры, вентиляторы и т.д. Все это сложное оборудование должно работать в едином технологическом режиме и под контролем записывающей, регистрирующей, уравнивающей, регулирующей аппаратуры. Центральным оборудованием считается аппарат для культивируются микроорганизмов.

При скорости газа менее  $0,1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  режим течения принято называть пузырьковым (гомогенным). С увеличением скорости газа и скорости жидкости газожидкостная смесь состоит из пузырьков различных размеров, заполняющих весь объем барботажной трубы. Этот режим принято называть пенным (гетерогенным). При увеличении скорости газа более  $10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  пенный режим переходит а стержневой , при котором этот тип аппаратов не работает. На рис.1 приведена схема лабораторной автоматизированной ферментационной установки [4,5].

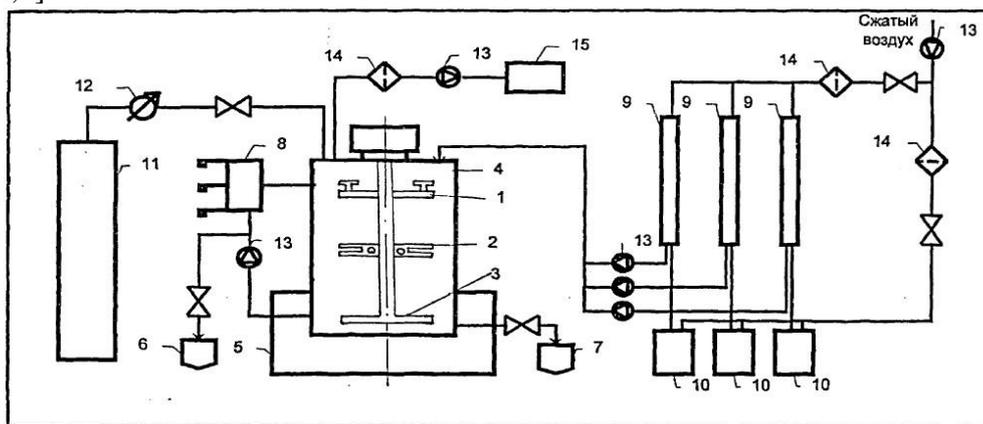


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной автоматизированной ферментационной установки

- 1-верхняя мешалка; 2-центральная мешалка; 3-нижняя мешалка; 4-корпус ферментатора;
- 5-термостат; 6,7-пробоотборник; 8-измерительная ячейка; 9-дозаторы на аммиак, питательную среду, субстрат; 10-подпиточные емкости; 11-баллон с кислородом;
- 12-манометр; 13-насосы; 14-фильтры; 15-газоанализаторы на  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$ .

Особенностью аппаратов группы ФГК является возможность работы при высоких нагрузках по газу, обеспечивающих скорость циркуляции среды до  $1-2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ . Различают несколько режимов движения газожидкостных потоков. Процесс культивирования микроорганизмов состоит из различных технологических стадий, основная масса из которых проходят при подводе кислорода. Кислород играет большую роль при производстве кормового белка, так как при его наличии происходит рост микробного белка и его интенсификация. Газосодержание и скорость жидкой фазы является важнейшими характеристиками газожидкостного потока, т.к. оказывают существенное влияние на циркуляцию жидкости и скорости циркуляции среды [1,2,5].

$$W_{\Pi} = 1,5 (6 \cdot g \cdot \Delta \rho / \rho_{ж})^{0,25} \tag{1}$$

Средняя скорость всплытия пузырька в условиях газлифта определяется эмпирическим уравнением:

$$W_{\Pi} = W_r \cdot 1,92 \left(\frac{h}{H}\right)^{1,35} + 0,15 \tag{2}$$

Скорость циркуляции жидкости зависит от скорости газа и газосодержания. В диапазоне малых скоростей газа при ее увеличении быстро растёт газосодержание и, соответственно, скорость жидкой фазы. Увеличение скорости газа  $W_r > 0,4 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  приводит к изменению структуры и режима течения газожидкостного потока, что ведет к более медленному росту газосодержания, увеличению силы трения между стенкой диффузора и жидкостью, вследствие чего её скорость изменяется незначительно. Скорость жидкости не зависит от поверхностного натяжения и только вязкость влияет на скорость циркуляции, причем при постоянном расходе газа скорость циркуляции снижается с увеличением вязкости жидкости [1,4].

Следует отметить, что получение кормового белка, полученного микробным синтезом менее технологически трудоемко по сравнению с получением сельскохозяйственной продукции и органическим синтезом белка[3,4,5].

#### **Список литературы**

1. *Батищев А.Н.* Методологические основы обоснования рационального способа восстановления деталей // *Механизация и электрификация сельского хозяйства.*-1992.-№ 9.- с.30-31.
2. *Безрядина Г.Н.* Синтез алгоритмов управления в условиях конкурентного взаимодействия популяций микроорганизмов: (На прим. дрожжевого производства). Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.13.16, 05.13.07. – Воронеж: ВГТА, 1997. – 16 с.
3. *Кокиева, Г.Е.* Исследование аппарата для культивирования микроорганизмов / Г.Е. Кокиева // *Научно-технический вестник Поволжья.* – 2014. – № 4. – С. 123-125.
4. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как биологически активная добавка в кормлении сельскохозяйственных животных // *Матер. регион. науч.- практ. конф. «Пищевые технологии, качество и безопасность продуктов».* – Иркутск: Изд-во ИТУ, 2006 .
5. *Кокиева Г.Е.* Кормовые дрожжи как источник белка и витаминов // *Матер. науч. конф. «Научный и инновационный потенциал Байкальского региона глазами молодежи».*- Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006.

02.00.21

<sup>1</sup>А.В. Митрофанова, <sup>1</sup>Е.А. Фортальнова канд. хим. наук,  
<sup>1</sup>М.Г. Сафроненко канд. хим. наук, <sup>2</sup>Е.Д. Политова д-р физ.-мат. наук,  
<sup>2</sup>А.В. Мосунов канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов,  
 ФФМиЕН, кафедра неорганической химии,  
 г. Москва, chemistann@gmail.com

<sup>2</sup>Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова,  
 г. Москва

## ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО ТИТАНАТА ФЕРРИТА ВИСМУТА, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ Nb(V)

Исследованы фазообразование и физико-химические свойства твёрдых растворов  $Bi_5Fe_{1+y}Ti_{3-2y}Nb_yO_{15}$  с  $y = 0.0 - 1.0$  и  $\Delta y = 0.2$ , полученных с использованием муфельного и микроволнового способов термообработки в ходе синтеза. Установлено, что в области гомогенности  $0.0 \leq y \leq 0.4$  полученные фазы характеризуются ромбическим типом симметрии элементарной ячейки. Выявлено, что увеличение содержания катионов Nb(V) в составе полученных фаз приводит к возрастанию объёма элементарной ячейки и понижению температуры сегнетоэлектрического фазового перехода.

Ключевые слова: титанат феррит висмута, фазообразование, фаза Ауривиллиуса, слоистый перовскит, сегнетоэлектрик, сегнетомагнетик, мультиферроик.

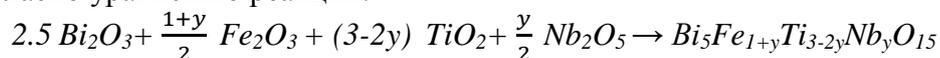
### Введение

Слоистые перовскитоподобные сегнетоэлектрики – фазы Ауривиллиуса – перспективные базовые объекты для получения новых фаз, характеризующихся сочетанием электрического и магнитного упорядочений в кристаллической структуре, так называемых сегнетомагнетиков или мультиферроиков.

Структура фаз Ауривиллиуса ( $A_{m-1}Bi_2V_mO_{3m+3}$ ) состоит из чередующихся заряженных слоев  $(Bi_2O_2)^{2+}$  и перовскитоподобных блоков, состоящих из  $m$  слоев  $(A_{m-1}V_mO_{3m+1})^{2-}$  [1]. Значения  $m$  характеризуют структуры с различным количеством слоев в пределах одного перовскитоподобного блока. Известный сегнетоэлектрик – слоистый титанат феррит висмута  $Bi_5FeTi_3O_{15}$  – относится к этому типу кристаллических структур с  $m = 4$  [2-4]. При температуре Кюри ( $T_C$ )  $\sim 740^\circ C$  его ромбическая кристаллическая структура (Пр. Гр.  $A2_1am$ ) претерпевает фазовый переход в параэлектрическую фазу с тетрагональной симметрией элементарной ячейки (Пр. Гр.  $I4/mmm$ ) [5]. Кроме того,  $Bi_5FeTi_3O_{15}$  является антиферромагнетиком ниже температуры Нееля ( $T_N$ )  $-193^\circ C$  [6]. Существенное влияние на параметры кристаллической решётки,  $T_C$  и  $T_N$ , термическую устойчивость и электрофизические характеристики  $Bi_5FeTi_3O_{15}$  оказывают катионные замещения в перовскитных блоках кристаллической структуры [7-9]. Поэтому исследования катион замещённых фаз на основе  $Bi_5FeTi_3O_{15}$  являются актуальными направлениями, как в области создания новых сегнетомагнитных материалов (мультиферроиков) для современной электроники, так и для поиска эффективных способов регулирования их полезных свойств.

### Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Синтез твёрдых растворов  $Bi_5Fe_{1+y}Ti_{3-2y}Nb_yO_{15}$  (BFTNb) с  $y = 0.0 - 1.0$  и  $\Delta y = 0.2$  проводили по керамической технологии из оксидов висмута(III), титана(IV), железа(III) и ниобия(V) согласно уравнению реакции:



Для сравнения влияния различных типов термообработки на формирование перовскитоподобных фаз получали две серии образцов с использованием муфельного (печь СНОЛ5) и микроволнового (печь NamiLAB C1500, 2.45 ГГц) отжигов в ходе синтеза.

Фазообразование и физико-химические свойства твёрдых растворов исследовали методами рентгенофазового (РФА) (дифрактометры ДРОН-3 и ДРОН-7,  $\lambda_{\text{CuK}\alpha} = 1.54056 \text{ \AA}$ ), дифференциально-термического (ДТА) (термоанализатор SDT Q600,  $\Delta T = 20\text{--}1100^\circ\text{C}$ ,  $\nu = 10$  град/мин) и диэлектрической спектроскопии (импедансметр HP 4284A,  $\Delta T = 298\text{--}1273 \text{ K}$ ,  $f = 100 \text{ Гц} - 1 \text{ МГц}$ , 1 В, Ag-электроды).

Для изучения фазообразования и синтеза серий твёрдых растворов BFTNb в условиях различных типов термообработки, были выбраны температурные режимы:  $T_1=800^\circ\text{C}$  (6 ч.),  $T_2=900^\circ\text{C}$  (6 ч.) для муфельного и  $T=850^\circ\text{C}$  (3 ч.) для микроволнового отжига.

Согласно результатам РФА на первой стадии синтеза с использованием муфельного отжига в образцах BFTNb формируются фазы титанатов и ферритов висмута различного состава. На второй стадии, в образцах с  $0.0 \leq y \leq 0.2$  завершается фазообразование твёрдых растворов на основе  $\text{Bi}_5\text{FeTi}_3\text{O}_{15}$ . Образцы с  $y \geq 0.4$  на этой стадии остаются многофазными.

Одностадийный микроволновый отжиг при  $T = 850^\circ\text{C}$  позволил получить однофазные образцы с более широкой областью гомогенности  $0.0 \leq y \leq 0.4$  (рис. 1). Составы с  $y \geq 0.6$  остаются многофазными при любом типе термообработки.

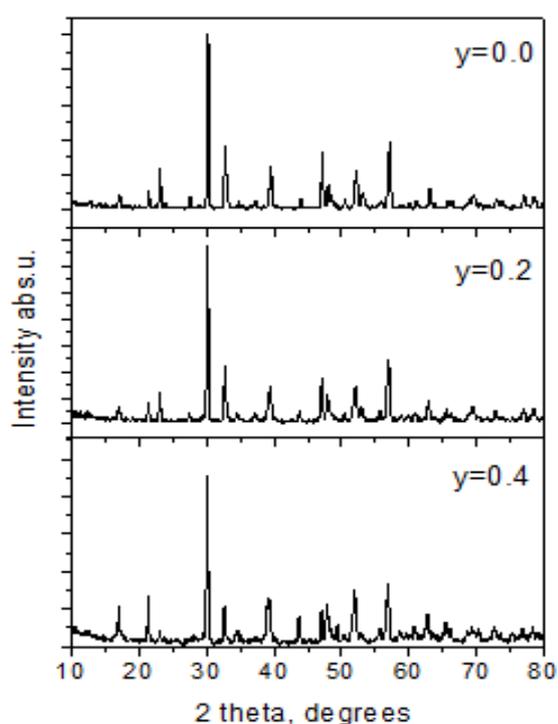


Рис. 1. Дифрактограммы образцов BFTNb, полученных с использованием микроволнового отжига

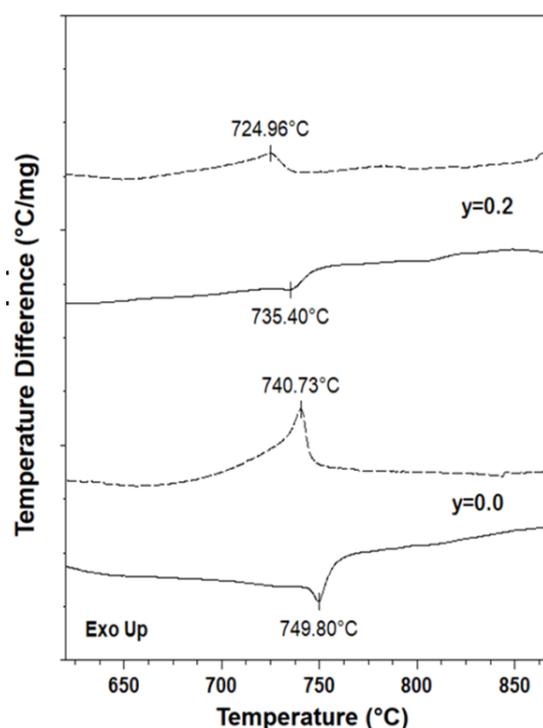


Рис. 2. Кривые ДТА BFTNb при нагревании (сплошные линии) и охлаждении (пунктирные линии)

На дифрактограммах однофазных образцов наблюдается смещение рефлексов в сторону меньших углов, что указывает на увеличение объёма элементарной ячейки с ростом  $y$ . Это изменение обусловлено увеличением содержания в образцах BFTNb замещающих катионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Nb}^{5+}$  с большим, чем у  $\text{Ti}^{4+}$  ионным радиусом. Анализ дифрактограмм BFTNb с  $0.0 \leq y \leq 0.4$  показал, что полученные фазы кристаллизуются в ромбической сингонии.

Дифференциально термический анализ BFTNb с  $0.0 \leq y \leq 0.4$  подтверждает данные РФА о принадлежности кристаллической структуры к низкому классу симметрии (рис. 2). Проявляющиеся на кривых ДТА обратимые аномалии в области  $\sim 720 - 750^\circ\text{C}$  сопровождаются температурным гистерезисом  $\sim 8^\circ$ , что указывает на происходящий в образцах структурный фазовый переход из ромбической в тетрагональную сингонию. Температура фазового перехода понижается с ростом  $y$  на  $\sim 15^\circ$ .

На температурных зависимостях диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) образцов BFTNb выявлены частотно зависимые и частотно независимые аномалии (рис. 3, 4). Частотно зависимые аномалии относятся к релаксационным процессам в керамиках. А частотно независимые – указывают на сегнетоэлектрический фазовый переход. Значения температуры этого перехода, как и на кривых ДТА, понижаются с ростом  $y$  (на  $\sim 100^\circ$  в диапазоне значений  $y = 0.0 - 1.0$ ).

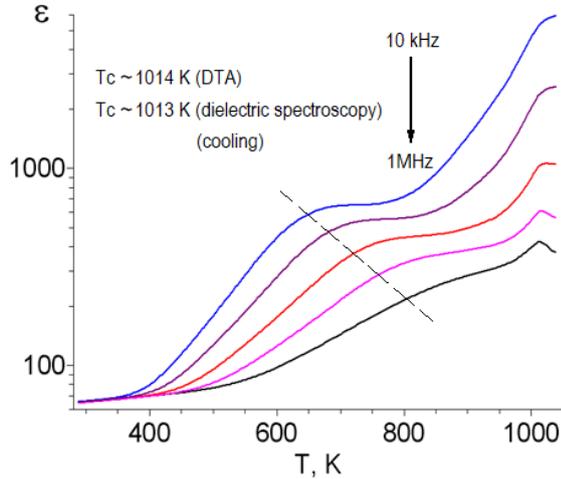


Рис.3. Температурные зависимости  $\epsilon(T)$  образца BFTNb с  $y=0.0$

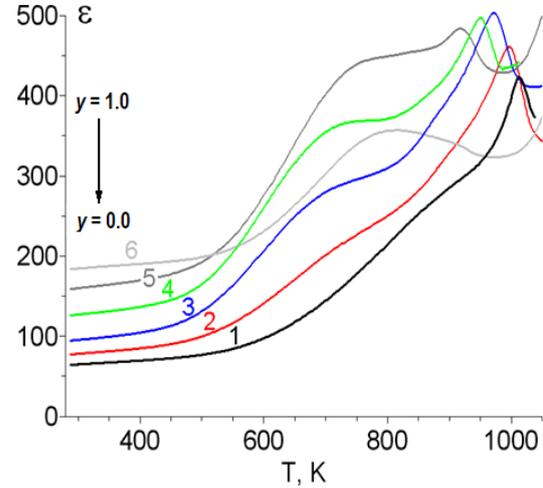


Рис. 4. Температурные зависимости  $\epsilon(T)$  образцов BFTNb с  $0.0 < y < 1.0$

Таким образом, в результате проведённого исследования установлено, что микроволновый тип термообработки оксидной шихты при твёрдофазном синтезе является более эффективным, чем муфельный,  $\text{Bi}_5\text{Fe}_{1+y}\text{Ti}_{3-2y}\text{Nb}_y\text{O}_{15}$ , так как позволяет расширить область гомогенности этих фаз при понижении температуры синтеза и уменьшении времени отжига. Выявлено, что в области гомогенности  $0.0 \leq y \leq 0.4$  твёрдые растворы  $\text{Bi}_5\text{Fe}_{1+y}\text{Ti}_{3-2y}\text{Nb}_y\text{O}_{15}$  кристаллизуются в ромбической сингонии. Объём их элементарной ячейки увеличивается с ростом  $y$  при увеличении содержания замещающих катионов с большим, чем у  $\text{Ti(IV)}$ , ионным радиусом в перовскитных блоках структуры фаз Ауривиллиуса. Показано, что температура сегнетоэлектрического фазового перехода понижается с ростом  $y$ .

**Список литературы**

1. *Shashkov M. S., Malyshkina O. V., Piir I. V., & Koroleva M. S.* Dielectric Properties of Iron Containing Bismuth Titanate Solid Solutions with a Layered Perovskite Structure. // *Physics of the Solid State*. – 2015. – 57(3). – PP. 518–521.
2. *Birenbaum A.Y., & Ederer C.* The potentially multiferroic Aurivillius phase  $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$ : cation site preference, electric polarization, and magnetic coupling from first-principles. // *Physical Review B*. – 2014. – 90(21). – 214109.
3. *Chen X.Q., Zeng X.B., Yang F.J., Kong X.P., Wei C., & Su P.* Room temperature magnetoelectric coupling in  $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$  ceramics. // *Advanced Materials Research*. – 2013. – 668. – PP. 762-766.
4. *Garcia-Guaderrama M., Arizaga Gregorio Duadalupe Carbajal, & Duran A.* Effect of synthesis conditions on the morphology and crystal structure of biferroic  $\text{Bi}_5\text{FeTi}_3\text{O}_{15}$ . // *Ceramics International*. – 2014. – 40. – PP. 7459-7465.
5. *Li J.-B., Huang Y. P., Rao G. H., Liu G. Y., Luo J., Chen J. R., & Liang J. K.* Ferroelectric transition of Aurivillius compounds  $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$  and  $\text{Bi}_6\text{Ti}_3\text{Fe}_2\text{O}_{18}$ . // *Applied Physics Letters*. – 2010. – 96. – 222903.
6. *Jartych E., Pikula T., Mazurek M., Lisinska-Czekaj A., Czekaj D., Gaska K., Przewoznik J., Kapusta C., & Surowiec Z.* Antiferromagnetic spin glass-like behavior in sintered multiferroic Aurivillius  $\text{Bi}_{m+1}\text{Ti}_3\text{Fe}_{m-3}\text{O}_{3m+3}$  compounds. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2013. – 342. – PP. 27-34.
7. *Mao X., Wang W., Chen X., & Lu Y.* Multiferroic properties of layer-structured  $\text{Bi}_5\text{Fe}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{Ti}_3\text{O}_{15}$  ceramics. // *Applied Physics Letters*. – 2009. – 95. – 082901.
8. *Zuo X., Zhang M., He E., Guan B., Qin Y., Yang J., Zhu X., & Dai J.* Structural, magnetic, and dielectric properties of W/Cr co-substituted Aurivillius  $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{FeO}_{15}$ . // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – 726. – PP. 1040-1046.
9. *Yin W., Chen C., Bai W., Yang J., Zhang Y., Tang X., Duan C-G., Chu J.* Dielectric behavior dependence of temperature and Cr-doping contents of Aurivillius  $\text{Bi}_5\text{Ti}_3\text{XO}_{15}$  ceramics. // *Ceramics International*. – 2016. – 42. – PP. 4290-4305.

02.00.04

**Е.Ю. Образцова канд. техн. наук, А.В. Рухов д-р техн. наук, И.А. Жабкина,  
Е.С. Бакунин канд. техн. наук**

«Тамбовский государственный технический университет»,  
кафедра «Химия и химические технологии»,  
Тамбов, nikif83@mail.ru

### **ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АДСОРБЦИИ КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛОВОГО ОРАНЖЕВОГО НА ПОВЕРХНОСТИ ОКИСЛЕННОГО НАНОГРАФИТА, СИНТЕЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ**

*Установлено, что наиболее адекватно процесс адсорбции метилового оранжевого на поверхности окисленного нанографита, полученного электрохимическим способом, описывает уравнение Фрейндлиха, при этом энергия активации, вычисленная исходя из уравнения Дубинина-Радушкевича составляет 0,8 кДж/моль, что говорит о физической природе адсорбции метилового оранжевого на поверхности окисленного нанографита.*

Ключевые слова: оксид нанографита, метиловый оранжевый, адсорбция.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время постоянно увеличивается интерес к новым аллотропным модификациям углерода, к которым в том числе относится нанографит – плоские углеродные наносистемы, образованные графеновыми слоями, имеющие открытые края. Подобный интерес продиктован уникальными свойствами этих материалов, такими как высокая тепло- и электропроводность, термо- и радиационная стойкость и др.

Установление новых полезных свойств и областей применения нанографитов не представляется возможным без их комплексного и всестороннего исследования. Одним из ключевых параметров нанографитов, определяющего его свойства, является удельная поверхность. Из известных способов ее определения наибольшее распространение получили адсорбционные методы, в том числе в жидкой фазе. Например, адсорбция водорастворимых красителей [1]. Однако применение подобных методов не возможно без понимания физико-химических закономерностей адсорбции красителей на поверхности нанографитов различной химической природы.

Целью настоящей работы является исследование особенностей процесса адсорбции кислотного азокрасителя метилового оранжевого (МО) на поверхности оксида нанографита, полученного электрохимическим способом, который отличается от традиционного метода синтеза окисленных графеновых структур, метода Хаммерса, простотой аппаратного оформления и экологической безопасностью [1].

#### **МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА**

Электрохимическая эксфолиация окисленных графеновых структур осуществлялась на постоянном токе в двухэлектродной ячейке в растворе серной кислоты, в качестве анода был использован платина, катодом являлась графитовая фольга, марки «Графлекс» [2].

Адсорбционные свойства нанографита изучали используя стандартную методику фотометрического анализа на основе градуировочного графика при концентрациях от 1 до 6 мг/л, по отношению к МО, средний диаметр молекулы которого составляет 0,67 нм, при заранее определенной аналитической длине волны 440 нм.

Адсорбцию красителей вычисляли по следующей формуле:

$$a = \left( \frac{C_0 - C_p}{m} \right) V$$

где  $a$  – величина адсорбции, мг/г;  $C_0$  – концентрация исходного раствора, мг/л ;  $C_p$  – концентрация равновесного раствора, мг/л ;  $V$  – объём раствора, л;  $m$  – масса адсорбента, г, равная  $4,5 \cdot 10^{-3}$  г.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

*Физико-химические свойства оксида наногرافита*

На рисунке 1 представлен микроснимок окисленного наногرافита, полученного электрохимическим способом. Относительное содержание С:О в образце равно 79.5:20.5, латеральный размер частиц находится в пределах от 17 до 100 мкм.

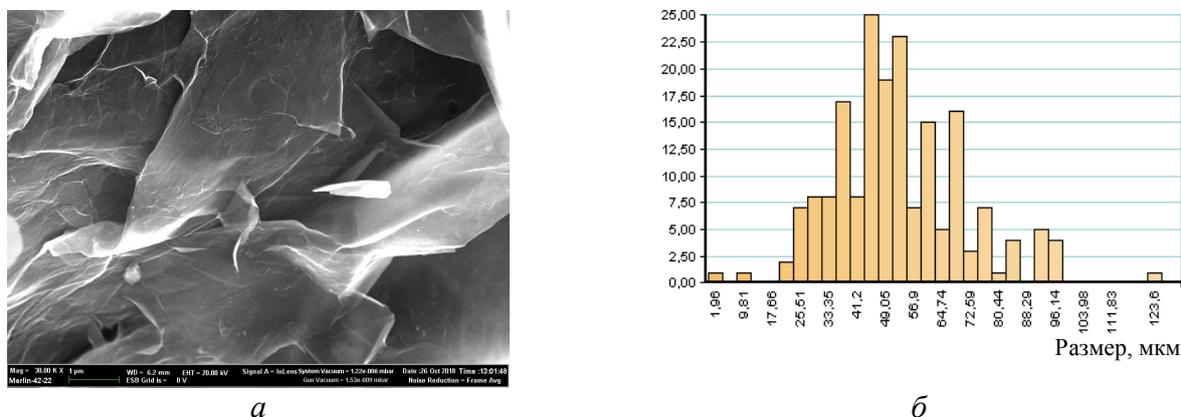


Рис. 1. – Сканирующая электронная микроскопия оксида наногرافита (а) и распределение частиц по размерам (б)

На ИК-спектрах исследуемого материала, были обнаружены полосы поглощения в диапазоне  $3000-3600\text{ см}^{-1}$ , которые согласно литературным данным можно отнести к валентным колебаниям связей О–Н. Полосы поглощения при  $1735\text{ см}^{-1}$  относится к колебаниям связи С=О в кетонных или карбонильных группах, полоса при  $1296\text{ см}^{-1}$ , характеризует колебания –С–О карбоксильной группы, а полоса при  $1164\text{ см}^{-1}$  – к колебаниям связи С–ОН.

*Подбор моделей адсорбции МО на оксиде наногرافита*

На рисунке 2 (а) представлена изотерма адсорбции МО оксидом наногرافита. С учетом формы изотерм адсорбции были промоделированы экспериментальные результаты с использованием простых адсорбционных изотерм, такие как классические уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха, которые в линейной форме выражены уравнениями (1) и (2) соответственно. Согласно расчетам (таблица 1), наиболее адекватно процесс адсорбции описывает модель Фрейндлиха, с величиной достоверной аппроксимации равной 0,9935, следовательно адсорбция МО происходит на гетерогенной неоднородной поверхности, большинство активных центров которой обладают различными величинами энергии, что связано по всей видимости с наличием различных типов функциональных групп на поверхности наногرافита. Уравнение для расчета адсорбции:  $a = 25,2C^{0,44}$ .

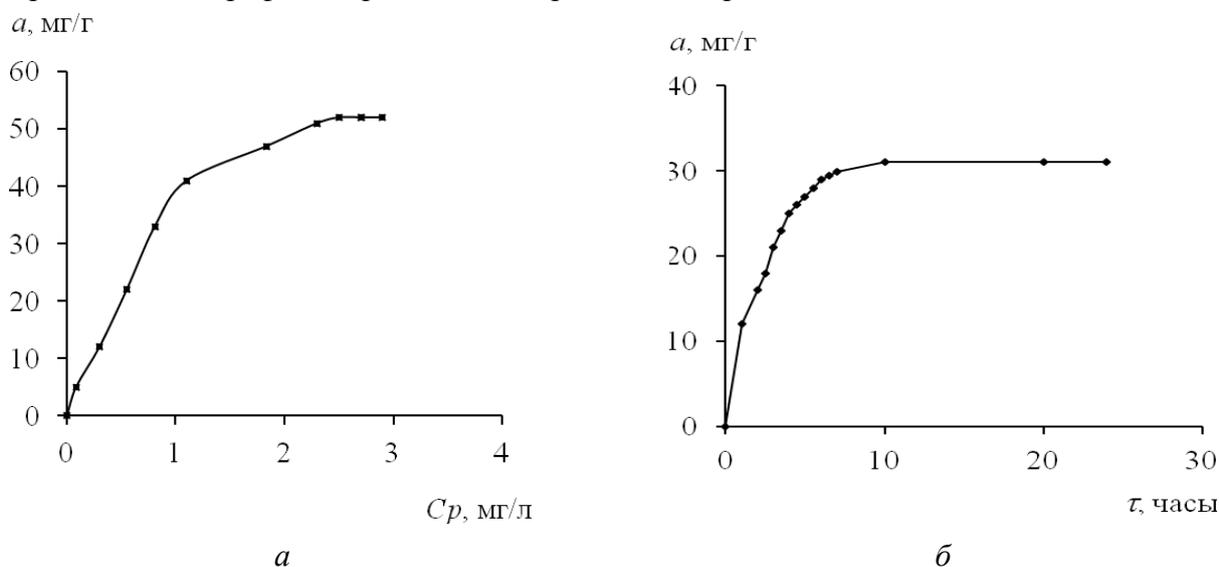


Рис. 2 - Изотерма адсорбции (а) и кинетическая кривая (б) адсорбции МО на оксиде наногرافита

$$\frac{C_p}{a} = \frac{1}{K_L a_e} + \frac{C_p}{a_e} \quad (1)$$

$$\ln a = \ln K_F + \frac{1}{n} \ln C_p \quad (2)$$

где  $a_e$  – адсорбционная емкость сорбента при насыщении, мг/г,  $K_L$  и  $K_F$  константы уравнения Ленгмюра и Фрейндлиха соответственно.

Для уточнения механизма адсорбции были использованы уравнения изотермы адсорбции Дубинина-Радушкевича, которое в линейной форме выглядит (3):

$$\ln a = \ln a_e + k\varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = RT \ln(1 + 1/C_p)$$

$$E = (-2k)^{-0,5}$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $8,314 \cdot 10^{-3}$  кДж/(моль·К)),  $T$  – абсолютная температура(К),  $E$  – энергия активации кДж/моль.

Таблица 1. – Коэффициенты в уравнениях Ленгмюра и Фрейндлиха

Уравнения	Фрейндлих			Ленгмюр				Дубинин-Радушкевич		
	1/n	$K_F$	$R^2$	1/ $a_m$	1/ $K_L a_m$	$K_L$	$R^2$	$k$	$E$	$R^2$
$y = 3,226 + 0,449x$	0,44	25,2	0,9935	-	-	-	-	-	-	-
$y = 0,054 + 0,495x$	-	-	-	0,02	0,054	1,48	0,9223	-	-	-
$y = 3,97 - 6,35x$	-	-	-	-	-	-	-	6,35	0,8	0,9927

Исходя из расчетов, энергия активации процесса адсорбции составляет порядка 0,8 кДж/моль, что указывает на физический характер сорбции МО на поверхности оксида наногрфита.

Согласно кинетическим кривым, рисунок 2 (б) равновесие в адсорбционной системе «окисленный наногрфит – МО» наступает через 10 часов. Обработка кинетических кривых адсорбции (таблица 2) в рамках модели псевдо-первого (Лагергена) и псевдо-второго порядка, которые в линейной форме выражены уравнениями (4) и (5) соответственно:

$$\ln(a_e - a) = \ln a_e - k_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{a} = \frac{1}{k_2 \cdot a_e^2} + \frac{t}{a_e} \quad (5)$$

где  $k_1$  – константа скорости псевдо-первого порядка, мин<sup>-1</sup>,  $k_2$  – константа скорости сорбции модели псевдо-второго порядка, г·(мг·мин)<sup>-1</sup>

показала, что модель псевдо-первого порядка имеет достаточно высокий коэффициент детерминации, что указывает на наличие физической адсорбции, что также косвенно подтверждается неизменностью рН раствора красителя измеренного до и после адсорбции.

Однако, коэффициент детерминации для моделей псевдо-второго порядка также достаточно высок  $R^2=0,9912$ . Что может говорить о существовании электростатического взаимодействия между функциональными группами находящимися на поверхности окисленного наногрфита, например  $\text{COOH}$  и хромофорной группой  $-\text{N}=\text{N}$  молекулы красителя.

Таблица 2. – Коэффициенты в уравнениях псевдо-первого и псевдо-второго порядка

Уравнения	Псевдо-первый порядок		Псевдо-второй порядок	
	$k_1$	$R^2$	$k_2$	$R^2$
$y = 3,8164 - 0,5121x$	0,5121	0,9935	-	-
$y = 0,0909 + 0,0213x$	-	-	0,032	0,9912

Для оценки вклада внутри- и внешнедиффузионных процессов в общую скорость процесса сорбции экспериментальные кинетические данные были обработаны в рамках модели Бойда – Адамсона. Как известно, в случае когда процесс лимитирован внешней диффузией кинетическая кривая линейна в координатах  $-\ln(1 - a_e/a) = f(\tau)$ .

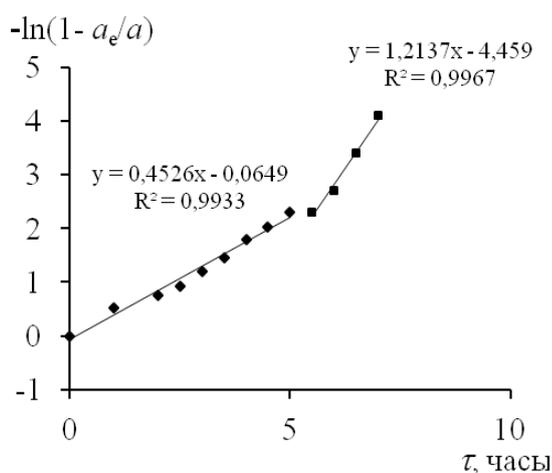


Рис. 3 Кинетическая кривая адсорбции в координатах модели Бойда – Адамсона

Мультиплетный характер данной зависимости говорит о том, что механизм реакции сорбции сложен и лимитируется, как диффузией в пленке на начальном этапе, так и диффузией внутри частиц при высокой степени заполнения поверхности, что подтверждается также высокой адекватностью модели псевдо-второго порядка.

Таким образом, установлено что адсорбция МО протекает на гетерогенной поверхности оксида нанографита, и имеет физическую природу. Последнее позволяет сделать вывод об отсутствии побочных химических реакций в процессе адсорбции, а также возможности применение данного красителя для исследования и определения удельной поверхности окисленных нанографитов, полученных электрохимической эксфолиацией.

#### **Список литературы**

1. Парфит Г., Рочестер К. Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел. – М.: Мир, 1986. – 488 с.
2. Бакунин Е.С., Образцова Е.Ю., Рухов А.В. Современные способы получения малослойных графеновых структур методом электрохимической эксфолиации графита // Перспективные материалы. – 2018. – №7. – С. 5–15.

02.00.05

**И.С. Полковников, В.В. Пантелеева канд. хим. наук, А.Б. Шеин д-р хим. наук**

Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
химический факультет,  
кафедра физической химии,  
Пермь, ashein@psu.ru

### **АНОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА МОНОСИЛИЦИДЕ МАРГАНЦА В РАСТВОРАХ ХЛОРОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ**

*Установлены кинетические закономерности анодного поведения MnSi-электрода в растворах 1.0 М HCl и 0.1 М HCl + 0.9 М NaCl. Сделан вывод, что в процессе анодного окисления на поверхности силицида марганца формируется оксидная пленка, близкая по составу к SiO<sub>2</sub>. Рассчитаны толщина оксидной пленки и ее удельное сопротивление в зависимости от потенциала электрода и кислотности среды.*

Ключевые слова: *силицид марганца MnSi, анодное окисление, пассивация, хлороводородная кислота.*

#### **Введение**

Силициды переходных металлов интенсивно изучаются на протяжении нескольких десятков лет [1-6]. Получены интересные результаты, касающиеся кристаллической структуры, термодинамики и кинетики образования, электрических и оптических свойств силицидов [1, 2]. Большое разнообразие свойств силицидов обуславливает их широкое применение в различных отраслях промышленности: силициды используются в качестве материалов устойчивых к высоким температурам [3], коррозии, механическому износу [4]; электродов, применяемых для получения водорода, хлора [5] и др. Авторами [6] показано, что данные материалы характеризуются более высокой коррозионной стойкостью по сравнению с металлами в восстановительных и слабоокислительных средах, в условиях повышенного абразивного или механического износа.

При наличии большого количества работ, посвященных исследованию силицидов, коррозионно-электрохимические свойства силицидов марганца изучены слабо. Анодное поведение MnSi и Mn<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> в кислых электролитах частично описано в работах [7, 8]. Предметом настоящей работы является исследование анодного поведения моносилицида марганца в растворах хлороводородной кислоты, установление влияния кислотности среды на его коррозионно-электрохимические характеристики.

#### **Материалы и методика эксперимента**

Материалы для исследования и методика эксперимента подробно описаны в работах [7, 8]. В данной работе исследования проведены в растворах 1.0 М HCl и 0.1 М HCl + 0.9 М NaCl. Все потенциалы в работе указаны относительно стандартного водородного электрода.

#### **Результаты и их обсуждение**

Анодные потенциостатические кривые MnSi-электрода в растворах 1.0 М HCl и 0.1 М HCl + 0.9 М NaCl (рис. 1) имеют слабовыраженные области активного растворения, активно-пассивного перехода, пассивного состояния и перепассивации.

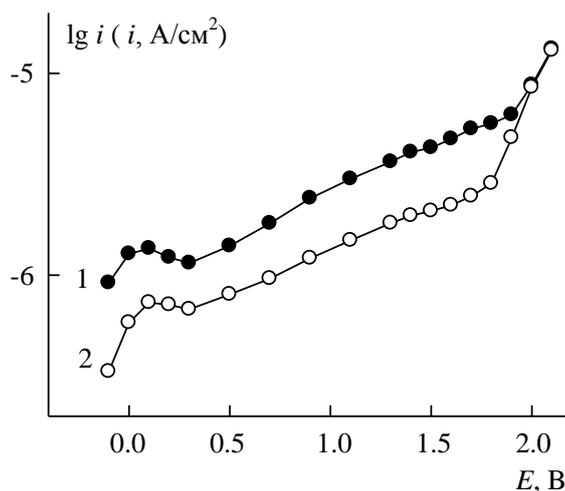


Рис. 1 – Анодные потенциостатические кривые MnSi в растворах:  
1 – 1.0 М HCl; 2 – 0.1 М HCl + 0.9 М NaCl

Анодное поведение MnSi-электрода в исследованных электролитах определяется кремнием, который окисляясь до  $\text{SiO}_2$ , вызывает пассивацию силицида. Селективное растворение марганца из поверхностного слоя MnSi и легирование диоксида кремния оксидами марганца разной степени окисленности, образующимися в соответствии с данным значением  $E$ , обуславливают присутствие перегибов на поляризационной кривой силицида. Менее высокие токи растворения MnSi в растворах с меньшей кислотностью, вероятно, связаны с меньшей скоростью химического растворения  $\text{SiO}_2$  [9]; более высокие токи растворения силицида в солянокислом электролите по сравнению с сернокислым электролитом [7] – с депассивирующим влиянием хлорид-ионов [10].

На анодной ветви циклической вольтамперной кривой MnSi-электрода в растворе 1.0 М HCl (рис. 2) в первом цикле поляризации при  $E$  примерно от -0.15 до 1.1 В регистрируется пик активного растворения. В этой области марганец селективно растворяется, в результате чего поверхность MnSi-электрода обогащается кремнием. Устойчивость диоксида кремния в кислых средах [9] вызывает затухание процессов селективного растворения марганца, окисления кремния и облагораживание потенциала пика. На обратном ходе кривой регистрируются два катодных пика при потенциалах  $E \approx 1.3$  В и 0.5 В; изменение потенциала реверса до  $E = 1.1$  В приводит к исчезновению второго пика. Данные пики, по-видимому, связаны со стадийным восстановлением диоксида марганца, образующегося на поверхности электрода на прямом ходе кривой при  $E > 1.6$  В.

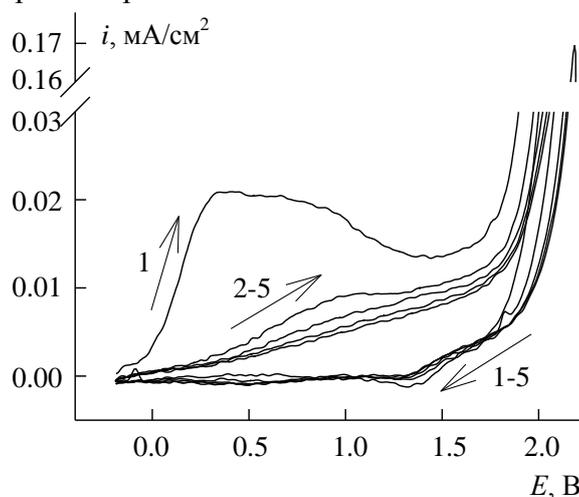


Рис. 2 – Циклическая вольтамперная кривая MnSi в растворе 1.0 М HCl.  
Цифры у кривых – номера циклов поляризации

Спектры импеданса MnSi-электрода в растворе 1.0 М HCl (рис. 3) состоят из двух перекрывающихся емкостных полуокружностей в области высоких (ВЧ) и низких частот (НЧ); радиус НЧ-полуокружности значительно превышает радиус ВЧ-полуокружности. В области активного растворения и активно-пассивного перехода с ростом поляризации MnSi-электрода наблюдается увеличение модуля импеданса системы. При потенциалах  $E > 0.5$  В отмечается сначала плавное, затем более резкое снижение  $|Z|$ . Спектры импеданса MnSi-электрода и характер их изменения с потенциалом в растворе 0.1 М HCl + 0.9 М NaCl качественно не отличаются от поведения силицида в растворе 1.0 М HCl; понижение кислотности приводит к росту  $|Z|$ .

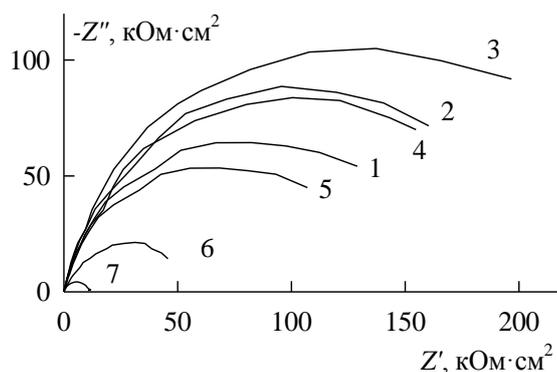


Рис. 3 – Спектры импеданса MnSi в растворе 1.0 М HCl при  $E$ , В:  
1 – -0.1; 2 – 0.1; 3 – 0.5; 4 – 1.1; 5 – 1.5; 6 – 1.8; 7 – 2.0

На основе импедансных измерений рассчитаны толщина  $d$  и удельное сопротивление  $\rho$  оксидной пленки на MnSi-электроде в зависимости от потенциала и кислотности среды. Формирование пассивной пленки на MnSi в интервале потенциалов от  $E$  коррозии до  $E$ , соответствующих примерно середине области пассивации, осуществляется по линейному закону: постоянная роста оксида составляет (0.55 – 0.56) нм/В. Толщина оксидной пленки на силициде при этих значениях  $E$  варьирует в диапазоне (0.6 – 1.5) нм, удельное сопротивление оксидной пленки составляет  $\rho \sim 10^{12}$  Ом·см и уменьшается с ростом поляризации электрода. Удельное сопротивление оксидной пленки на MnSi соответствует нижнему порогу значения удельного сопротивления диоксида кремния ( $\rho(\text{SiO}_2) \approx (10^{12} - 10^{17})$  Ом·см [9]). Увеличение поляризации электрода вызывает легирование диоксида кремния оксидами марганца, повышающими проводимость оксидной пленки ( $\rho(\text{MnO}) \approx (10^9 - 10^{12})$  Ом·см;  $\rho(\text{Mn}_2\text{O}_3) \approx 10^5$  Ом·см;  $\rho(\text{MnO}_2) \approx (10^{-1} - 10^2)$  Ом·см [11]). Увеличение кислотности среды приводит к уменьшению толщины и удельного сопротивления оксидной пленки, что обусловлено большей скоростью ее растворения, увеличением пористости и дефектности. При переходе от сернокислого электролита [7] к солянокислому электролиту величины  $d$  и  $\rho$  уменьшаются; по-видимому, хлорид-ионы, проникая в оксидный слой, способствуют растворению оксида, снижению его барьерных свойств.

Перепассивация MnSi-электрода обусловлена окислением металлического компонента сплава, сопровождаемого частичным разрушением оксидной пленки, возрастанием дефектности, ослаблением ее изоляционных свойств.

**Список литературы**

1. Самсонов Г.В., Дворина Л.А., Рудь Б.М. Силициды. – М.: Металлургия, 1979. – 272 с.
2. Semiconducting silicides. *Borisenko V.E.*(ed.) – Berlin: Springer, 2000. – 348 p.
3. *Xu J., Zhou C., Jiang S.* Investigation on corrosion behavior of sputter-deposited nanocrystalline  $(Mo_xCr_{(1-x)})_5Si_3$  films by double cathode glow plasma // *Intermetallics*. – 2010. – V. 18, № 8. – P. 1669-1675.
4. *Xu J., Zhou C., Chen Z.* Corrosion behaviors of  $(Cr,Fe)_3Si/Cr_{13}Fe_5Si_2$  composite coating under condition of synergistic effects of electrochemical corrosion and mechanical erosion // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2010. – V. 496. – P. 429-432.
5. *Vijh A.K., Belanger G., Jacques R.* Electrochemical behaviour of (nominally) iron disilicide electrodes in sulphuric acid // *Materials Chemistry and Physics*. – 1988. – V. 19, № 3. – P. 215-228.
6. *Княжева В.М., Бабич С.Г., Колотыркин В.И.* Металлоподобные соединения переходных металлов – новый класс коррозионно-стойких материалов и защитных покрытий // *Защита металлов*. – 1991. – Т. 27, № 4. – С. 603-616.
7. *Русских М.А., Пантелеева В.В., Шейн А.Б.* Анодное поведение моносилцида марганца в растворе серной кислоты // *Вестник Пермского университета. Серия Химия*. – 2015. – Т. 5, № 3. – С. 50-59.
8. *Окунева Т.Г., Пантелеева В.В., Шейн А.Б.* Анодные процессы на  $Mn_5Si_3$ -электроде в кислых средах // *Конденсированные среды и межфазные границы*. – 2016. – Т. 18, № 3. – С. 383-393.
9. *Zhang X.G.* Electrochemistry of silicon and its oxide. – New York: Kluwer Academic. Plenum Publ., 2001. – 510 p.
10. *Шейн А.Б.* Анодное растворение монокристалла силицида кобальта в серноокислом электролите, содержащем галогенид-ионы // *Журнал прикладной химии*. – 1986. – Т. 59, № 11. – С. 2548-2550.
11. *Лазарев В. Б., Красов В. Г., Шаплыгин И.С.* Электропроводность окисных систем и пленочных структур. – М.: Наука, 1978. – 168 с.

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

05.02.00

<sup>1</sup>А.Ю. Барыкин канд. техн. наук, <sup>1</sup>Д.И. Нуретдинов канд. техн. наук,  
<sup>2</sup>А.М. Фролов канд. техн. наук, <sup>3</sup>С.М. Кучев

<sup>1</sup>НЧИ ФГАОУ ВО «Казанский (Поволжский) федеральный университет»,  
автомобильное отделение,  
кафедра «Эксплуатация автомобильного транспорта»,  
Набережные Челны, alexs-jb@rambler.ru,  
<sup>2</sup>Набережночелнинский УКЦ АСМАП, Набережные Челны,  
ineka\_frolof@mail.ru,  
<sup>3</sup>НП «КАМАЗ - Автоспорт»,  
Набережные Челны, sergey.kuchev@kamaz.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ  
И РЕСУРСА АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*В статье изучены возможности реализации бортового контроля ресурса автомобильного двигателя по косвенным параметрам. Разработан способ оценки расхода моторного масла, связанного с вероятным безотказным пробегом двигателя.*

Ключевые слова: *двигатель внутреннего сгорания, моторное масло, ресурс двигателя, угар масла, картерные газы.*

Точная оценка технического состояния сложных машин и механизмов, в частности степени износа пар трения, даёт возможность своевременно установить возможность дальнейшей эксплуатации и предотвратить отказ во время работы.

В технической эксплуатации грузовых автомобилей большое значение имеет информация о состоянии механизмов и систем двигателя. Непосредственные измерения и оценка степени износа деталей возможны при частичной или полной разборке двигателя во время проведения среднего или капитального ремонта. Поэтому оценка степени работоспособности и безотказности по косвенным показателям является весьма важной, так как она способствует сокращению вероятных отказов на линии.

Техническое состояние деталей цилиндропоршневой группы можно оценить по ряду косвенным показателей, и, прежде всего, по угару моторного масла и давлению картерных газов. Известен ряд работ отечественных учёных, посвящённых данным вопросам [1, 2]. Отрицательное влияние износа деталей выражается не только в повышенном расходе моторного масла, но и в снижении экологических показателей автотранспортного средства [3].

Необходимо отметить, что абсолютная величина расхода масла не является достоверным показателем интенсивности износа деталей двигателя. Очевидно, что повышенный расход масла может быть связан с другими причинами, например, с утечкой через неплотности или потением картера.

Повышение точности оценки ресурса двигателя возможно на основе методики, основанной на данных дорожных испытаний автомобилей с различным пробегом [4]. Критерии, основанные на затратных показателях, предлагаемые в работе [2], не позволяют осуществить бортовую диагностику состояния двигателя. Информация о возникающей потребности в сервисном обслуживании автомобилей подтверждает правильность предложенного подхода [5, 6].

При оценке взаимосвязи косвенных и прямых параметров износа цилиндропоршневой группы дизельного двигателя необходимо учитывать, как отмечено выше, следующие причины повышенного расхода моторного масла:

- 1) угар масла, связанный с неисправностью или износом ряда деталей двигателя, прежде всего поршневых колец;
- 2) утечка в неплотности соединений и трещины поддона, через изношенные уплотнения; потение корпусных деталей.

Выделение причин расхода масла упрощается благодаря различной интенсивности происходящих в первом и во втором случае процессов. В тех же случаях, когда интенсивность утечки относительно мала и сопоставима с угаром масла, ошибка может быть устранена за счёт использования комплексного показателя ресурса двигателя, описываемого ниже.

При выборе способа оценки степени износа деталей цилиндропоршневой группы по косвенным показателям следует, по мнению авторов, принимать во внимание изменение давления моторного масла на днище поддона, зависящее как от угара масла, так и от давления картерных газов.

Таким образом, малая интенсивность падения давления в картере указывает на расход масла вследствие угара и может быть показателем степени износа деталей цилиндропоршневой группы и вероятности отказа.

Предлагаемая авторами методика оценки ресурса двигателя основана на взаимосвязи изменения давления в картере и степени износа деталей цилиндропоршневой группы. При расчёте показаний датчика, устанавливаемого на дне поддона, учитывается влияние давления  $P_f$ , создаваемого объёмом масла, находящегося в поддоне, и давления картерных газов  $P_k$ , регистрируемого датчиком, расположенным в картере вне слоя масла (рис. 1).

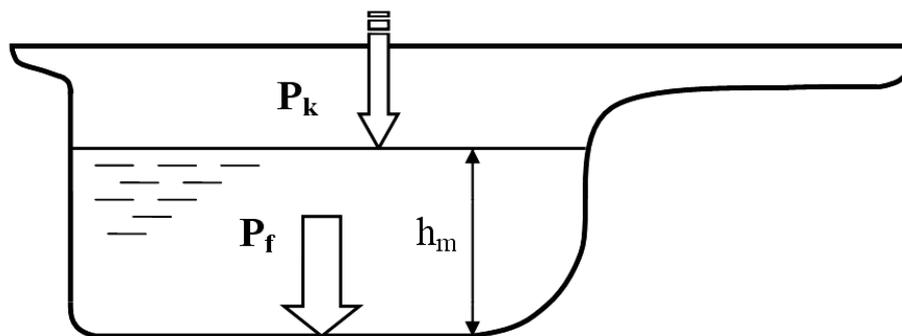


Рис. 1 – Давления масла и газов в картере двигателя

В таком случае давление  $\Delta P_d$ , регистрируемое датчиком на дне поддона, можно определить по формуле:

$$\Delta P_d = \Delta P_f - \Delta P_k \quad (1)$$

где  $\Delta P_f$  - давление на днище поддона, создаваемое расходуемым вследствие угара объёмом масла;  $\Delta P_d$  - давление картерных газов в момент регистрации соответствующего угара масла.

Для определения доли давления, создаваемой расходуемым маслом, предлагается следующая расчётная зависимость:

$$\Delta P_f = (\rho_m - k_t \cdot t_m) \cdot g_e \cdot k_v \cdot \Delta V_m \quad (2)$$

где  $\rho_m$  - плотность моторного масла при нормальных условиях;  $k_t$  - поправочный коэффициент, учитывающий зависимость плотности масла от температуры;  $t_m$  - рабочая температура моторного масла;  $g_e$  - ускорение свободного падения;  $k_v$  - коэффициент, учитывающий влияние изменения объёма масла на его уровень  $h_m$  в картере;  $V_m$  - объём масла, находившегося в поддоне и израсходованного на угар.

Значение коэффициента  $k_t$  должно приниматься в зависимости от вида и марки масла, на основании характеристик, полученных экспериментальным или расчётным путём. В общем случае плотность моторных масел изменяется по линейному закону в соответствии с

изменением температуры. На рис. 2 приведены аппроксимированные зависимости плотности масла по известным в литературе справочным данным [7] для рабочего диапазона температур, где сплошная линия соответствует данным Р. Деляпласа, прерывистая – данным П.К. Охоткина. Можно сделать вывод о весомости влияния температуры моторного масла на его плотность и, соответственно – на изменение давления в картере.

Коэффициент  $k_v$ , учитывающий влияние изменения объёма масла на его уровень, определяется для известного типоразмера поддона в зависимости от площади поверхности масла.

Показания датчика давления, соответствующие текущему значению  $\Delta P_d$ , могут быть использованы бортовой системой диагностики для оценки ресурса двигателя на момент измерения.

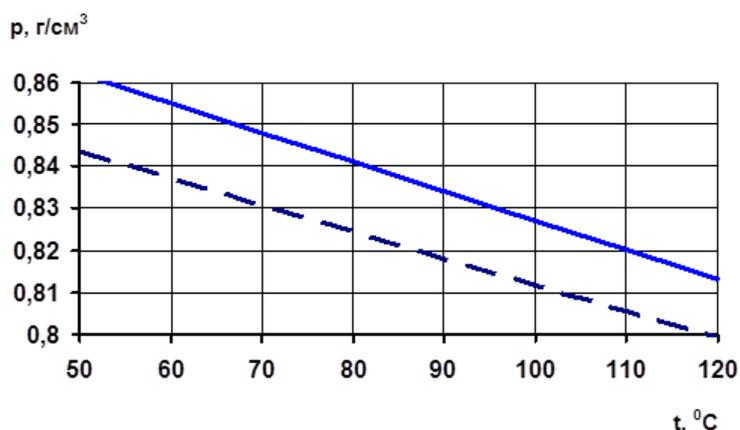


Рис. 2 – Зависимости плотности моторного масла от температуры

Следует обратить внимание, что проведение оценки ресурса по одному параметру может оказаться неточным. Необходимо использовать комплексный показатель мгновенного ресурса двигателя, основанный на нескольких технических параметрах, в число которых должны входить величины угара масла и давления картерных газов.

#### Список литературы

1. *Карташевич, А.Н.* Автоматическая система контроля уровня масла дизельного двигателя / А.Н. Карташевич, О.В. Понталёв, А.В. Гордеенко // Вестник БарГУ, 2015. Серия: технические науки. Вып. 3. – С. 80-84.
2. *Николаев, Е.В.* Оптимизация режимов диагностирования двигателей по параметрам картерных газов / Е.В. Николаев // Труды ГОСНИТИ, 2013; т. 111, ч. 1. - С. 8-12.
3. *Барыкин, А.Ю.* Основные мероприятия по обеспечению требований экологических показателей транспортных средств / А.Ю. Барыкин, Р.Р. Басыров, М.М. Мухаметдинов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. - № 2. - С. 13-15.
4. *Барыкин, А.Ю.* Алгоритм проведения дорожных испытаний при контроле технического состояния ДВС / А.Ю. Барыкин, А.М. Фролов, Д.И. Нуретдинов, Д.К. Шакуров // Итоговая научная конференция: (2017; Набережные Челны). Итоговая науч. конф. проф.-препод. состава, 3 февраля 2017 г. [Текст]: сб-к докладов. - Набережные Челны: ИПЦ Набережночелнинского института К(П)ФУ, 2017. – С. 68-74.
5. *Павлишин, С.Г.* Технический аудит дилерского центра IVECO и HINO г. Хабаровска / С.Г. Павлишин, Д.Е. Баранов, А.А. Бянкин // Автотранспортное предприятие. - 2016. - № 5. - С. 24-27.
6. *Швеёв, А.И.* Клиентоориентированный автосервис – инструмент управления взаимоотношениями с владельцами АТС / А.И. Швеёв, Е.И. Швеёва, Т.В. Швеёва // Автомобильная промышленность. - 2016. - №2. - С. 28-30.
7. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. Плотности масел и их температурные поправки [Электронный ресурс]: - URL: <https://chem21.info/tabs/189660/> (дата обращения 22.02.2019)

05.02.22

**А.П. Буйносов д-р техн. наук, К.Н. Яковлев, А.В. Хваловский**

Уральский государственный университет путей сообщения,  
кафедра «Электрическая тяга»,  
Екатеринбург, buinosov@mail.ru, kostya\_13\_10@mail.ru, antoshka456@gmail.com

### **ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ НА ИЗНОС БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР**

*В статье приводятся результаты климатических условий эксплуатации на износ гребня и нарастание прокат бандажей колесных пар локомотивов на Урало-Сибирском полигоне ОАО «РЖД».*

Ключевые слова: *локомотив, эксплуатация, условия, колесная пара, бандаж, износ, влияние.*

Износостойкость бандажей колесных пар локомотивов характеризуют интенсивностью изнашивания  $I$ , равной удельной толщине изношенного слоя на единицу пробега и зависящей от материала пары «колесо–рельс», состояния смазки, величины контактного давления, условия эксплуатации. По интенсивности изнашивания  $I$ , скорости относительного перемещения трущихся поверхностей ( $v$ ) пары «колесо–рельс», пробега локомотива  $l$  можно оценить износ бандажа  $W$ , как результат изнашивания:

$$W = I \cdot v \cdot l, \text{ см.} \quad (1)$$

Величина  $I$  для бандажной стали может быть принята прямо пропорциональной контактному давлению  $p$  и обратно пропорциональной твердости  $H$ :

$$I = K \cdot \frac{p}{H}, \quad (2)$$

где  $K$  – коэффициент пропорциональности, величина которого зависит от свойств материала бандажа (марки бандажной стали).

Изнашивание является сложным физико-химическим процессом, состоящим в постепенном изменении размеров бандажей колесных пар локомотивов и рельсов за счет отделения с их поверхностей металла или в ее остаточной деформации [1].

Основным процессом, приводящим к износу поверхностей пары «колесо–рельс», является упругопластическая деформация как результат взаимодействия микрорельефов контактирующих поверхностей. Наряду с основным физическим процессом взаимодействия микрорельефов и возникновения фрикционных связей, появляется ряд сопровождающих процессов.

Наряду с усталостной, тепловой, окислительной природой изнашивания, следует отметить абразивную и коррозионную разновидности. В различных условиях работы локомотива абразивное изнашивание получило широкое распространение, когда в зону трения попадают мелкозернистые вещества высокой твердости. При этом происходит разрушение поверхностных слоев сопряженных деталей за счет микрорезания и царапания с отделением мельчайшей стружки. Интенсивность износа бандажей, как правило, более высокая, чем без присутствия абразивов (песка, кварца, силикатов), причем интенсивность изнашивания пропорциональна количеству абразива в зоне контакта колеса и рельса [2].

В отсутствии влаги имеет место химическая коррозия, состоящая в окислении, чаще высокотемпературном, материалов и их сплавов. Так, железо под воздействием кислорода воздуха превращается в окисел  $Fe_2O_3$ . Сами процессы коррозии металлических изделий достаточно сложны и поливариантны, и на их ход оказывают одновременное и часто противоположное действие множество факторов, в том числе состав металлов и сплавов, физико-механические и электрохимические свойства их поверхности, состав и температура газовой среды и др.

Чтобы оценить степень влияния условий эксплуатации на износ колесных пар локомотивов был проанализирован износ бандажей. Влияние условий эксплуатации

определялась сравнением среднего значения ( $M_y$ ) и среднеквадратического отклонения ( $\sigma_y$ ) изменения проката и износа гребня от пробега локомотивов. Измерение этих параметров производилось в летний период времени (с 20 июля по 15 августа 2017 г.), при входе в зиму (с 3 по 30 ноября 2017 г.), зимний период времени (с 20 января по 16 февраля 2018 г.), при выходе из зимы (с 1 апреля по 4 мая 2018 г.). Поскольку прокат и износ гребня при различных значениях пробега являются случайными величинами, их зависимости от пробега определялись с помощью регрессионного анализа [3]. На рис. 1–8 показаны полученные зависимости среднего значения и среднеквадратического отклонения износа гребня от пробега для разных периодов.

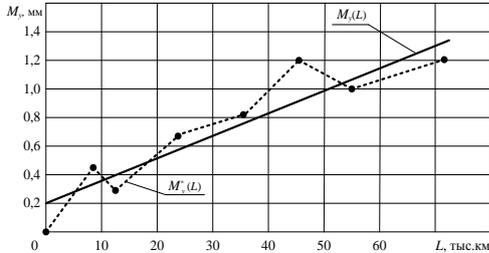


Рис. 1. Зависимость среднего значения износа гребня от пробега в летний период времени

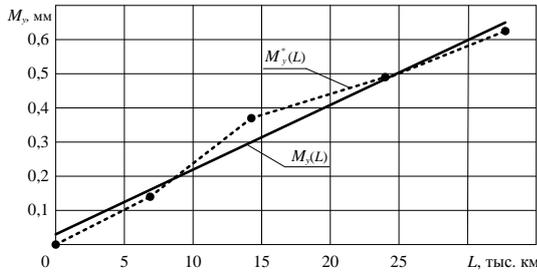


Рис. 3. Зависимость среднего значения износа гребня от пробега при входе в зиму

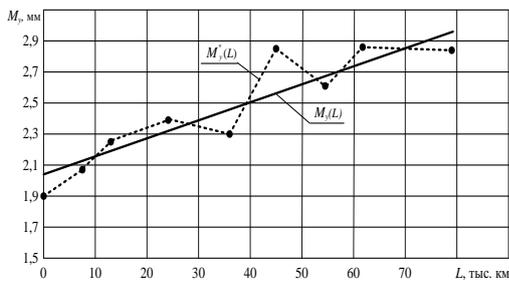


Рис. 5. Зависимость среднего значения износа гребня от пробега в зимний период

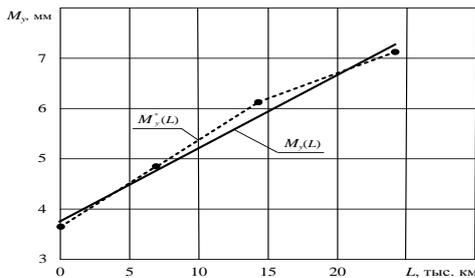


Рис. 7. Зависимость среднего значения износа гребня от пробега при выходе из зимы

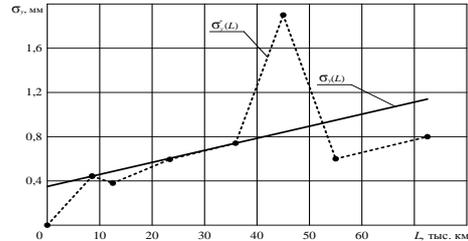


Рис. 2. Зависимость среднеквадратического отклонения износа гребня от пробега в летний период времени

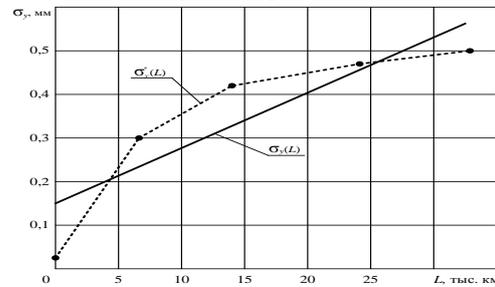


Рис. 4. Зависимость среднеквадратического отклонения износа гребня от пробега при входе в зиму

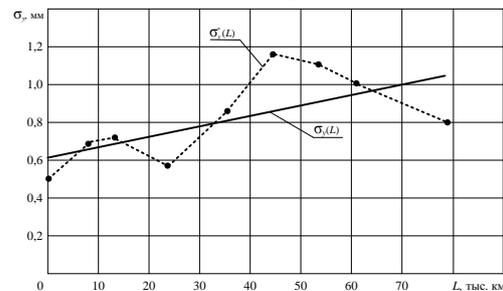


Рис. 6. Зависимость среднеквадратического отклонения износа гребня от пробега в зимний период времени

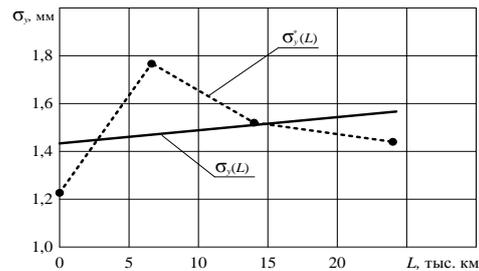


Рис. 8. Зависимость среднеквадратического отклонения износа гребня от пробега при выходе из зимы

Результаты расчетов сведены в таблицу.

Таблица

Распределение износа гребней и проката бандажей локомотивов

Контролируемый параметр	Сравниваемый период времени	Распределения величины износа гребней и проката	
		$M_y$ , мм	$\sigma_y$ , мм
Износ гребня	лето	0,429	0,497
	вход в зиму	0,217	0,324
	зима	0,223	0,258
	выход из зимы	0,245	0,296
Прокат	лето	0,035	0,126
	вход в зиму	0,124	0,242
	зима	0,220	0,288
	выход из зимы	0,163	0,273

Из таблицы видно, что износ гребней бандажей в зимний период времени был незначительным, и обточка бандажей определялась только величиной проката. При этом износ гребней прекращался после образования проката по кругу катания. Было установлено, что на в зимний период времени на боковой грани головки рельса образуется ледяная пленка, которая является естественной смазкой, предохраняющей гребни бандажей локомотивов от износа [4, 5].

Низкие температуры зимой могут влиять на глубину закаленного слоя бандажа и его твердость. Образующийся на бандаже «белый слой» является проявлением образования новых структур. В летний период по мере качения бандажа колесной пары по рельсу накапливаются микроскопические деформации, трещины. Жидкость, внедряющаяся летом при ударах в образовавшиеся микротрещины, ведет себя подобно клину, раздвигающему стенки трещины. На поверхности рельса образуются риски в результате царапающего действия перенесенного металла, находящегося на бандаже в состоянии наклепа, поверхность катания бандажей растрескивается. Образование трещин на бандаже в зимнее время является причиной повышенного износа колесной пары, вблизи кромок материал бандажа выкрашивается [5].

В летний период времени (чтобы уменьшить силу трения, интенсивность изнашивания бандажей колесных пар локомотивов и рельсов), необходимо применять смазку. Смазочные материалы могут быть жидкими, в виде эмульсии, газообразными, пластичными и твердыми. Важно правильно, с учетом всех особенностей эксплуатации локомотивов и состояния пути, выбрать наилучший тип смазки и использовать ее для лубрикации гребней бандажей.

Часть статистических данных по износу гребней и увеличению проката бандажей колесных пар локомотивов отличаются от основной совокупности (на опытном участке разброс значений контролируемых параметров составляет в зависимости от времени года от 0 до 1,45 мм) и средних значений (см. таблицу). Это можно объяснить различным значением величины перекоса колесных пар в раме тележки, несовершенством способа измерения контролируемых параметров (низкая точность измерительного инструмента). Кроме того, вероятно всего, на локомотивах с исправной схемой рекуперативного торможения наблюдается повышенный износ гребней колесных пар. Это требует тщательного изучения. Встает вопрос о необходимости создания портативного, бесконтактного прибора, позволяющего достоверно, с высокой точностью производить замеры проката и толщины гребня бандажей колесных пар локомотивов.

**Список литературы**

1. Буйносов А.П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения. Екатеринбург: УрГУПС, 2009. 224 с.
2. Буйносов А.П., Лаптев С.И. Перспективы применения триботехнических составов для ремонта бандажей колесных пар без прекращения эксплуатации локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 6. С. 50-52.
3. Буйносов А.П., Наговицын В.С., Марулин С.Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110-113.
4. Буйносов А.П. Теоретическое обоснование влияния формы поверхности катания бандажей на коэффициент сцепления электровоза // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 4. С. 105-107.
5. Фетисова Н.Г., Буйносов А.П. Влияние условий эксплуатации электровозов ВЛ11 на износ бандажей колесных пар // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 3. С. 54-56.

05.02.00

**Н.Н. Заболотская канд. мед. наук, Г.Ф. Журавлева**

Набережночелнинский институт КФУ,  
кафедра электроэнергетики и электротехники,  
Набережные Челны, Zabolotsckaya.nin@yandex.ru, gig-82@mail.ru

### **ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА НА ПАО «КАМАЗ»**

*В работе представлены результаты исследования преимуществ внедрения системы экологического менеджмента (СЭМ) на ПАО КАМАЗ. Ежегодно проводимая инспекционная проверка СЭМ АС «Русский Регистр» подтверждает соответствие действующей в ПАО КАМАЗ системы МС ИСО 14001.*

*Ключевые слова: экологический менеджмент, окружающая среда, экологическая политика, предприятие, внедрение системы.*

В современном мире жесткой конкуренции одним из основных рыночных инструментов является следование экологической политике. Экологичность и экономичность утилизации отходов предприятий - это сегодня актуальная проблема. Внедрение системы экологического менеджмента (СЭМ) и сертификация на соответствие международному стандарту ISO 14001:2004 (национальный стандарт ГОСТ Р ИСО 14001-2007) [1] является доказательством экологически ориентированного управления, направленного на уменьшение вредного воздействия предприятия на окружающую среду и получение от этого экономической выгоды. Система экологического менеджмента ПАО КАМАЗ была сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта ИСО 14001:2004 «Система экологического менеджмента. Требования и руководство к применению» Ассоциацией по сертификации «Русский Регистр» в октябре 2007 года (сертификат IQNet от № RU-07.700.026 выданный 31.10.2007 г.) Основная цель экологического менеджмента состоит в сокращении негативного воздействия на окружающую среду таким образом, чтобы минимизировать ущерб и риски предприятия. Экологический менеджмент охватывает весь диапазон проблем, включая проблемы, касающиеся стратегии и конкурентоспособности [2]. ПАО КАМАЗ – предприятие, специализирующееся на производстве большегрузных автомобилей марки «КАМАЗ», автобусных шасси, двигателей и комплектующих к грузовым автомобилям. На предприятии проведена огромная работа по приведению системы в соответствии с корпоративными требованиями ПАО КАМАЗ в части выполнения процедур, локальных нормативных документов корпорации [3]. Среди значимых экологических аспектов выделяют сырьевые материалы, вспомогательные материалы (материалы, используемые в качестве добавок (присадок) в процессе производства, для очистки сточных вод и т. д.), производимую продукцию, топливо (все виды топлива и масел, используемых на предприятии), электричество (общий объем потребления электроэнергии, количество и тип счетчиков электроэнергии), воду (потребление, наличие и тип счетчиков), выбросы в атмосферный воздух, сточные воды, отходы производства, риски (все основные риски) [4]. На ПАО КАМАЗ выявлены основные экологические аспекты, источники образования отходов, идентифицирована структура отходов и операции по обращению с отходами (Таблица). [5] Идентификация экологических аспектов на производстве позволяет контролировать и учитывать виды деятельности, продукции, услуг в целях защиты окружающей среды. В соответствии, с ИСО 14001 организация должна разработать, внедрить и поддерживать процедуру идентификации экологических аспектов своей деятельности, продукции и услуг в рамках определенной области применения системы экологического менеджмента, которые она может контролировать и на которые она может

влиять, учитывая при этом планируемые новые возможности развития или модифицированные виды деятельности, продукции и услуг; выявление тех аспектов, которые оказывают или могут оказывать значимые воздействия на окружающую среду. Организация должна гарантировать, что значимые экологические аспекты учитываются при разработке, внедрении и поддержании системы экологического менеджмента.

Таблица - Основные источники образования отходов на ПАО КАМАЗ

Источники отходов	Отходы	Операции по обращению с отходами
Технический ремонт автотранспорта	Кислота аккумуляторная, аккумуляторы отработанные не поврежденные, с неслитым электролитом, отходы бумаги и картона с пропиткой, покрышки с металлическим кордом отработанные	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК-Набережные Челны»
Замена ламп	Ртутные лампы, отработанные, ртутные трубки, лампы типа ДРЛ	КАМАЗ-Энерго, станция демеркуризации
Окрасочные работы	Отходы лакокрасочных средств, тара из-под краски, текстиль загрязненный	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК – Набережные Челны»
Делопроизводство	Отходы бумаги и картона от канцелярской деятельности и делопроизводства	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК, ЧП Уросов
Мойка деталей и агрегатов	Всплывающая пленка из нефтеуловителей (бензиноуловителей)	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК - Набережные Челны»
Металлообработка	Шлам маслосодержащий, эмульсии и эмульсионные смеси отработанные, содержащие масла или нефтепродукты в количестве не менее 15 %	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК - Набережные Челны
Ремонтные работы	Отходы рубероида, отходы битума, асфальта в твердой форме, отходы мела в виде порошка, бой строительного кирпича	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК - Захоронение на полигоне ТБО
Работа медпункта	Медицинские отходы (хирургические перчатки, шприцы отработанные)	Передача на утилизацию и переработку в ООО «ПЭК - Набережные Челны
Гальванический процесс, механическая обработка деталей	Гальванические шламы	Передача на утилизацию и переработку в ООО «Технология ЭКО»
Переработка вторресурсов	Стружка легированной стали, стружка стальная, бронзы(незагрязненные)	Использование на собственном предприятии /Использование в качестве сырья

Организация должна гарантировать, что значимые экологические аспекты учитываются при разработке, внедрении и поддержании системы экологического менеджмента.

В ПАО КАМАЗ образуется около 300 видов отходов (отходы стержней, горелая земля, шлаки, лом огнеупорный, отходы окрасочных производств, ветошь, механический шлам, пыль бегхаузная, нефтешлам и д.р.) Система экологического менеджмента позволяет достичь не только экологического, но и экономического эффекта. Внедрение и совершенствование СЭМ служит основой для формирования конкурентоспособного, устойчивого, ответственного бизнеса, способного удовлетворить растущие потребности клиентов и ожидания общественности. Благодаря созданию локальных участков по приему отходов и использованию специализированной техники ООО «ПЭК», планируется сократить затраты на обращение с отходами и свести к нулю объем смешанных отходов на всех предприятиях ПАО КАМАЗ. СЭМ ПАО КАМАЗ как показатель экологической ориентации управления по защите окружающей среды достигается за счет полного сокращения количества смешанных отходов, увеличения объемов вторичного сырья, снижения транспортных затрат (за счет уменьшения количества рейсов), оптимизации работы в области обращения с отходами (сортировка, высвобождение, внутренних ресурсов). Эффект достигается прежде всего за счет концентрации на проблемах управления отходами, рационального использования всех имеющихся ресурсов и профессионального опыта компании.

В результате раздельного сбора и выделения вторсырья и опасных отходов наблюдается уменьшение общего объема отходов для захоронения, также размеров экологических платежей и расходов на захоронение. В сравнении с 2012 и 2013 годами произошло уменьшение количества смешанных отходов на 54 %, что увеличило сроки эксплуатации полигона и снизило нагрузки на окружающую среду. Стоимость захоронения 1 тонны отходов не менялась с 2007 года по 2013 год и составила 600 руб./тн. В результате уменьшения размеров экологических платежей и расходов на захоронение экономия составила 570 000 рублей. За счет применения специальных тарифов цены на прием отходов от предприятий и подразделений ПАО «КАМАЗ» были снижены по обезвреживанию на 25%, по захоронению – на 68%. Экономия ПАО КАМАЗ составила более 5 000 000 рублей. [6]

В условиях жесткой конкуренции, соблюдение требований экологической безопасности продукции становится важным условием успешной деятельности производителя. Высокие позиции могут удержать только те предприятия, которые осуществляют сокращения затрат материальных и энергетических ресурсов, что отражено в их стратегии и политике. В национальном и региональном масштабах распространение подходов СЭМ способствует устойчивому развитию общества, позволяя гармонично сочетать экономический рост с сохранением благоприятной окружающей среды.

#### **Список литературы**

1. Международный стандарт ИСО 14001:2004 Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению.
2. Собственникова О. И. Система экологического менеджмента как основа экологизации бизнеса // Молодой ученый. — 2013. — №11. — С. 467-470. — URL <https://moluch.ru/archive/58/7989/> (дата обращения: 05.02.2019).
3. Главная страница ПАО «КАМАЗ». Общие сведения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kamaz.ru/>, свободный.
4. Матягина А. М., Смирнова Е. В. Экологически ответственный бизнес: Монография. М.: Изд-во «Авиа Бизнес Групп», 2009.
5. Проект нормативов образования отходов и лимитов на их размещение ПАО «КАМАЗ» ПНООЛР.
6. Бюллетень «Итоги работы по охране труда, промышленной безопасности и экологии за 2013 год», утвержденный Первым ЗГД ПАО «КАМАЗ» - исполнительным директором.

05.02.11

<sup>1</sup>О.Ю. Кустов, <sup>1</sup>И.В. Храпцов, <sup>1</sup>Р.В. Бульбович д-р техн. наук, <sup>2</sup>М.А. Лобов

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, KustovOU@yandex.ru,  
<sup>2</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель»

## ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ НАКЛОННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

*На основе технологии 3D-печати создан образец однослойной сотовой звукопоглощающей конструкции из PET-пластика со стандартным размером сотовой ячейки и со степенью перфорации 5%. Акустические характеристики данного образца имеют хорошее согласование с аналогичными образцами, напечатанными под наклоном. Акустические характеристики определялись на интерферометре с нормальным падением волн.*

*Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции; 3D-печать; акустические характеристики; импеданс; интерферометр с нормальным падением волн.*

Экспериментальное определение акустических характеристик звукопоглощающих конструкций (ЗПК) авиационного двигателя на основе передаточной функции [1] широко распространено, но достаточно чувствительно к точности расположения микрофонов и образца ЗПК в импедансной трубе. В работе [2] Mats Abom и Hans Voden рассмотрели различные ошибки, которые могут возникнуть при измерениях на интерферометре и повлиять на передаточную функцию. Важным было расстояние между микрофонами и расстояние между одним микрофоном и образцом. Brian F. G. Katz также рассмотрел, как влияет изменение расстояния в несколько миллиметров между микрофонами и (или) между опорным микрофоном и образцом ЗПК на акустические характеристики [3]. В этих установках (интерферометрах) генерируется поршневая звуковая волна, но в действительности, в авиационном двигателе на ЗПК воздействует более сложная газодинамическая структура со звуковой волной, падающей под углом. Интересным становится, насколько изменятся акустические характеристики образца ЗПК на установке «Интерферометр с нормальным падением волн» [4], если его расположить под небольшим наклоном, увеличив расстояние от микрофонов до поверхности образца. Стоит отметить работу с методикой расчета ЗПК [5], где авторы рассматривают влияние угла падения звуковой волны на двухслойный образец с прямоугольным профилем.

Производство образцов ЗПК из композитных материалов для проведения данных экспериментальных исследований довольно трудоемкий и длительный процесс, имеющий ряд своих недостатков. Рациональным для исследований стало изготовление штучных образцов различных конфигураций при помощи печати на 3D-принтере. Точность изготовления образцов ЗПК при помощи аддитивных технологий намного выше, чем промышленная технология изготовления из композиционных материалов. Это позволяет создавать резонаторы со сложной геометрической формой, однако и у этой технологии имеются недостатки [6].

Для проведения серии экспериментальных исследований были напечатаны образцы из PET-пластика со стандартным размером сотовой ячейки и степенью перфорации 5% (рис. 1а). Образцы в наклонном исполнении также представлены на рис. 1 (б, в, г). Различие акустических характеристик образцов оценивалось по величине коэффициента звукопоглощения ( $\alpha$ ) и импедансу, который определялся на установке «Интерферометр с нормальным падением волн» [4]. Испытания проводились в частотном диапазоне 500-3500 Гц с уровнями акустического давления 100, 120 дБ.

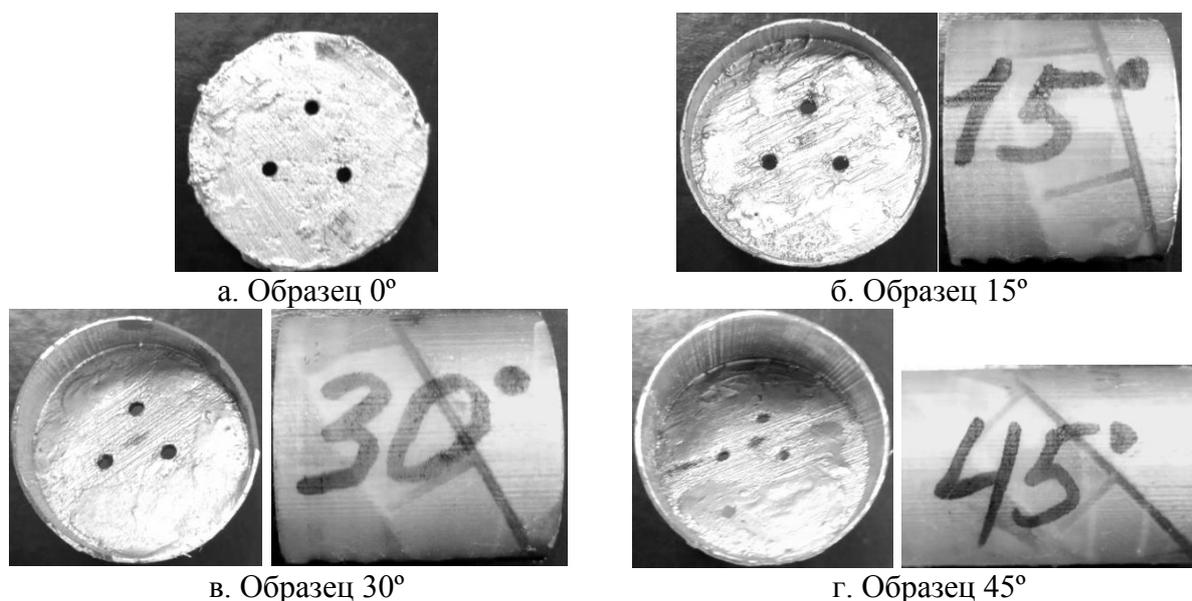


Рис. 1 - Образцы для исследования

Резонансная частота образцов ЗПК, найденная экспериментально, сравнивалась с частотой, определенной полуэмпирическим путем с использованием концевой поправки, полученной на основе функциональной зависимости [7]. Расхождения резонансной частоты у образцов приведены в таблице. Как видно из таблицы, расхождения не значительны и в среднем составляют 50 Гц.

Таблица - Резонансная частота образцов.

Метод определения резонансной частоты ( $f_p$ )	Полуэмпирический расчет	Эксперимент			
		Образец 0°	Образец 15°	Образец 30°	Образец 45°
$f_p, \text{Гц}$	2295	2270	2225	2285	2210

Визуально, расхождения хорошо видны на кривых мнимой части импеданса (рис. 2). Все акустические характеристики образцов представлены на рис. 2-4. Результаты экспериментов наглядно подтверждают вывод авторов [5], что «учёт угла падения на воздухозаборник слабо влияет на значение коэффициента звукопоглощения». Резонансная частота также имеет слабое расхождение и не имеет линейной зависимости от угла наклона. Однако, образец под углом 45° имеет сложную диссипацию. Эти расхождения действительной части импеданса могут напрямую зависеть от расстояния между микрофоном и образцом, а также нелинейных эффектов на наклонной поверхности, особенно в области наклонных отверстий.

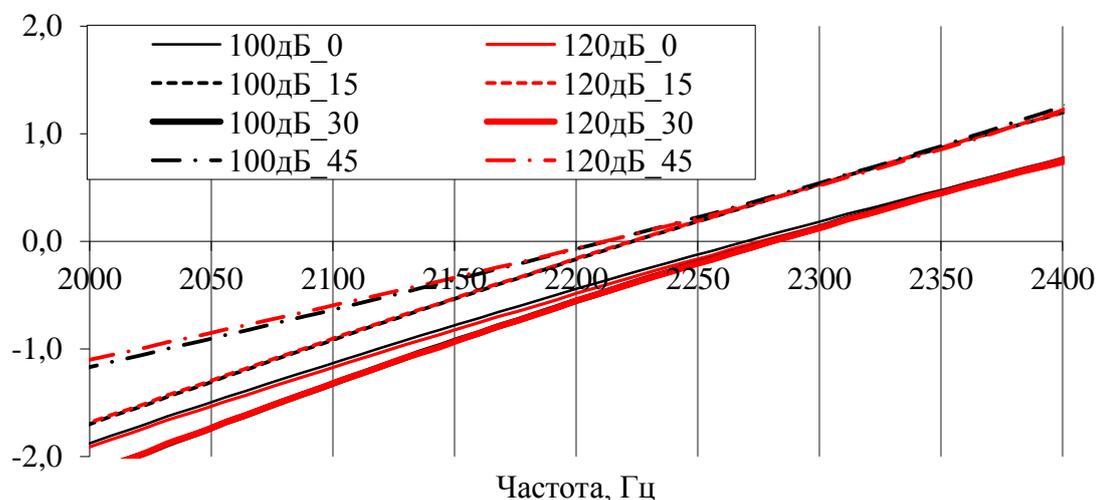


Рис. 2 - Мнимая часть импеданса образцов

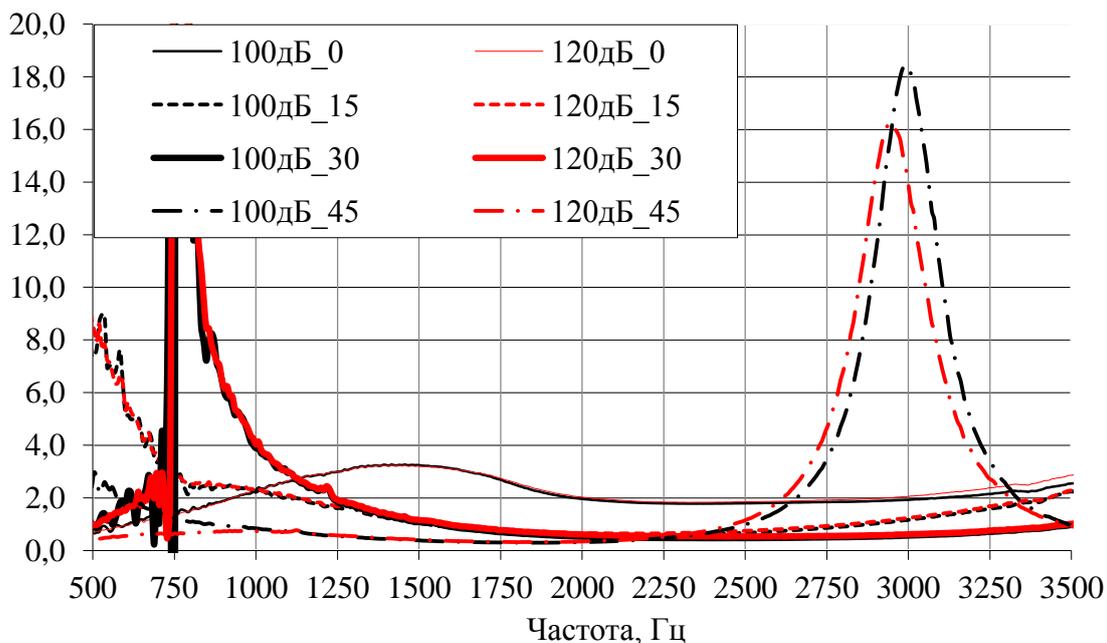


Рис. 3 - Действительная часть импеданса образцов

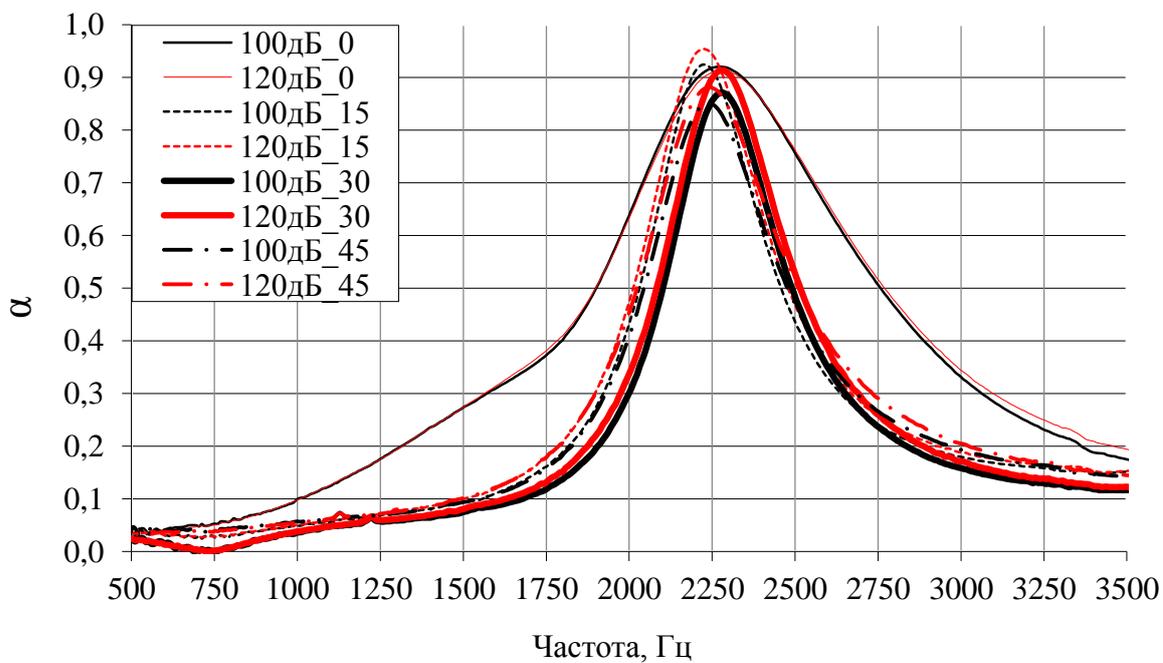


Рис. 4 - Коэффициент звукопоглощения образцов

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, договор № 17-41-590107\19.*

**Список литературы**

1. *Chung J.Y., Blaser D.A.* Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1980. Vol. 68, No. 3. P. 907-921.
2. *Boden Hans, Abom Mats.* Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1986. Vol. 79, No. 2. P. 541-549. DOI: 10.1121/1.393542.
3. *Brian F. G. Katz.* Method to resolve microphone and sample location errors in the two-microphone duct measurement method // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2000. Vol. 108, No. 5. P. 2231-2237.
4. *Федотов Е.С., Кустов О.Ю., Храмов И.В., Пальчиковский В.В.* Сравнительный анализ акустических интерферометров на основе расчетно-экспериментальных исследований образцов звукопоглощающих конструкций // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. 2017. № 48. С. 89-103.
5. *Бакланов В.С., Постнов С.С., Постнова Е.А.* Расчет резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей // *Математическое моделирование*. - 2007. Т 19. № 8. С. 22-30.
6. *Кустов О.Ю.* О влиянии геометрических погрешностей при создании 3D - образцов ЗПК на их акустические характеристики // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 8. С. 21-23.
7. *Fedotov E.S., Kustov O.Yu., Bulbovich R.V.* Determination of end correction of Helmholtz resonator based on numerical simulation // *AIP Conference Proceedings 2027*, edited by V.M. Fomin (American Institute of Physics, Melville, NY, 2018) pp.030092. doi: 10.1063/1.5065186.

05.02.22

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

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

### **ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА ГАЗОТУРБОВОЗОВ В СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО НА ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

*В статье рассматривается модель организации ремонта газотурбовозов, приписанных к эксплуатационным локомотивным депо, а выполняющих ремонт в сервисных локомотивных депо. Используя модель можно создать программный продукт для распределения текущих ремонтов локомотивов между сервисными предприятиями для наилучшей их загрузки.*

Ключевые слова: *железная дорога, полигон, локомотив, газотурбовоз, ремонт, депо, сервис, организация.*

С 2005 г. ОАО «РЖД» организовало работы по созданию локомотива, работающего на сжиженном природном газе. Такой локомотив имеет большую мощность в сравнении с электровозом или тепловозом, он позволяет водить состав массой 6000 т и более [1]. В 2007 г. был выпущен инновационный магистральный газотурбовоз ГТ1h-001, а в 2013 и 2017 гг – второй и третий газотурбовозы (ГТ1h-002 и ГТ1h-003). Из-за со сложной (по сравнению с тепловозом) конструкции, встала задача организовать ремонт ГТ1h. Кроме того, из-за разделений функций эксплуатации газотурбовозов и их ремонтами между разными локомотивными депо (эксплуатационное и сервисное, соответственно). Это требует дополнительной проработки, так как в 2019 году была увеличена программа текущих ремонтов (ТР) в сервисных локомотивных депо (СЛД), что уже в ближайшее время, несомненно, приведет к образованию «очереди» локомотивов, ожидающих ремонт в СЛД [2]. С другой стороны, недостаточная загрузка СЛД приводит к простаиванию ремонтных позиций в ожидании постановки локомотивов на ТР. Все это ведет к росту расходов на техническое обслуживание (ТО) газотурбовозов, так и увеличению затрат на содержание технологического оборудования, предназначенного для выполнения ТР. Значит между различными СЛД необходимо решить проблему наилучшего распределения программы ТР.

Эту задачу можно решить используя теорию массового обслуживания. В этом случае в качестве заявителя на проведение ТР газотурбовозу выступает ТЧЭ, а в качестве исполнителей – СЛД. Однако классическими методами теории марковских процессов оптимизационного решения такой задачи не быть не может, так как может находится как несколько СЛД, так и ТЧЭ, причем каждое из ТЧЭ может отправлять газотурбовозы для проведения ТР в то СЛД, которое выполняет ремонт более качественно. Кроме того, необходимо отметить следующее: временные характеристики процесса подчинены экспоненциальному закону распределения при наличии марковских моделей, что не совсем и не всегда соответствует действительности. В этом случае становится целесообразным создать модель организации ремонта газотурбовозов и провести имитационное моделирование на ПЭВМ, результатом которого будет наилучшее распределение конкретных ТР газотурбовозов между СЛД [3].

Необходимо выбрать алгоритм определения СЛД для ремонта конкретного газотурбовоза, приписанного к конкретному ТЧЭ. Для этого применим генератор псевдослучайных целых чисел в от 0 до 100 с градацией 1, а для каждого ТЧЭ установим доли (см. рис. 1), определяющие возможность отправки газотурбовоза в тот или иное СЛД ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ ).

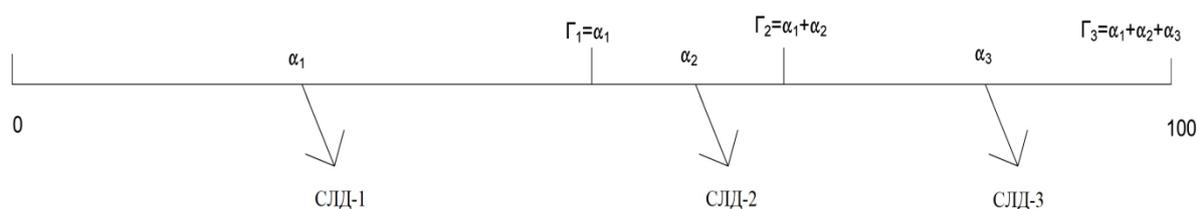


Рис. 1. Выбор СЛД для ремонта газотурбовоза

Сгенерировав на ПЭВМ псевдослучайное число и сравнив его с предельными (граничными значениями  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \dots, \Gamma_N$ ), определим направление отправки газотурбовоза.

Таким образом, решение задачи сведется к определению наилучших значений  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$  для каждого ТЧЭ. С учетом неравномерности движения каждый газотурбовоз в конкретный момент времени  $\tau$  переходит в состояние необходимости проведения ТР. Соответственно отправка ГТ1h в СЛД происходит в порядке достижения локомотива состояний [2]. Используя приведенный выше алгоритм выбора СЛД для проведения ремонта определяется направление отправки ГТ1h. Поступление газотурбовоза в СЛД происходит через фиксированное время  $t$ , величина которого определяется путем деления расстояния между ТЧЭ и СЛД на скорость транспортировки ГТ1h в СЛД и обратно в ТЧЭ. При поступлении газотурбовоза в СЛД возможны два варианта: 1) ремонтные позиции СЛД находятся в ожидании поступления газотурбовоза, т. е. свободны, при этом ТР ГТ1h начинается после транспортировки его в СЛД. В этом случае суммарное время простоя газотурбовоза на ремонтных позициях ( $T_{\Sigma \text{рп}}$ ) увеличится на разницу между временем поступления ГТ1h и временем высвобождения ремонтной позиции от предыдущего газотурбовоза [4]; 2) ремонтные позиции СЛД заняты восстановлением газотурбовоза, поступившего ранее, второй ГТ1h находится в ожидании и, на той из ремонтной позиции, которая освободится раньше, будет производиться выполнение ТР, при этом суммарное время простоя газотурбовоза в ожидании ТР ( $T_{\Sigma \text{ГТ1h}}$ ) увеличится на разницу между временем высвобождения ремонтной позиции и временем поступления ГТ1h [5].

После окончания восстановления работоспособности газотурбовоз передислоцируют в свое ТЧЭ через некоторое фиксированное время  $t$ . По прибытию в ТЧЭ газотурбовоз начинает водить поезда, а при достижении некоторой предельной наработки ГТ1h требует выполнение очередного ТР, а значит процесс повторяется. Алгоритм функционирования рассматриваемой модели рассмотрим на конкретном примере (рис. 2), в котором имеются три ТЧЭ с приписным парком газотурбовозов ( $N_i$ ), два СЛД (СЛД-1 оснащено одной ремонтной позицией, а СЛД-2 – двумя). Для обозначения случайных моментов времени, связанных с событиями, происходящими с газотурбовозами используем следующие обозначения:  $\tau_{A/B-V}$ , где А – номер ТЧЭ, В – номер газотурбовоза, В – номер момента времени; аналогично для событий, связанных с СЛД:  $\theta_{A/B-V}$ , где А – номер СЛД, В – номер ремонтной позиции, В – номер момента времени. Продолжительность транспортировки обозначим  $t_{A/B-V}$ , где А – номер ТЧЭ, В – номер газотурбовоза, В – порядковый номер.

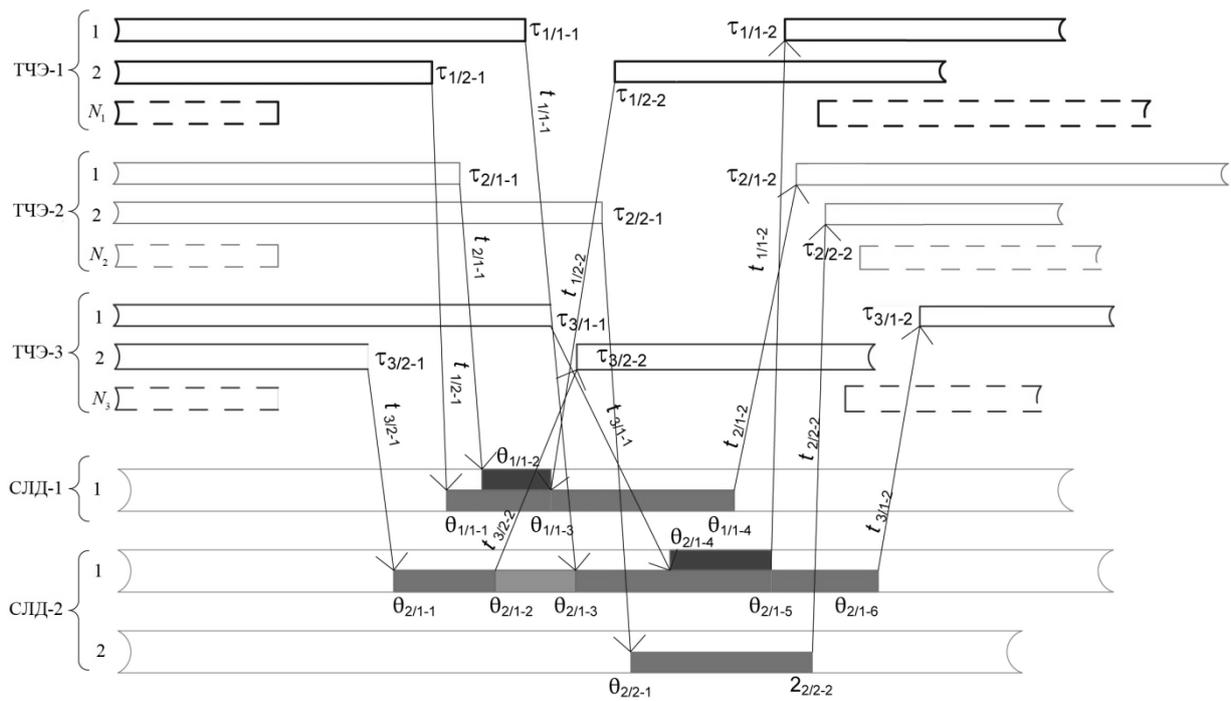
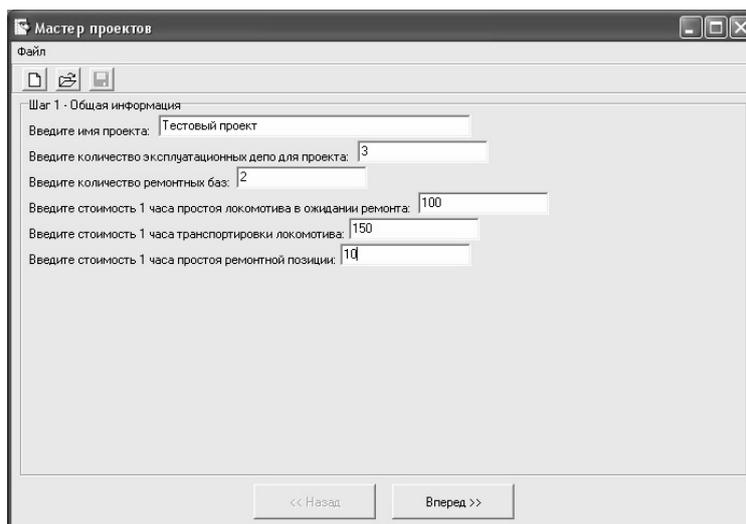


Рис. 2. Пример функционирования модели

Первое событие, которое мы рассматриваем в примере, соответствует второму газотурбовозу из приписного парка ТЧЭ-3 и заключается в необходимости проведения ТР. Случайный момент времени наступления ремонта –  $\tau_{3/2-1}$ . Предположим, что на основании используемого алгоритма выбора СЛД для ремонта этого газотурбовоза, решено ТР выполнить в СЛД-2. С учетом транспортировки, время прибытия в СЛД-2 составит:  $\theta_{2/1-1} + t_{3/2-1}$ . К этому моменту в СЛД-2 не задействованы обе ремонтные позиции (свободны), поэтому ремонт ГТ1h начнется после его постановки на одну из двух ремонтных позиций. Завершение ТР, и соответственно, высвобождение первой ремонтной позиции происходит в момент времени  $\theta_{2/1-2}$ . Прибытие этого газотурбовоза в ТЧЭ происходит в случайный момент времени  $\tau_{3/2-2} = \theta_{2/1-2} + t_{3/2-2}$ . Суммарное время транспортировки составит  $T_{\Sigma\text{тр}} = T_{\Sigma\text{тр}} + (t_{3/2-1} + t_{3/2-2})$ . Для второго газотурбовоза из ТЧЭ-1 требуется выполнить ТР в случайный момент времени  $\tau_{1/2-1}$ . Если было принято решение направить его в СЛД-1, куда он будет транспортирован в момент времени  $\theta_{1/1-1} = \tau_{1/2-1} + t_{1/2-1}$ . В этот момент времени первая ремонтная позиция свободна, соответственно сразу после доставки ГТ1h в СЛД-1 начнется его ТР, который закончится в момент времени  $\theta_{1/1-3}$ . Газотурбовоз будет доставлен в место постоянной дислокации (ТЧЭ) в случайный момент времени  $\tau_{1/2-1} = \theta_{1/1-3} + t_{1/2-2}$ . При этом суммарное время транспортировки составит  $T_{\Sigma\text{тр}} = T_{\Sigma\text{тр}} + (t_{1/2-1} + t_{1/2-2})$ .

Для решения задачи наилучшей загрузки каждого СЛД для выполнения ТР газотурбовозам возможно построение модели с достаточно сложной топологией взаимосвязей между ТЧЭ и СЛД, было принято решение создать для ПЭВМ оболочку, позволяющую произвести описание модели визуализационными средствами. В интегрированной среде разработки ПО для Microsoft Windows (Embarcadero Delphi) создан исполняемый файл NW.exe, запустив который перед пользователем откроется окно программы «Мастер проектов». Ввод информации о характеристиках проекта (модели) осуществляется по шагам с целью исключения ошибочного ввода данных.

На первом шаге (рис. 3) вводится «имя проекта», количество как ТЧЭ, так и СЛД, стоимость 1 часа простоя газотурбовоза при проведении ТР и 1 часа транспортировки ГТ1h, число ремонтных позиций в СЛД.



The screenshot shows a software window titled "Мастер проектов" (Master Projects). It features a menu bar with "Файл" (File) and a toolbar with icons for file operations. The main area is titled "Шаг 1 - Общая информация" (Step 1 - General Information) and contains several input fields with pre-filled values:

- Введите имя проекта: Тестовый проект
- Введите количество эксплуатационных депо для проекта: 3
- Введите количество ремонтных баз: 2
- Введите стоимость 1 часа простоя локомотива в ожидании ремонта: 100
- Введите стоимость 1 часа транспортировки локомотива: 150
- Введите стоимость 1 часа простоя ремонтной позиции: 10

At the bottom of the window, there are two buttons: "<< Назад" (Back) and "Вперед >>" (Next).

Рис. 3. Окно программы «Мастер проектов» для ввода исходных данных

Конечным результатом может быть построение диаграммы удельных затрат на ремонт, для различных вариантов передачи газотурбовозов из ТЧЭ в СЛД. В настоящее время идет апробация модели.

#### **Список литературы**

1. Газотурбовоз магистральный ГТ1h. Руководство по эксплуатации. ГТ1h.00.000.000 РЭ. В 3-х ч. М.: Транспорт, 2015. 244 с.
2. Буйносов А.П., Лаптев С.И., Антропов С.Н. Организация эксплуатации газотурбинных локомотивов // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 8. С. 10-13.
3. Буйносов А.П., Цихалевский И.С., Лаптев С.И. Организация эксплуатации, обслуживания и ремонта газотурбовозов ГТ1h // Вестник УрГУПС. 2018. № 3 (39). С. 41-55.
4. 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.
5. Буйносов А.П., Наговицын В.С., Марулин С.Л. Методология развития систем мониторинга, диагностирования, обслуживания и ремонта подвижного состава // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 11. С. 110-113.

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

05.11.16

**Н.Н. Беспалов канд. техн. наук, Ю.В. Горячкин канд. техн. наук,  
П.М. Дёмкин, К.Ю. Панькин**

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

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ДИОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УДАРНОГО ТОКА

*В статье приведены результаты моделирования электрических и тепловых процессов, протекающих в силовом диоде Д161-200, при воздействии ударного тока. Моделирование проведено в программной среде Multisim. На основании результатов исследования определены необходимые величины параметров аппаратно-программного комплекса для испытания силовых полупроводниковых приборов.*

Ключевые слова: *моделирование, силовой диод, ударный ток, Multisim.*

**Введение.** При производстве силовых полупроводниковых приборов (СПП) одного типа в связи с естественной технологической нестабильностью процесса изготовления наблюдается вариация значений их параметров и характеристик. При этом существует вероятность изготовления дефектных приборов. Методы диагностики СПП весьма затратные и не всегда совершенные. В результате этого в выпускаемой продукции появляются не выявленные при диагностике приборы с дефектами, которые могут быть установлены в электрических преобразователях. Эти СПП являются потенциально ненадежными, соответственно, надёжность преобразователей на их основе также снижается.

В ГОСТ 24461–80 [1] для СПП указаны испытываемые параметры СПП и методы их испытаний. Одним из испытываемых параметров является ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии. Таким током является прямой ток, протекание которого вызывает превышение максимально допустимой температуры перехода, но воздействие которого, предполагается лишь ограниченное количество раз за время гарантийной наработки [2]. Воздействие ударных токов на дефектные приборы, может привести к разрушительным последствиям. В связи с этим, становится актуальным создание специальных современных аппаратно-программных комплексов (АПК) для технической диагностики состояния СПП [3]. В частности, подобные системы рассмотрены в [3, 4].

Для разработки и построения АПК для испытания СПП на ударный ток требуется знать величины электрических параметров СПП в состоянии высокой проводимости (СВП). В частности, это максимальная величина прямого падения напряжения на СПП СВП при ударном токе, которая является определяющей предельной величиной необходимой для оценки технических характеристик АПК. Данная величина также важна для оценки мощности источника импульсного тока АПК.

**Результаты моделирования.** Для реализации задачи оценки вольт-амперных характеристик (ВАХ) СПП и тепловых процессов в них при воздействии ударного тока в СВП нами была использована модель силового диода (СД) в программной среде Multisim. Модель была воспроизведена с учётом реальных физических параметров силового диода Д161-200. Данная модель диода создана на основе физико-математической модели, которая приведена в [5], на основании которой в работе [6] была реализована модель в программной среде Multisim.

Моделирование силового диода Д161-200 при воздействии ударного тока позволило получить семейство ВАХ в прямом направлении изображенное на рис. 1. Форма тока в соответствии с [1] была синусоидальной однополупериодной с длительностью по основанию равной 10 мс.

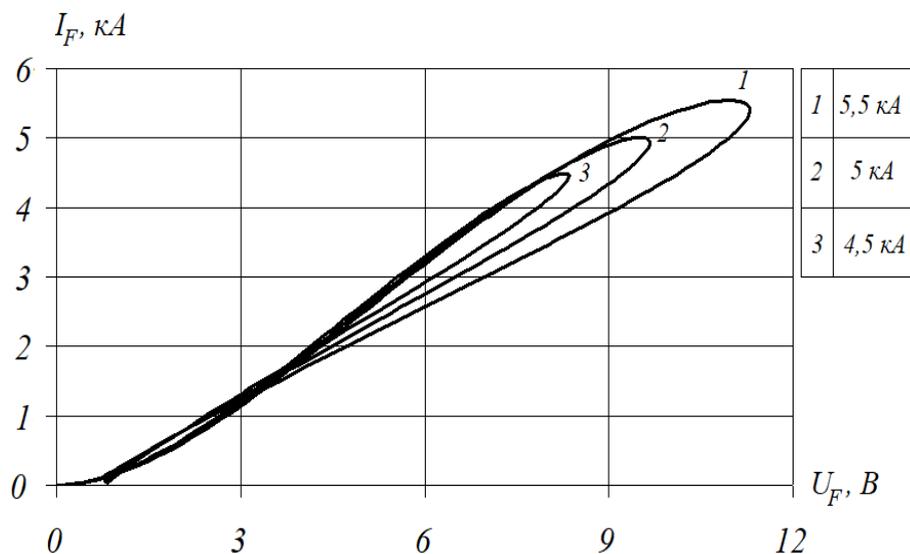


Рис. 1– Семейство ВАХ в прямом направлении силового диода Д161-200

Получение ВАХ силового диода Д161-200 в прямом направлении проводилось при амплитудах тока от 1 кА до 5,5 кА. Значение 5,5 кА соответствует паспортной величине ударного тока диода Д161-200  $I_{FSM} = 5,5$  кА.

Согласно ГОСТ 24461–80 [1] испытание СПП на воздействие ударного тока должны проводиться при предельно допустимой температуре конкретного прибора. Семейство ВАХ СД типа Д161-200 было получено при начальной температуре структуры равной  $T_j = +190$  °С, которая является предельно допустимой для данного прибора. При этом максимальная величина импульсного прямого напряжения  $U_F$  достигает в указанном режиме величины 11,3 В.

Модель СД типа Д161-200 позволяет также получить значения температуры структуры во время протекания через нее прямого тока. На рис. 2 изображены временные зависимости температуры  $T_j$  полупроводниковой структуры моделируемого СД при протекании прямых токов различной величины. Из графиков рис. 2 видно, что максимальное значение температуры  $T_{jm}$  полупроводниковой структуры достигается ко времени 8 мс, а далее наблюдается её спад, вызванный влиянием охлаждающей системы, которая также учтена в рассматриваемой модели.

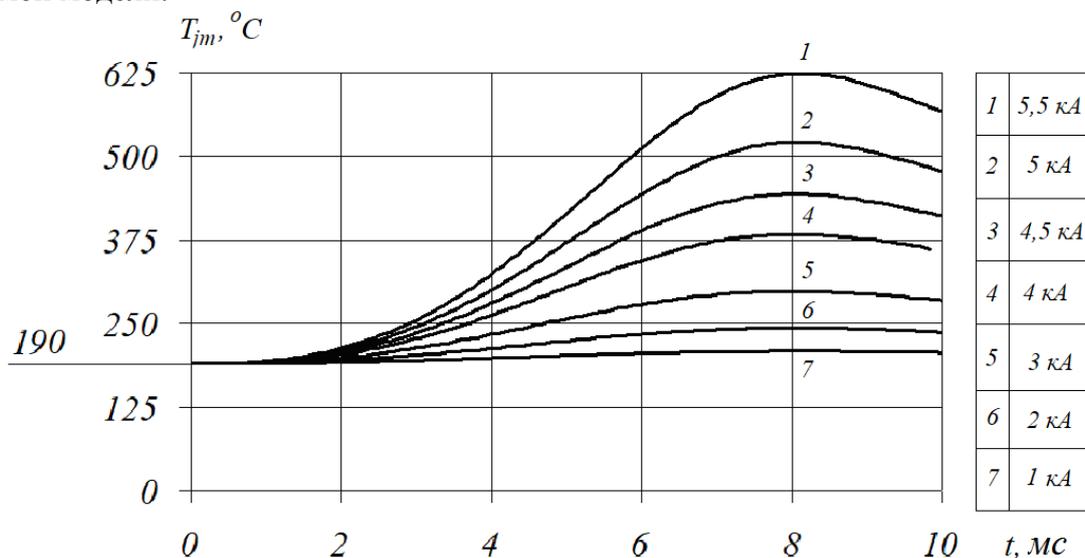


Рис. 2- Температура структуры при воздействии прямых токов различной величины

Полученные данные позволяют построить также график зависимости максимальной температуры структуры  $T_{jm}$  СД от амплитуды протекающего прямого тока. Данный график приведен на рис. 3.

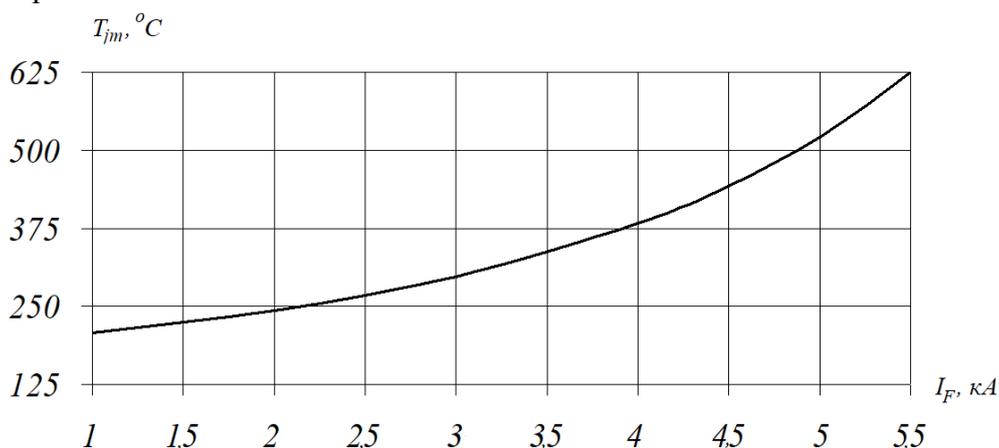


Рис. 3- Зависимость максимальной температуры структуры  $T_{jm}$  от амплитуды прямого тока

Из рис. 3 видно, что при ударном токе равном  $I_{FSM} = 5,5$  кА протекающем через СД Д161-200 температура структуры достигает максимално  $T_{jm} = +625$  °С. В диапазоне температуры от +427 °С до +627 °С в проводимости полупроводника его собственная проводимость начинает преобладать [7], что говорит о повышении вероятности появления эффекта шнурования прямого тока. Это явление может привести к разрушению полупроводниковой структуры СПП.

Полученное в результате моделирования семейство ВАХ в прямом направлении при протекании прямых токов, подобно семейству ВАХ реальных СПП, которое приведено в работе [8]. Это позволяет говорить об адекватности разработанной модели СД Д161-200 в программной среде Multisim.

**Заключение.** На основе разработанной модели можно исследовать электрические и тепловые характеристики практически любого типа СПП при воздействии импульсов прямого тока. Использование этой модели позволяет разработчикам СПП перед их проектированием оценивать величины ударного тока  $I_{FSM}$ . При этом разработчикам АПК для испытания СПП эта информация позволяет объективно оценивать энергетические характеристики проектируемого испытательного устройства, а также диапазон измерения импульсного прямого напряжения  $U_F$ .

Данные результаты моделирования используются при разработке нового аппаратно-программного комплекса, предназначенного для испытания современных СПП в состоянии высокой проводимости, измерения и определения их параметров и характеристик.

**Список литературы**

1. ГОСТ 24461–80. Приборы полупроводниковые силовые. Методы измерений и испытания.
2. *Чебовский, О.Г.* Испытания силовых полупроводниковых приборов / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 200 с.
3. *Беспалов Н.Н.* Диагностика и контроль параметров силовых полупроводниковых приборов / Н.Н. Беспалов, А.В. Мускатиньев, М.В. Ильин // *Электроника и информационные технологии.* – 2007. – № 1–2. – С. 35. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2007-1/archive/index.html>.
4. *Беспалов Н.Н.* Управляемый генератор импульсов напряжения устройства для испытания силовых тиристоров в состоянии высокой проводимости / Н.Н. Беспалов, А.В. Мускатиньев, П.М. Дёмкин // *Научно-технический вестник Поволжья.* №5, Казань, 2018, – С. 119. – 121.
5. *Дерменжи П.Г.* Расчёт силовых полупроводниковых приборов / Дерменжи П.Г., Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н. Под ред. В.А. Кузьмина –М.: Энергия 1980. – 184 с.
6. *Беспалов Н.Н.* Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде MULTISIM / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, С.В. Лебедев // *Электроника и электрооборудование транспорта.* 2012, №4. – С. 30-35.
7. *Демаков Ю.П.* Лекции по физическим основам электроники : учебное пособие / Ю.П. Демаков. – Ижевск. : Издательство ИжГТУ, 1997. – 288 с.
8. *Мартыненко В.А.* Исследования статических и динамических ВАХ мощных тиристоров в проводящем состоянии / В.А. Мартыненко, В.В. Сорокин, А.А. Хапугин, Г.Д. Чумаков // *Электроника и информационные технологии.* – 2009. – № 3. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fetmag.mrsu.ru/2009-3/index.htm>.

05.11.13

Н.Н. Беспалов канд. техн. наук, Ю.В. Горячкин канд. техн. наук,  
К.Ю. Панькин, П.М. Дёмкин

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

### МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСХЕМ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕХОД-КОРПУС

*Определение теплового сопротивления переход-корпус микросхем с относительно высокой точностью позволяет оценивать тепловой режим микросхемы при эксплуатации. В статье приведены результаты моделирования электрических и тепловых процессов в специализированной микросхеме 124КТ1 при испытании по стандартной методике определения теплового сопротивления. Результаты исследования получены на основе моделирования в программной среде Synopsys TCAD. Показано, что для достижения погрешности определения  $R_{Т,ПК}$  не более 3% требуется обеспечение подачи импульсов измерительного тока после окончания импульсов греющего тока через время задержки  $t_{зд}$  не более 2 мкс.*

Ключевые слова: теплое сопротивление, микросхема, транзистор,  $p-n$  переход, термочувствительный параметр, время задержки, моделирование, температура.

**Введение.** Одним из важнейших параметров микросхем является теплое сопротивление переход-корпус  $R_{Т,ПК}$ , по величине которого можно судить о качестве их изготовления. Микросхемы с различными значениями  $R_{Т,ПК}$  в одинаковых условиях эксплуатации имеют разные тепловые перегревы полупроводниковых кристаллов, что влияет на их надёжность. ОСТ 11 0944-96 [1] устанавливает три основных метода определения  $R_{Т,ПК}$  микросхем. В статье рассмотрен один из них – это метод определения  $R_{Т,ПК}$  с контролем температуры кристалла по термочувствительному параметру (ТЧП). Цель статьи заключается в оценке режимов работы проектируемого испытательного аппаратно-программного комплекса (ИАПК) для определения  $R_{Т,ПК}$  различных микросхем. В качестве объекта исследования была выбрана специализированная микросхема 124КТ1. Оценка некоторых важнейших технических характеристик, которые должен обеспечивать ИАПК, проводилась на основе моделирования тепловых и электрических процессов в программной среде Synopsys TCAD.

**Разработка модели кристалла в среде TCAD.** В программной среде Synopsys TCAD была разработана модель кристалла микросхемы 124КТ1 [2], которая представляет собой два биполярных  $p-n-p$  транзистора, соединенных между собой коллекторами. В качестве ТЧП для измерения температуры кристалла микросхемы 124КТ1 используется прямое напряжение  $p-n$  переходов коллектор-база транзисторов этой микросхемы.

Разработка модели кристалла осуществлялась в программе Structure Editor [3]. На рисунке 1 показан общий вид модели кристалла микросхемы с основанием корпуса.

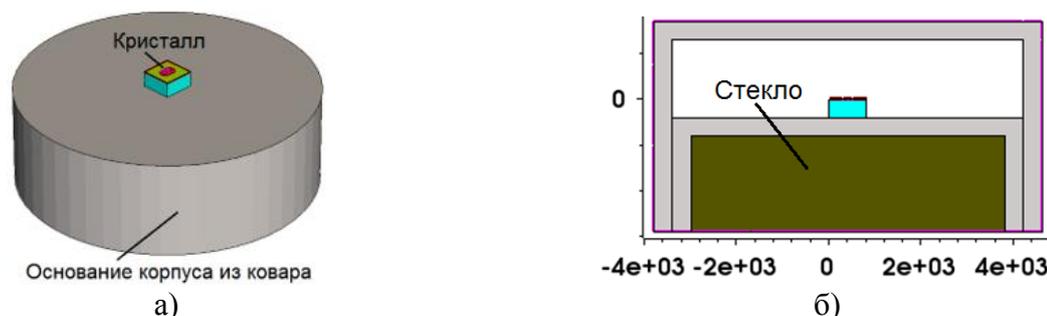


Рис. 1 – Общий вид модели кристалла микросхемы с основанием корпуса (а), вид структуры в сечении (б)

Разработанная модель учитывает эффекты высокого уровня инжекции, влияние концентрации легирующей примеси на электрофизические параметры полупроводниковой структуры и эффекты, связанные с неоднородным по объему тепловым разогревом структуры под действием протекающих токов. Подробное описание этих эффектов приведено в [4].

**Принцип и условия проведения измерения.** В соответствии с методикой [1] на транзисторы микросхемы 124КТ1 подается последовательность импульсов квазипрямоугольного тока, состоящая из импульсов греющего тока и импульсов измерительного тока, следующих после каждого импульса греющего тока. Во время прохождения каждого из импульсов измеряется падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база транзисторов микросхемы.

На рисунке 2 представлены временные диаграммы импульсов греющих и измерительных токов, падений напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база транзисторов микросхемы и изменение температуры корпуса микросхемы.

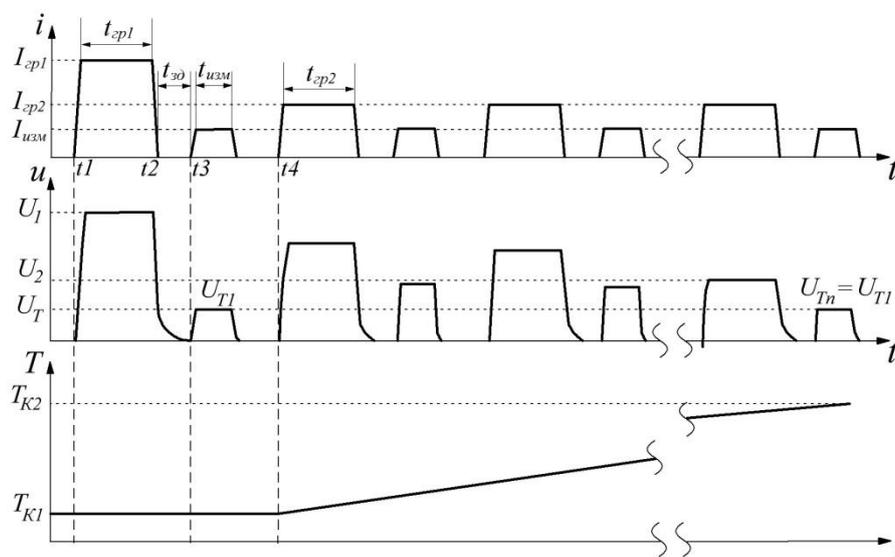


Рис. 2 – Временные диаграммы

Импульсы греющего тока состоят из первого мощного импульса греющего тока  $I_{sp1}$  (интервал времени  $t1-t2$ ) и из последовательности маломощных импульсов греющего тока  $I_{sp2}$  (с момента времени  $t4$ ). Длительность импульсов греющего тока  $t_{sp1} = t_{sp2} = 5$  с. Амплитуда  $I_{sp1} = 100$  мА,  $I_{sp2} = 3$  мА. После каждого импульса греющего тока следует импульс измерительного тока  $I_{izm}$  с амплитудой 1 мА. Время задержки  $t_{3d}$  следования импульсов измерительного тока после окончания каждого импульса греющего тока выбирается из рекомендованного в ОСТ 11 0944-96 [1] диапазона значений от 2 до 200 мкс. Во время прохождения первого импульса с амплитудой  $I_{sp1}$  измеряется падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база  $U_1$ . С помощью импульсов  $I_{izm}$  измеряется падение напряжения на  $p-n$  переходе коллектор-база  $U_T$ .

Для определения начального значения температуры корпуса  $T_{K1}$  согласно [1] определяется температурный коэффициент напряжения (ТКН)  $K_T$  и приращение температуры корпуса  $\Delta T$ . При токе  $I_{izm} = 1$  мА ТКН для микросхемы 124КТ1 равен 2 мВ/С. Рекомендуемое минимальное значения приращение ТЧП  $\Delta U_{TMIN} = 10$  мВ [1]. Повышенная температура корпуса по ТУ  $T_{КПОВ} = 125$  °С, тогда приращение температуры корпуса  $\Delta T = 5$  °С и  $T_{K1} = 120$  °С.

Начиная с момента времени  $t4$ , повышают температуру корпуса микросхемы до повышенной рабочей температуры, добиваясь возврата  $U_T$  к первоначальному значению ( $U_{Tn} = U_{T1}$ ). При этом температура корпуса микросхемы  $T_K = T_{K2}$ . Для определения оптимального времени задержки  $t_{3d}$  было проведено моделирование электрических и тепловых процессов, происходящих в микросхеме при испытаниях.

**Результаты моделирования.** Моделирование проводилось с помощью программы SDevisе [5]. Получен график изменения максимальной температуры кристалла  $T_{KPmax}$  во времени, который приведён на рисунке 3.

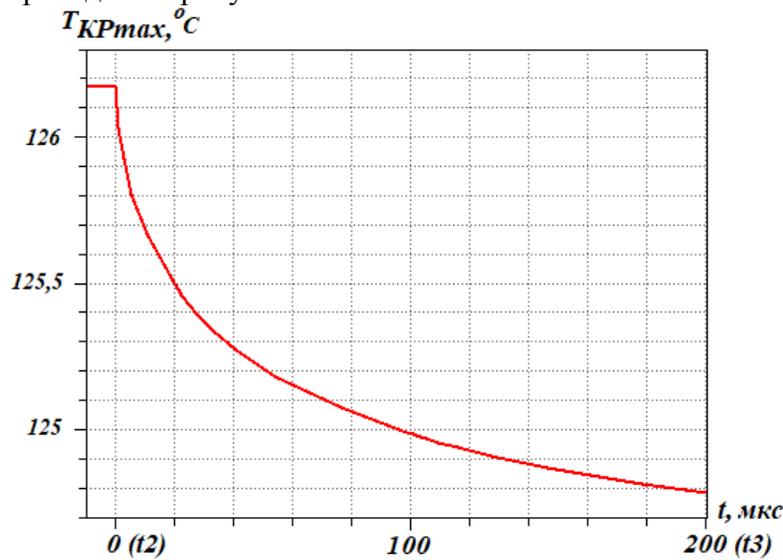


Рис. 3 – График изменения максимальной температуры кристалла во времени

Из графика видно, что максимальная температура в момент окончания импульса  $I_{cp1}$  достигает значения  $T_{KPmax} = 126,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и затем она достаточно быстро уменьшается, особенно на первых микросекундах. Интервал времени с  $t_2$  до  $t_3$  соответствует времени задержки  $t_{30}$  (см. рис. 2).

**Обработка результатов моделирования.** По результатам проведенного моделирования было рассчитано значение мощности во время прохождения импульса  $I_{cp1}$ , которое составило  $P_1 = 94,2\text{ мВт}$  и значение мощности во время прохождения импульса  $I_{cp2}$ , которое составило  $P_2 = 1,5\text{ мВт}$ . На основании полученных результатов согласно ОСТ 11 0944-96 [1] по формуле:

$$R_{T,ПК} = \frac{T_{K2} - T_{K1}}{P_1 - P_2},$$

было определено тепловое сопротивление переход-корпус микросхемы 124КТ1 при различных значениях времени задержки  $t_{30}$ .

Проведен расчет одной из важнейших составляющих относительной погрешности теплового сопротивления  $\delta$  в зависимости от  $t_{30}$  по формуле:

$$\delta = \frac{|R_{T,ПК} - R_{T,ПКД}|}{R_{T,ПКД}} \cdot 100\%,$$

где  $R_{T,ПКД}$  — действительное значение теплового сопротивления переход-корпус. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 — Результаты моделирования

$t_{30},$ мкс	$T_{KP} = T_{K2},$ $^{\circ}\text{C}$	$R_{T,ПК},$ $\text{Bm}/^{\circ}\text{C}$	$\delta,$ %
0	126,1	68,0	0
2	125,9	65,7	3,3
3	125,9	65,1	4,2
4	125,8	64,6	4,9
5	125,8	64,3	5,6
10	125,6	62,5	8,0
50	125,2	57,3	15,6
200	124,7	52,6	22,5

Как видно из таблицы, с увеличением  $t_{3\delta}$  полученные при расчете значения  $R_{Т,ПК}$  уменьшаются и погрешность  $\delta$ , соответственно, возрастает. Связано это с тем, что, как было видно из зависимости на рисунке 3, с увеличением времени задержки температура  $T_{К2}$  уменьшается, что и приводит к возрастанию погрешности  $\delta$ .

**Заключение.** В результате проведенных исследований на модели специализированной микросхемы 124КТ1 в установившемся режиме по стандартной методике было определено  $R_{Т,ПК}$  переход-корпус кристалла согласно ОСТ 11 0944-96.

Моделируя электрические и тепловые процессы специализированной микросхемы было установлено, что для снижения одной из важнейшей составляющей погрешности определения  $R_{Т,ПК}$  требуется обеспечить время задержки подачи измерительных импульсов тока после окончания греющих импульсов  $t_{3\delta}$  не более 2 мкс.

Результаты работы будут использованы при разработке аппаратно-программного комплекса для определения  $R_{Т,ПК}$  различных микросхем.

#### **Список литературы**

1. ОСТ 11 0944-96. Микросхемы интегральные и полупроводниковые приборы. Методы расчеты, измерения и контроля теплового сопротивления. М. : ГУП НПП Пульсар, 1997. – 110 с.
2. 124КТ1А,Б. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://orbita.su/catalog/item/124kt1a-b-78>.
3. Structure Editor. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/structure-editor.html>.
4. Горячкин Ю. В. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD. / Ю.В. Горячкин, С.А. Нестеров, Б.П. Сурин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. – 124 с.
5. Sentaurus Device. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.synopsys.com/silicon/tcad/device-simulation/sentaurus-device.html>.

05.11.01

**Н.Н. Беспалов канд. техн. наук, А.В. Евишев, Д.С. Кондрашин**

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

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ**

*В статье приведены некоторые результаты исследования электрических режимов испытания силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости в испытательной цепи и измерения их параметров на основе моделирования в программной среде Multisim. Исследования проводились для выбора предельных значений параметров высоковольтного генератора испытательных сигналов аппаратно-программного комплекса для испытания силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости. Моделировалась испытательная цепь с силовым диодом с диаметром кристалла равным 100 мм. Исследованы электрические характеристики этой цепи при различных значениях температуры полупроводниковой структуры силового диода и сопротивления токоизмерительного шунта. Получены обоснованные величины параметров испытательной цепи.*

Ключевые слова: генератор испытательных высоковольтных сигналов, состояние низкой проводимости, силовой диод, токовый шунт, аппаратно–программный комплекс.

При производстве силовых полупроводниковых приборов (СПП) при их серийном изготовлении ввиду естественной нестабильности технологического процесса наблюдается разброс значений электрических параметров их характеристик в состоянии низкой проводимости (СНП). Предприятия изготовители СПП, следуя ГОСТ 24461-80, осуществляют только контроль предельных значений, в частности, например для силовых диодов (СД), повторяющегося импульсного обратного тока  $I_{RRM}$  при повторяющемся импульсном обратном напряжении  $U_{RRM}$ . При этом дополнительно иные индивидуальные характеристики приборов не проверяются. В процессе эксплуатации СПП существенно изменяют свои характеристики, что приводит к их деградации и отказам. Для обеспечения надёжной работы СПП в устройствах силовой электроники требуется их индивидуальный подбор по предельным электрическим параметрам. Для этого требуется разработка высокоточного и высокопроизводительного аппаратно–программного комплекса (АПК), который способен осуществлять такие измерения, хранить результаты, а также по специальной программе проводить диагностику по параметрам критериям качества и осуществлять подбор приборов для использования при групповом соединении в электрических преобразователях.

АПК, к разработке которого мы приступили, должен отвечать требованиям, указанным в ГОСТ 24461-80. Высоковольтный генератор АПК должен создавать высоковольтные силовые импульсные сигналы специальной формы на СПП в СНП, осуществлять измерение и определение их параметров и характеристик.

Для обоснования выбора предельных значений параметров испытательной цепи АПК при испытании СПП в СНП проведено моделирование этой цепи с СД. При моделировании использовалась ранее разработанная модель электрических и тепловых процессов в СПП в СНП на базе программной среды Multisim [1], которая реализована на основе электрофизических процессов в СПП в СНП [2].

В качестве объекта исследования была выбрана испытательная цепь с моделью СД типа Д373-1250 в СНП. Схема моделирования показана на рис. 1(а), где ГИ – генератор испытательных высоковольтных импульсов напряжения полусинусоидальной формы. Моделирование осуществлялось при однократном воздействии на испытуемый диод (ИД) импульса обратного напряжения  $u_{ген}$  полусинусоидальной формы с амплитудой  $U_{генМ} = 10$  кВ и длительностью 10 мс (рис. 1(б)). Использовалась модель ИД со следующими параметрами: диаметр полупроводниковой структуры (ПС) 100 мм, время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_p = 20$  мкс. Моделирование осуществлялась при значениях температуры ПС  $T_j = +20^\circ\text{C}$ ;  $+80^\circ\text{C}$  и  $+125 \pm 5^\circ\text{C}$ . В АПК, для измерения тока в СНП, используется токоизмерительный шунт  $R_S$ , от величины сопротивления которого зависит точность задания испытательного сигнала на ИП и измерения параметров. Значения сопротивления  $R_S$  выбирались из ряда: 100 Ом, 1 кОм и 10 кОм.

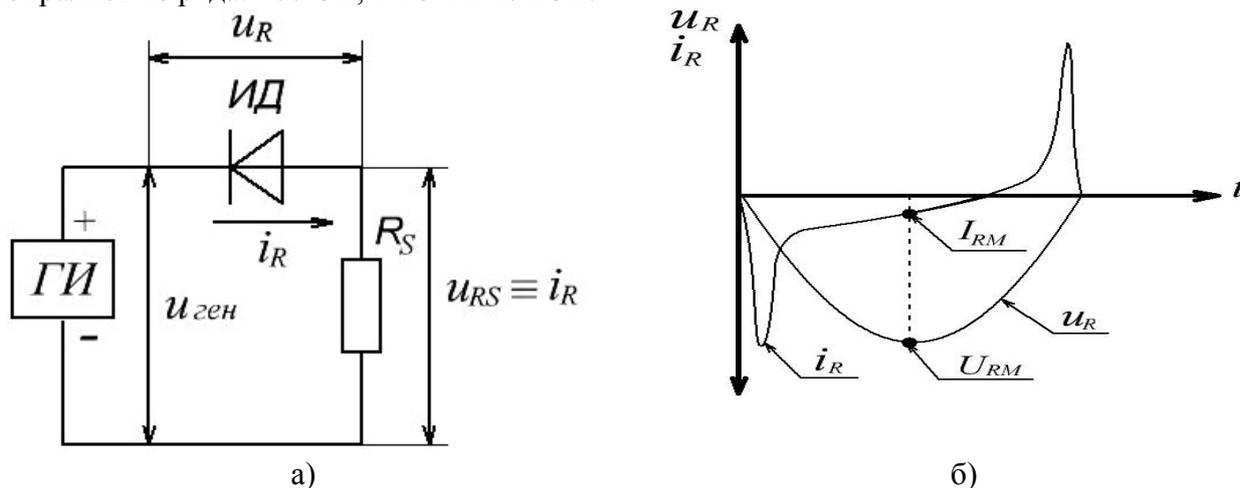


Рис. 1 - Схема включения ИД в СНП (а) и временные графики испытательного обратного напряжения и обратного тока через ИД (б)

В работах [3, 4] исследованы временные диаграммы испытательного импульса напряжения, и тока протекающего через СПП в СНП, которые показаны на рис. 1 (б), где:  $i_R$  – обратный ток;  $u_R$  – обратное напряжение;  $I_{RM}$  – амплитудное значение обратного импульсного тока;  $U_{RM}$  – амплитудное значение обратного импульсного напряжения. Величина обратного тока  $i_R$ , протекающего через нагрузку СПП определяется суммой реактивной составляющей обратного тока  $i_{R_C}$  и активной составляющей обратного тока  $i_{R_A}$ :

$$i_R = i_{R_C} + i_{R_A} \quad (1)$$

На рис. 2 – 4 представлены графики вольт-амперных характеристик СПП в СНП с учётом обратного тока  $i_R$ , построенные на основе результатов моделирования испытательной схемы, при различных значениях  $T_j$ .

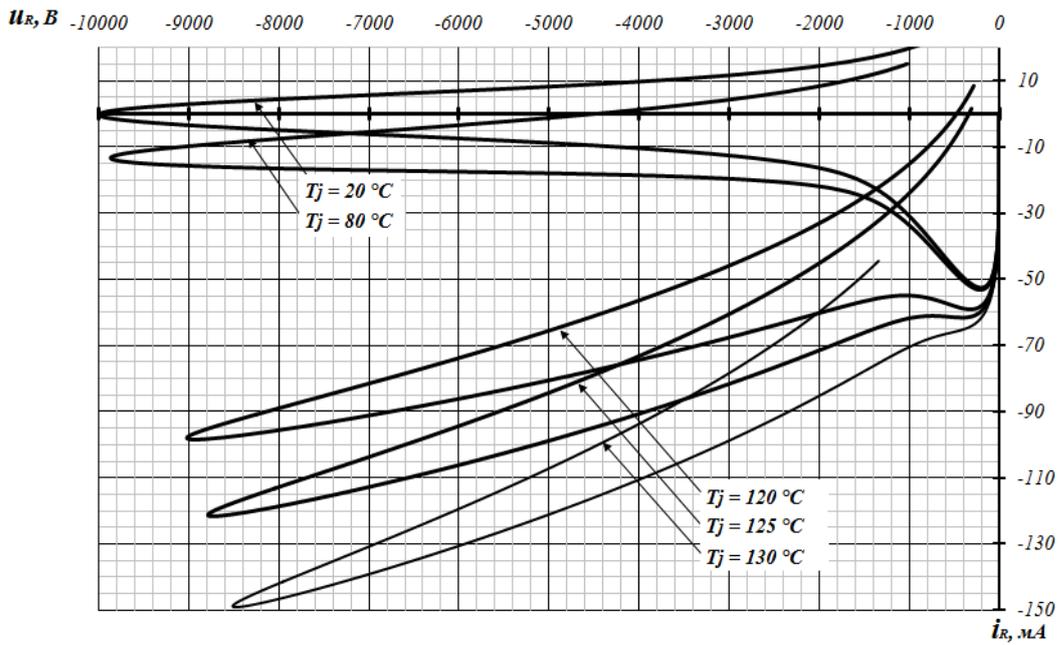


Рис. 2 - ВАХ СД, при  $R_S = 10$  кОм и  $T_j = +20$  °C;  $+80$  °C;  $+125 \pm 5$  °C

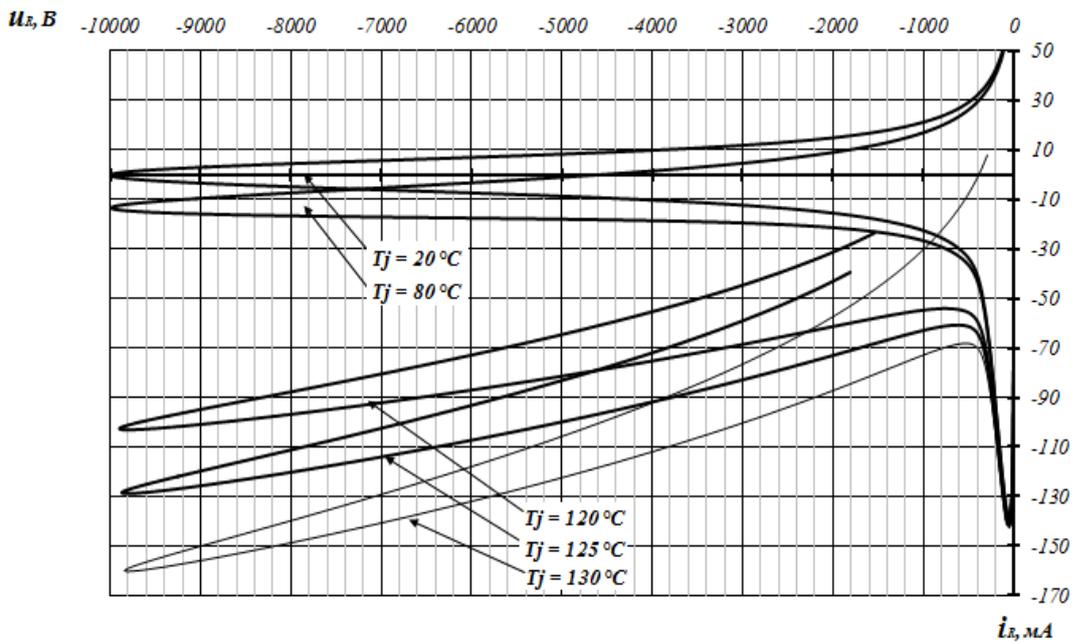
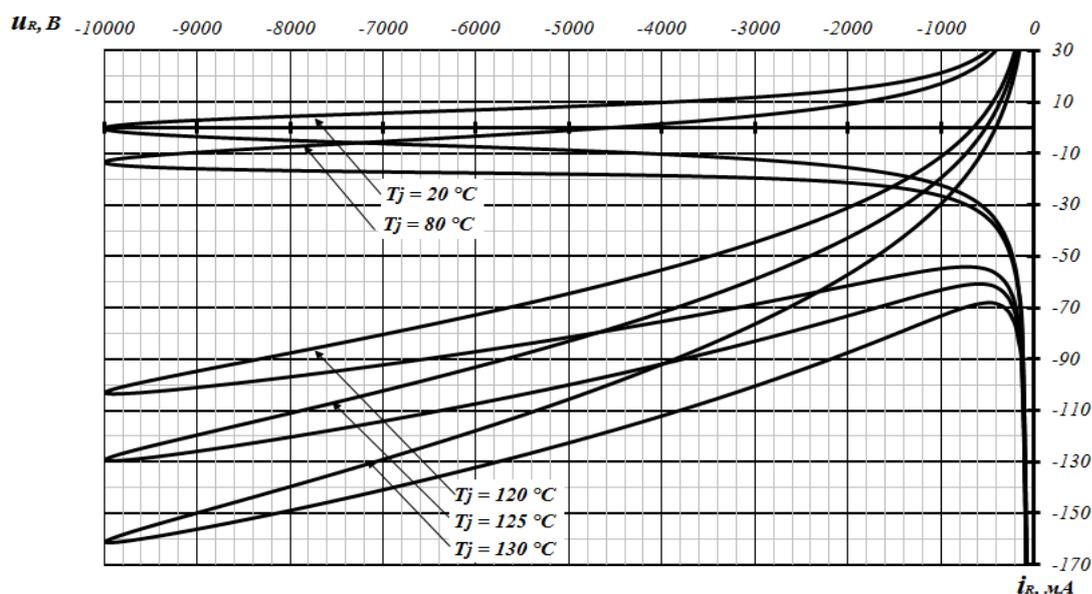


Рис. 3 - ВАХ СД, при  $R_S = 1$  кОм и  $T_j = +20$  °C;  $+80$  °C;  $+125 \pm 5$  °C

Из рис. 2 – 4 видно, что с уменьшением сопротивления токоизмерительного шунта  $R_S$  от 10 кОм до 100 Ом, при одинаковых значениях температуры  $T_j$  ПС, амплитудные значения падений напряжений  $U_{RM}$  на СД увеличиваются и приближаются заданной амплитуде испытательного напряжения  $U_{генМ}$ .

Рис. 4 - ВАХ СД, при  $R_S = 100$  Ом и  $T_j = +20$  °C;  $+80$  °C;  $+125 \pm 5$  °C

Результаты обработки экспериментальных данных приведены в таблице №1, где  $\delta_U$  – погрешность установки амплитуды испытательного напряжения на СД (2) и пиковая мощность генератора испытательных сигналов  $P_{генМ}$  (3) рассчитаны по формулам:

$$\delta_U = \frac{|U_{RM} - U_{генМ}|}{U_{генМ}} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_{генМ} = U_{генМ} \times I_{RM} \quad (3)$$

Таблица 1 – Результаты обработки экспериментальных данных

$R_S$ , кОм	$T_j$ , °C	$I_{RM}$ , мА	$U_{RM}$ , В	$U_{RSM}$ , В	$\delta_U$ , %	$P_{генМ}$ , Вт
10	20	0,25	9997	2,5	0,03	2,5
	80	13,6	9857	136	1,43	136
	120	97,8	9018	978	9,81	978
	125	121	8786	1213	12,14	1213
	130	149	8475	1490	15,25	1490
1	20	0,2	1000	0,2	0,0022	2,2
	80	13,4	9987	13,4	0,13	133
	120	102,9	9868	103	1,32	1029
	125	128,8	9829	128,6	1,71	1288
	130	160	9839	160,1	1,61	1600
0,1	20	0,5	9990	0,052	0,09	5,2
	80	13,7	9986	1,4	0,14	137
	120	98,4	9979	10,3	0,2	983
	125	129,3	9986	12,9	0,13	1292
	130	161	9983	16,1	0,16	1611

Из таблицы 1 видно, что с увеличением температуры  $T_j$  (до  $+130$  °C) ПС и с увеличением сопротивления токоизмерительного шунта (до 10 кОм), погрешность  $\delta_U$  резко возрастает на два порядка по сравнению со значениями при сопротивлении токоизмерительного шунта  $R_S = 100$  Ом.

На основании полученных результатов моделирования процессов в силовой испытательной цепи с СПП в СНП при различной температуре  $T_j$  ПС ясно, что для создания высокоточного АПК от его высоковольтного силового генератора требуется обеспечение пиковой мощности не менее 2 кВт в импульсе. При этом для минимизации погрешности установки амплитудных значений напряжения на испытуемом СПП и для обеспечения относительно малых значений падений напряжений на шунте  $U_{RSM}$  до 15 В требуется, чтобы сопротивление токоизмерительного шунта выбиралось с величиной  $R_S \leq 100$  Ом.

#### Список литературы

1. Беспалов Н.Н. Разработка и исследование электротепловых моделей силовых полупроводниковых приборов основных типовых конструкций / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, С.В. Лебедев // Естественные и технические науки. – М. : Спутник+, 2011. – Вып. №6. – С. 405–412.
2. Дерменжи П.Г. Расчет силовых полупроводниковых приборов / П.Г. Дерменжи, В.А. Кузьмин, Н.Н. Крюкова, В.И. Мамонов. Под ред. В.А. Кузьмина. М. : Энергия, 1980. – 184 с.
3. Беспалов Н.Н. Моделирование процессов в силовых полупроводниковых приборах при их групповом последовательном включении в среде Multisim / Н.Н. Беспалов, М.В. Ильин, С.С. Капитонов, С.В. Лебедев // Электроника и электрооборудование транспорта. – Томилино: Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод», 2012. – Вып. № 4. – С. 30–35.
4. Беспалов Н.Н. Выявление информативного параметра для определения потенциально ненадежного полупроводникового прибора в групповой последовательной цепи преобразователя / Н.Н. Беспалов, С.С. Капитонов, М.В. Ильин, А.В. Евишев, А.В. Зорькин // Научно-технический вестник Поволжья выпуск № 2. Казань – 2017. – С. 43–46.

05.11.13

<sup>1</sup>М.П. Данилаев д-р техн. наук, <sup>1</sup>Н.В. Дорогов, <sup>1</sup>Ф.А. Карамов д-р техн. наук,  
<sup>1,2</sup>В.А. Куклин канд. физ.-мат. наук, <sup>1</sup>А.В. Пушкарева

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет (КАИ),  
<sup>2</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА, ФОРМИРУЮЩЕГО НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДВУХФАЗНЫЙ ГАЗОВЫЙ ПОТОК С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ СУБМИКРОННОГО РАЗМЕРА**

*В работе предложен метод создания двухфазного газового потока с твердыми частицами субмикронного размера. Исследования характеристик на экспериментальной установке, показали возможность создания газового потока с практически неизменяющейся скоростью ( $1 \div 3$  м/с) и с регулируемым расходом субмикронных частиц в широком диапазоне  $1 \div 40$  мг/с.*

Ключевые слова: *низкоскоростной двухфазный газовый поток, субмикронные частицы, расход частиц.*

#### **Введение**

Многофазные газовые потоки (далее МФП) нашли широкое применение в различных разделах науки и производства: это процессы химических технологий, изготовление лекарственных препаратов, капсулирование субмикронных частиц и пр. [1-8]. При этом используются различные механизмы формирования многофазных потоков: импульсный или взрывной за счет энергии высокоэнергетических материалов; эжектирование в поток газа или жидкости дисперсных частиц; электростатическое распыление и ускорение и др.

Большая часть известных методов позволяет получить МФП, в которых нижнее значение скорости потока существенно превышает уровень  $10 \div 15$  м/с, что усложняет его использование в технологических процессах. Кроме того расход дисперсных частиц, как правило, пропорционален скорости потока и раздельное управление этими параметрами невозможно.

В технологии капсулирования субмикронных частиц полимером [5], требуются низкоскоростные МФП со скоростями не более  $\sim 1$  м/с при заданном расходе дисперсных частиц. Увеличение скорости потока приводит к росту потерь капсулированных частиц при их осаждении [9]. Уменьшение скорости потока при использовании известных методов формирования МФП приводит к уменьшению расхода дисперсных частиц, что существенно снижает толщину создаваемой полимерной оболочки на их поверхностях [8,9].

Целью данной работы является создание и исследование параметров устройства формирования низкоскоростного ( $\sim 1$  м/с) двухфазного газового потока (ДФП) дисперсных твердых частиц.

#### **Схема установки и результаты экспериментов.**

Структурная схема устройства формирования газового ДФП, приведена на рис.1. На рис.1 приняты следующие обозначения: 1 – вентилятор; 2 – динамик; 3 – низкочастотный генератор; 4 – блок питания; 5 – порошкообразные частицы; 6 – выходное отверстие; 7 – пылевое облако.

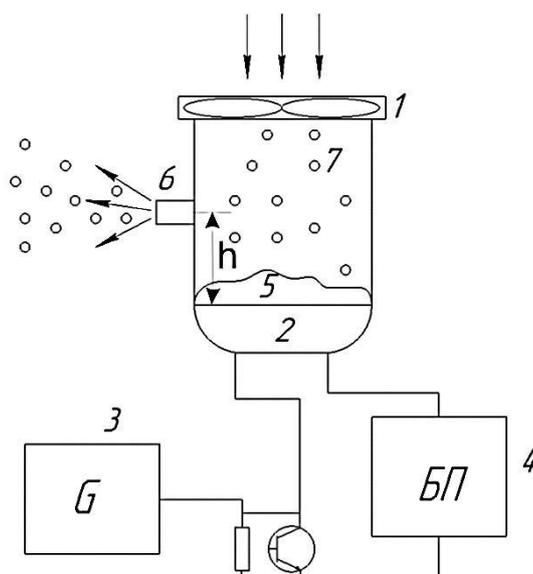


Рис. 1- Структурная схема устройства формирования газового ДФП и оптимизация расположения выходного отверстия

Принцип работы устройства (рис.1) заключается в следующем. При колебании мембраны динамика 2, на которую помещают порошок дисперсных частиц 5, в замкнутом объеме камеры устройства создается пылевое облако 7. В установке использован динамик 10ГД-30Б с диапазоном частот до 5000 Гц при неравномерности АЧХ не хуже 14 дБ. Воздушный поток от вентилятора 1 создает в этой камере незначительное избыточное давление, за счет чего формируется газовый поток через входное отверстие 6, находящееся на высоте  $h$  от уровня мембраны. Экспериментально установлено, что при  $h = 25$  мм наблюдается максимум расхода дисперсных частиц. Частицы на выходе камеры заряжаются в униполярном коронном разряде, что обеспечивает диспергирование агломератов в выходном двухфазном потоке [5,9]. При таком способе формирования двухфазного потока его скорость и расход частиц будут в основном определяться амплитудой ( $A$ ) и частотой ( $f$ ) колебания мембраны, создающей пылевое облако. Изменяя  $A$  и  $f$  возможно регулировать расход дисперсных частиц на выходе устройства (рис.1).

В работе использовались частицы различных типов и размеров: частицы органических порошков (мука) с характерным размером частиц до 40 мкм; частицы неорганических веществ: - корунда  $Al_2O_3$  (средний размер частиц  $\sim 1$  мкм) и оксида цинка  $ZnO$  (средний размер частиц  $\sim 190$  нм).

Для исследования частотной характеристики распылителя использовались наиболее крупные и тяжелые частицы (мука). На рис. 2 приведены зависимости расхода частиц от частоты  $f$  колебаний мембраны, при различных значениях массы порошка, загруженного в камеру распылителя 1 – 50г; 2 – 75г; 3 – 100г.

Резкий спад расхода частиц в ДФП при частотах выше 40Гц связан с резонансной характеристикой камеры. При работе на частоте близкой к частоте резонанса динамика, равной  $32 \pm 8$  Гц, амплитуда колебаний мембраны достигает значения достаточного для создания пылевого облака с максимальной плотностью дисперсных частиц в камере распылителя. Зависимость рис. 2б показывает, что при выборе продолжительности работы необходимо следить за загрузкой камеры распылителя для обеспечения требуемой стабильности расхода частиц.

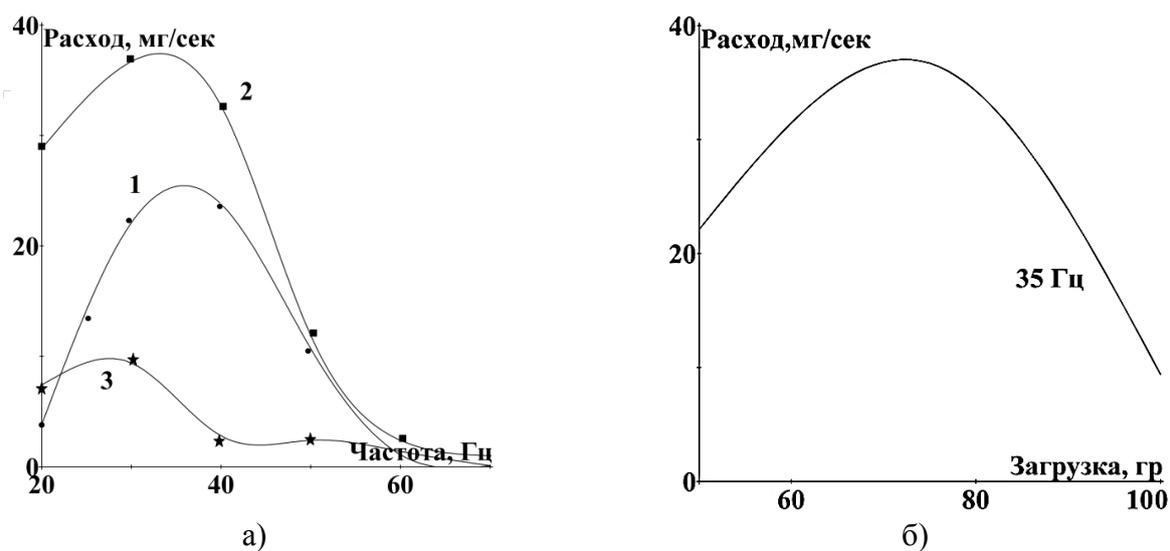


Рис.2- Частотная характеристика распылителя частиц

На рис.3 приведены результаты измерений расхода для различных частиц 1- ZnO, 2-  $Al_2O_3$ , 3 –мука;  $h=25$ мм.

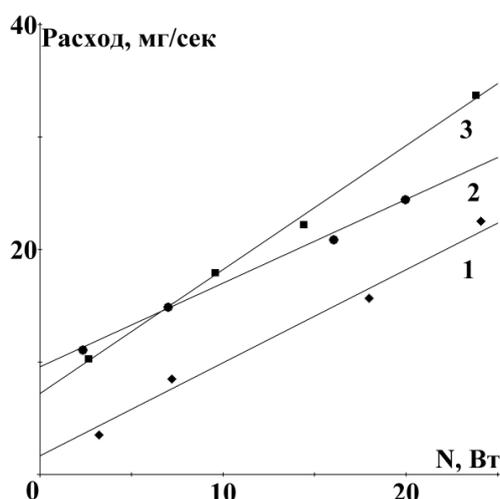


Рис. 3- Расходные характеристики для некоторых частиц субмикронного размера

Все экспериментальные расходные характеристики в пределах точности определения массы частиц, осажденных из потока, хорошо аппроксимируются линейной зависимостью от электрической мощности  $N$ , подводимой к динамике. Это позволяет использовать этот технологический параметр устройства для управления расходом частиц.

Для оценки диапазона скорости ДФП, создаваемого с использованием предлагаемого метода, были проведены измерения средней скорости и распределения частиц поперек потока. Результаты измерений при распылении крупнодисперсных частиц представлены на рис.4, показывают слабую зависимость скорости газового потока от мощности  $N$ . Средняя скорость потока измерялась с помощью чашечного измерителя МС-13 (погрешность  $\pm 0.35$  м/с) на расстоянии 200мм от выходного отверстия 6 распылителя.

Распределение частиц в плоскости, перпендикулярной потоку, оценивалось по прозрачности клейкой ленты, которая устанавливалась поперек потока на расстоянии 200 мм, где мощность  $N$  равна: 1 - 2.5 Вт; 2 – 14.4 Вт; 3 – 21 Вт; 4 – 36 Вт. Прозрачность пленки определялась оптическим методом по изменению интенсивности светового потока, падающего на пленку. Следует отметить, что количество частиц  $n$ , оставшихся в клеевом слое пленки в данной точке пропорционально количеству частиц, скорость которых превысила пороговую, необходимую для проникновения в клеевой слой.

Количество частиц крупнодисперсного порошка в нижней части от оси потока несколько выше, чем в вверх от оси, что объясняется отклонением крупных частиц под действием силы тяжести. Для мелкодисперсных частиц ZnO и  $Al_2O_3$  такой асимметрии не наблюдалось.

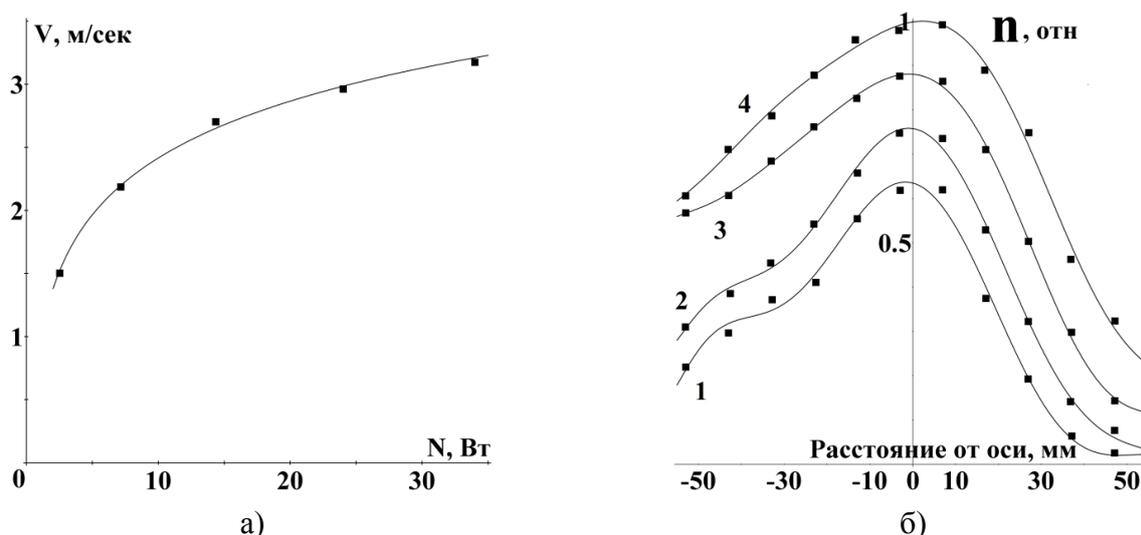


Рис.4- Измерение скоростных характеристик двухфазного потока

а) – средняя скорость воздушного потока; б) – распределение количества частиц поперек потока («-» вниз от оси)

### Заключение.

Таким образом, экспериментальные исследования показали возможность создания низкоскоростных газовых потоков с твердыми частицами различной природы с использованием предлагаемого метода распыления частиц субмикронного размера. Показано, что управляя амплитудой колебания мембраны можно в диапазоне ( $1 \div 40$  мг/с) изменять расход частиц без существенного изменения скорости воздушного потока ( $1 \div 3$  м/с).

*Работа выполнена при поддержке гранта российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 18-48-160024).*

### Список литературы

1. Муравлев Е.В., Павленко А.А., Ахмадеев И.Р., Кудряшова О.Б., Степкина М.Ю., Коровина Н.В. Исследование процессов диспергирования компактированных порошков // Ползуновский вестник, 2016, том 1, № 4, - стр.64-67.
2. Ворожцов Б.И., Кудряшова О.Б., Муравлев Е.В. Экспериментальное моделирование взрывного диспергирования жидкости и порошков // Известия вузов: Физика. – 2008. – Т. 51, № 8/2, – стр. 115–121.
3. Платонов И.А., Колесниченко И.Н., Новикова Е.А., Муханова И.М. Получение газовых смесей известного состава динамическими методами // Сорбционные и хроматографические процессы, 2017, том 17, № 3, - стр. 378-387.
4. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыления жидкостей / Процесс и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химия, 1984, 256 с.
5. Данилаев М.П., Богомолова О.Ю., Богослов Е.А., Михайлов С.А., Польский Ю.Е., Пашин Д.М. Формирование полимерных покрытий на поверхности субмикронных частиц // Российские нанотехнологии, 2014, том 9, вып. 11-12, - стр. 41-52.
6. Семкин Н.Д., Пиявков А.В., Погодин А.П. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях // Прикладная физика, 2008, № 4, - стр.153-163.
7. Семкин Н.Д., Пиявков А.В., Видманов А.С., Телегин А.М. Зарядка твердых микрочастиц в камере инжектора электростатического ускорителя // Приборы и техника эксперимента, 2017, № 1,- стр.148-153.
8. Данилаев М.П., Михайлов С.А., Польский Ю.Е., Файзуллин К.В. Сопоставительный анализ камер смешения двух многофазных потоков противоположно заряженных части // Известия вузов Авиационная техника, 2012, №2, стр.67-71.
9. Богомолова О.Ю., Данилаев М.П. Параметры течения многофазных газовых потоков в задаче капсулирования субмикронных частиц полимером// Научно-технический вестник Поволжья. 2016. № 3. С. 25-27.

05.11.13

**А.В. Мускатыньев канд. техн. наук, П.П. Балясов**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарева,  
институт электроники и светотехники,  
кафедра электроники и наноэлектроники,  
Саранск, muskatav@mail.ru

### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА В НАПРЯЖЕНИЕ

В статье рассматривается принципиальная схема устройства, применение которой позволяет расширить динамический диапазон измерения длительности импульсов в области малых значений. Приводятся результаты моделирования и оценивается температурная стабильность преобразователя.

Ключевые слова: тиристор, время задержки включения, микроконтроллер, измерение, температурная стабильность.

Для подбора силовых тиристоров в последовательные цепи преобразователей по параметрам включения, к которым относятся время включения  $t_{gt}$  и время задержки включения  $t_{gd}$  [1-3], применяют специальную диагностическую аппаратуру. Значения указанных параметров располагаются в диапазоне от (0,5 – 20) мкс. Наибольшая погрешность измерения, которая может существенно превышать рекомендованную (1 – 2)%, наблюдается при измерении параметра  $t_{gd}$ , величина которого лежит в нижнем диапазоне указанного временного интервала и составляет (0,5 – 2) мкс. Если в качестве управляющего модуля диагностической аппаратуры использовать широко применяемый 8-разрядный микроконтроллер типа AVR фирмы Atmel с тактовой частотой 16 МГц, то погрешность измерения  $t_{gd}$  в области минимальных значений достигает более 16 %, что является недопустимым.

Решением указанной проблемы может быть использование схемы расширения малых временных интервалов до уровней, при которых обеспечивается заданная погрешность измерения. Вариант принципиальной схемы такого устройства показан на рис. 1.

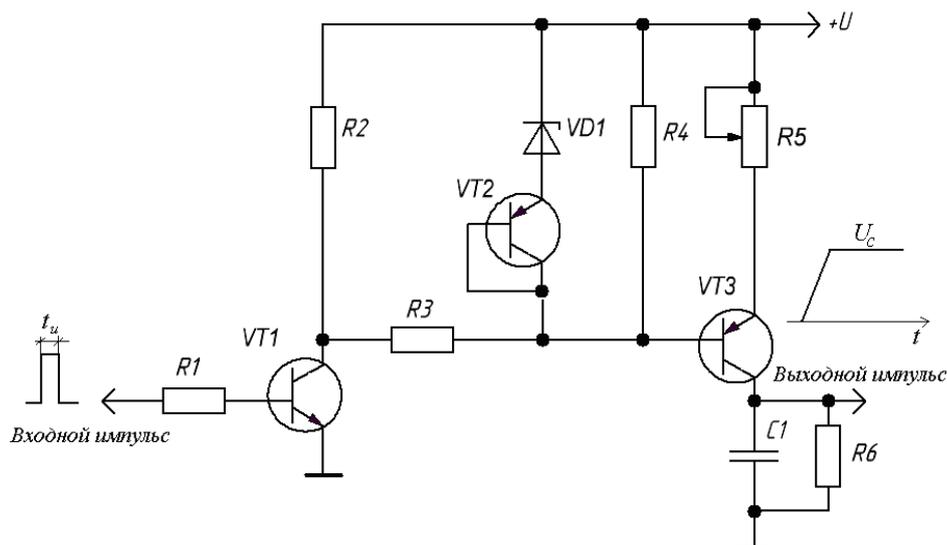


Рис. 1 – Принципиальная схема преобразователя время – напряжение

Короткий входной импульс, длительность которого  $t_u$  необходимо измерить, через ключ  $VT1$  управляет транзистором  $VT3$ , который совместно с элементами  $VT2$ ,  $VD1$ ,  $R5$  выполняет функции источника тока, формирующего импульс тока постоянной амплитуды. Амплитуда импульса тока  $I_m$  может быть определена по формуле:

$$I_M = U_{cm} / R5, \tag{1}$$

где  $U_{cm}$  – напряжение на стабилитроне  $VD1$ .

За время действия импульса тока конденсатор  $C1$  заряжается до напряжения  $U_c$ , равного:

$$U_c = (I_M / C1) * t_H. \tag{2}$$

С учетом (1) окончательно можно записать:

$$t_H = (U_c * R5 * C1) / U_{cm} = U_c * K, \tag{3}$$

где  $K = R5 * C1 / U_{cm}$  – постоянный коэффициент с размерностью [время / напряжение].

Напряжение  $U_c$  измеряется встроенным в микроконтроллер АЦП, и если величину коэффициента  $K$  выбрать равной  $10^M$ , где  $M$  – целое число, то искомое значение длительности импульса  $t_H$  наиболее просто формируется из двоичного кода результата АЦП и выводится с заданной погрешностью на индикатор. Таким образом схема, представленная на рисунке 1, является преобразователем временного интервала  $t_H$  в напряжение. Резистор  $R6$  предназначен для естественного разряда конденсатора  $C1$  для подготовки схемы к следующему измерению. При его выборе необходимо, чтобы постоянная времени  $\tau = R5 * C1$  была много больше времени преобразования используемого АЦП.

Предложенная схема имеет минимальное количество активных элементов, за счет чего обладает высоким быстродействием. Однако, при ее проектировании следует решить вопрос температурной стабилизации преобразователя, которая может оказаться недостаточно высокой. Основные способы для достижения этой цели можно сформулировать следующим образом. Во-первых, стабилитрон  $VD1$  выбирается прецизионным, а его напряжение должно быть максимально возможным, при котором транзистор  $VT3$  остается в активном режиме при максимальном напряжении на конденсаторе  $C1$ . Подходящими элементами для этого являются отечественные типа  $KC166B$ ,  $KC191P.Ф$ , или управляемый стабилитрон  $TL431$ , обладающий достаточной температурной стабильностью. Во-вторых, необходимо компенсировать температурное смещение входной характеристики транзистора  $VT3$ . Для этого можно использовать компенсирующие диоды в его базовой цепи или аналог транзистора  $VT3$  в диодном включении, как показано на рисунке 1 в виде элемента  $VT2$ .

Оценка температурной стабильности преобразователя была проведена на схеме (рис. 2) в среде Multisim. Схема собрана с использованием составных транзисторов, прототипов отечественным ( $KT972$ ,  $KT973$ ).

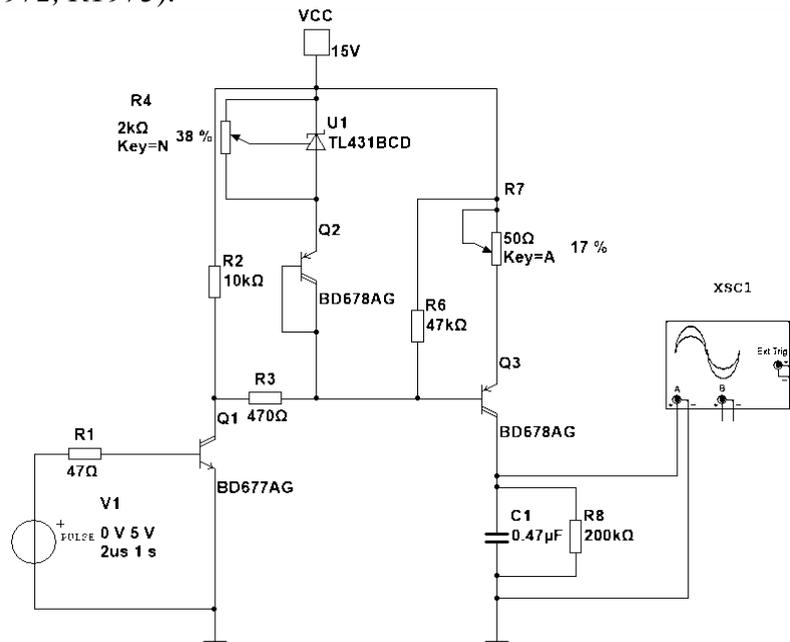


Рис. 2 – Схема преобразователя для исследования температурной стабильности в среде схемотехнического моделирования Multisim

Использовались входные импульсы напряжения длительностью (0,2–2) мкс положительной полярности, и по их окончании, с помощью осциллографа XSC1 измерялось напряжение на конденсаторе  $C1$  в диапазоне температур от 10 до 70 °С с интервалом 10 °С. На рис. 3 представлены зависимости отклонения в процентах номинального напряжения  $U_{ном}$  (при 20 °С) на конденсаторе  $C1$  от температуры, то есть  $(\Delta U/U_{ном})100\% = f(T^{\circ}\text{C})$ . Для сравнительного анализа дополнительно приведены графики для различных термостабилизирующих элементов: двух и трех последовательно включенных диодов и без использования элементов термостабилизации. Из диаграмм видно, что наибольший эффект дает применение транзистора в диодном включении или трех последовательно включенных диодов.

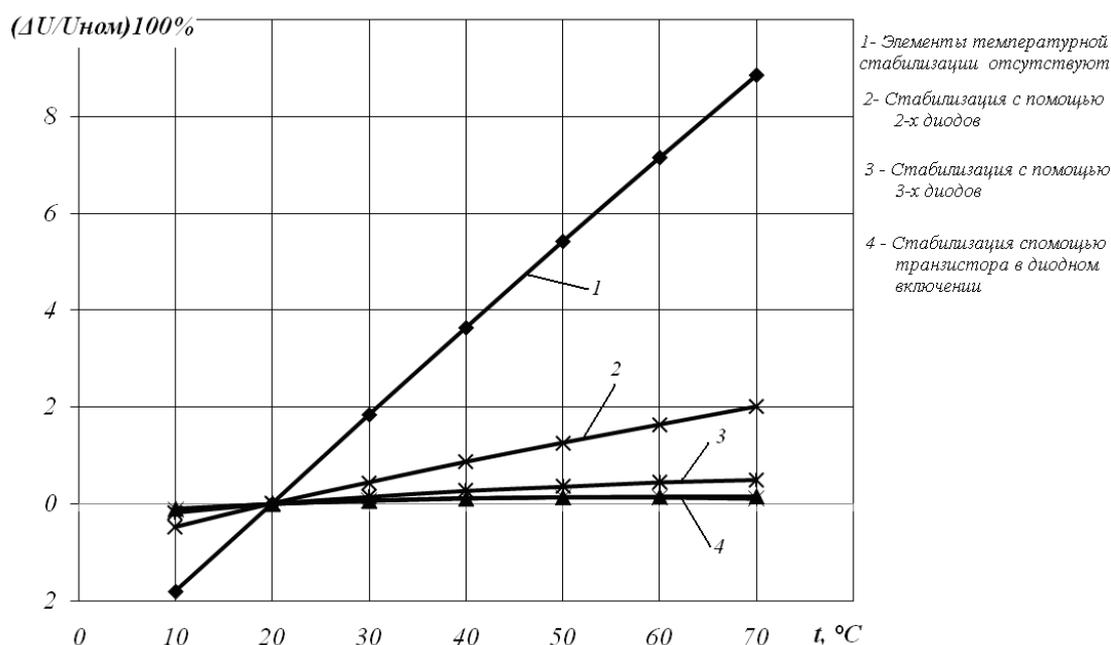


Рис. 3 – Зависимости отклонения (%) номинального напряжения  $U_{ном}$  (при 20 °С) на конденсаторе  $C1$  от температуры при использовании различных элементов термостабилизации

На рис. 4 показана характеристика преобразователя, которая имеет явно выраженный линейный характер.

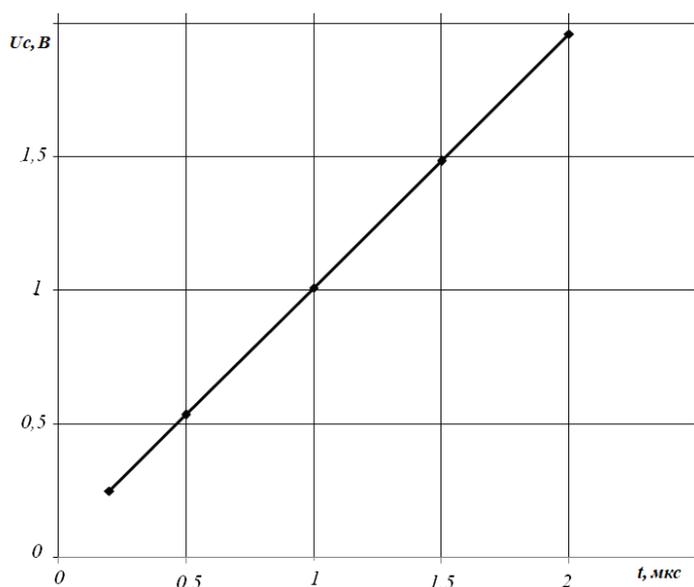


Рис. 4 – Передаточная характеристика преобразователя

Разработанная схема термостабилизированного преобразователя длительности импульса в напряжение позволяет проводить измерение малых интервалов времени с помощью встроенного в 8-разрядный микроконтроллер АЦП с достаточной степенью точности. Это позволяет упростить построение диагностической аппаратуры для измерения параметров включения силовых тиристоров с целью их подбора в последовательные цепи преобразователей энергии.

#### **Список литературы**

1. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошивин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985, – 400 с.
2. Балясов П.П., Мускатиньев А.В. Исследование процессов включения силовых тиристоров в высоковольтных преобразователях. // В сборнике: XLVI Огаревские чтения. Материалы научной конференции; в 3-х частях. – Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (Саранск), 2018. с. 46-53
3. Балясов П.П., Мускатиньев А.В. Особенности эксплуатации силовых тиристоров в последовательных цепях мощных преобразователей. Огарев Online №13 (118), 2018 – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://journal.mrsu.ru/wp-content/uploads/2018/07/muskatinev-statya.pdf>

05.11.00

**И.В. Нелин канд. техн. наук, М.К. Седанкин канд. техн. наук,  
С.Г. Веснин канд. техн. наук, В.А. Скуратов, С.Д. Мерцалов**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
кафедра 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование»,  
Москва, kaf-44-3@yandex.ru,  
ФГБУ «ГНИИЦ РТ» МО РФ, Москва, msedankin@yandex.ru,  
ООО «РТМ Диагностика», Москва,  
Каф. биокибернетических систем и технологий РТУ – МИРЭА, Москва,  
ООО «Фирма РЭС», Москва

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОЧКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ**

*Проведено математическое моделирование теплообменных процессов для слоистой модели, содержащей нагретую почку. Математическое моделирование выполнено на основе численного решения уравнения тепломассопереноса с помощью метода конечных элементов. Получена аппроксимирующая функция для температурного распределения. Использование полученных закономерностей позволит решать задачи радиотермометрии, связанные с разработкой новой медицинской техники.*

*Ключевые слова: микроволновая радиотермометрия, радиотермометр, радиояркостьная температура, медицинская робототехника, пузырьно-мочеточниковый рефлюкс.*

Температура является важным показателем каких-либо патологических изменений в организме человека. Важной медицинской проблемой является пузырьно-мочеточниковый рефлюкс (далее ПМР) – заболевание, при котором происходит обратный нефизиологический заброс содержимого мочевого пузыря в мочеточники и почки. ПМР диагностируется у 1 % детей и при поздней диагностике может приводить к различным заболеваниям и далее к почечной недостаточности. Традиционно для выявления ПМР применяются рентгенологические и радионуклидные методы, в большей степени коррелирующие с клиническими проявлениями ПМР [1]. В работах [2,3] в качестве альтернативного метода предложена методика выявления ПМР. С помощью микроволновой радиотермометрии (далее МР) неинвазивно измеряется радиояркостьная температура (далее РТ) почки, нагретой посредством чрезкожного СВЧ-прогрева содержимого мочевого пузыря. Если у пациента есть ПМР, то произойдет обратный отток предварительно нагретой урины из мочевого пузыря, что приведет к повышению температуры внутри почки выше исходной условной нормы (37 °С). Проводя мониторинг температуры почки с помощью МР, можно зарегистрировать повышение температуры и тем самым определить наличие ПМР. Как показано в работе [4], при импульсном режиме нагрева содержимого мочевого пузыря с использованием антенной решетки, урина нагревается значительно быстрее, чем окружающие ее ткани. Такой режим нагрева позволяет повысить температуру урины до 44 °С при поддержании температуры окружающих тканей в пределе <38°С в течение 20 мин, что является комфортным для пациента и не приводит к термическим повреждениям тканей. В настоящей работе была поставлена задача расчета распределения температуры многослойной структуры участка тела, содержащего нагретую почку для решения задач МР. Сегодня МР используется в маммологии для выделения пациентов группы риска рака молочной железы и для мониторинга эффективности проводимого лечения доброкачественных заболеваний [5], для измерения температуры головного мозга [6], для выявления воспаленных атеросклеротических бляшек [7] и других областях [8-9].

### Материалы и методы

Мощность шумов на выходе антенны пропорциональна РТ, которая представляет собой термодинамическую температуру, усредненную в объеме биологических тканей, расположенных непосредственно под антенной.

$$P = kT_{rad}\Delta f \quad (1)$$

где  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/°К – константа Больцмана;  $\Delta f$  – полоса частот радиотермометра, ГГц.

При согласовании антенны с биологическими тканями РТ, измеряемая прибором, определяется следующим соотношением:

$$T_{rad} = \int_{-\infty}^{\infty} T(r)W(r)dV \quad (2)$$

где  $T(r)$  – термодинамическая температура биологических тканей,  $W(r)$  – радиометрическая весовая функция.

$$W(r) = \frac{\frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sigma(r)}{2}|E(r)|^2 dV} \quad (3)$$

где  $E(r)$  – напряжённость электрического поля, создаваемого антенной в объеме и  $\sigma(r)$  – электропроводность биологических тканей.

Усреднение РТ в объеме биологических тканей происходит с учётом радиометрической весовой функции  $W(r)$  антенны, которая рассчитывается на основе электрического поля, создаваемого антенной. Таким образом, для того чтобы оценить насколько увеличится РТ, необходимо рассчитать электрическое поле приемной антенны и распределение термодинамической температуры  $T(r)$  внутри участка тела с почкой. Расчёт электрического поля антенны и другие особенности проектирования представлены в работе [8]. С целью расчёта  $T(r)$  проведено математическое моделирование участка тела, содержащего почку. Тепловая модель участка тела с почкой (рис.1) представляет собой структуру в виде многослойного параллелепипеда и с почкой в виде двухслойного эллипсоида. Теплофизические параметры слоёв представлены в табл.1. Геометрические параметры модели подобраны таким образом, чтобы общий объём и размеры почки соответствовали среднестатистическим размерам и объёму почек у детей в возрасте 4 лет ( $H_M = 101$  мм,  $H_F = 7$  мм,  $H_S = 2$  мм,  $H_K = 40$  мм). Объём почки и почечной лоханки: 75 мл и 25 мл соответственно. Модель создана на основе реальных КТ-сканов ребенка в возрасте 4 лет [3]. Для расчёта повышения температуры  $\Delta T(r)$ , которое создает ПМР на проекции почки, численно решалось уравнение тепломассопереноса (4) методом конечных элементов (FEM). Используемая математическая модель имеет следующие допущения: теплообмен между биологическими тканями и кровью происходит только в капиллярном русле; теплообмен между крупными сосудами и окружающими тканями не учитывается; нет анизотропии в капиллярном кровотоке; все слои биологической ткани изотропны; конвекция между слоями биологических тканей не учитывается, теплообмен происходит только посредством теплопроводности; геометрия почки задана как эллипсоид, хотя в действительности её форма может отличаться от эллипсоида.

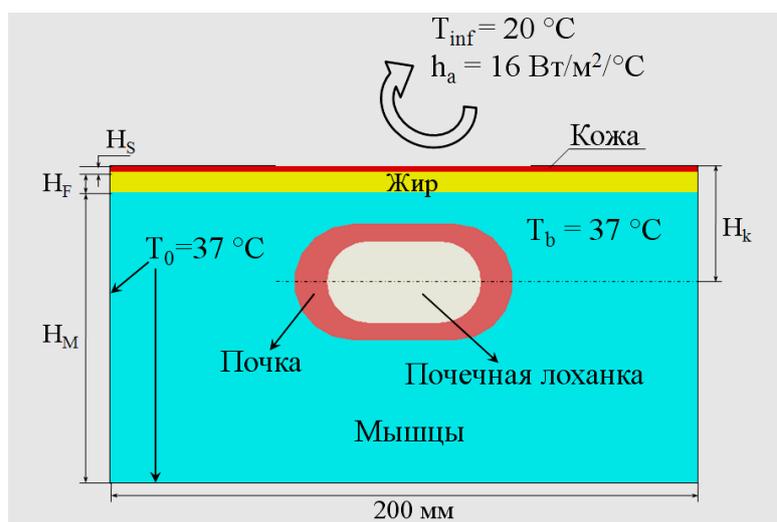


Рис. 1. Тепловая модель участка тела с почкой:  $H_M = 101$  мм;  $H_F = 7$  мм;  $H_S = 2$  мм;  $H_K = 40$  мм

$$\nabla \cdot k \nabla T + Q_{met} - \rho_b c_b \omega_b (T - T_b) = 0 \quad (4)$$

где  $T$  – термодинамическая температура [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $k$  – теплопроводность ткани [ $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ],  $Q_{met}$  – удельное тепловыделение [ $\text{Вт}/\text{м}^3$ ],  $T_b$  – температура артериальной крови [ $^{\circ}\text{C}$ ],  $\omega_b$  – объёмная перфузия крови в данной ткани [ $\text{м}^3(\text{крови})/\text{с}\cdot\text{м}^3(\text{ткани})$ ],  $c_b = 3825$  – удельная теплоёмкость крови [ $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ];  $\rho_b = 1050$  – плотность крови, [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ].

Температура артериальной крови и тканей принята равной  $37^{\circ}\text{C}$ . На границах модели (кроме верхней плоскости кожи) задано условие Дирихле ( $T_0 = 37^{\circ}\text{C}$ ). На поверхности кожи задано условие теплообмена:

$$k \nabla T \times \vec{r} + h_a (T - T_{inf}) = 0 \quad (5)$$

где  $h_a = 16$  [ $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ ] – коэффициент теплообмена,  $T_{inf} = 20$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – температура окружающей среды.

Таблица 1. Теплофизические параметры биологических тканей

Теплофизические параметры	Кожа	Жировой слой	Мышцы	Почка	Урина
Удельное тепловыделение, $Q_{met}$ [ $\text{Вт}/\text{м}^3$ ]	1600	700	1000	1000	-
Объёмная перфузия крови, $\omega_b$ , [1/с]	$2.17 \times 10^{-3}$	$4.76 \times 10^{-4}$	$1.43 \times 10^{-3}$	$1.62 \times 10^{-2}$	-
Теплопроводность, $k$ [ $\text{Вт}/\text{м}\cdot^{\circ}\text{C}$ ]	0.32	0.21	0.56	0.55	0.6
Плотность $\rho$ , [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ]	1040	888	1050	1060	1000
Удельная теплоёмкость $C_p$ , [ $\text{Дж}/\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}$ ]	3400	2387	3639	3600	4200

При расчетах использовались теплофизические параметры [8,10,11], представленные в табл. 1. На рис.2 представлено распределение температур модели при 2 значениях температуры урины, заполняющей почку:  $37^{\circ}\text{C}$  и  $42^{\circ}\text{C}$ . Для расчёта термоасимметрии необходимо определить распределение температур в участке тела с почкой при нормальном значении температуры урины в почечной лоханке и повышенной. Результаты расчета приведены на рис.2. Термоасимметрия  $\Delta T$  представляет собой разность распределений температуры внутри участка тела с почкой при нагретой урине ( $T_{42}$ ) и при нормальной температуре урины ( $T_{37}$ ) в почечной лоханке:

$$\Delta T = T_{42} - T_{37} \quad (6)$$

Подставляя полученное распределение температур в формулу (2), получаем повышение РТ нагретой почки. Тепловая модель при повышенной температуре урины имитирует ситуацию, когда происходит ретроградной отток урины, нагретой в мочевом пузыре. Для

расчета  $\Delta T_{rad}$  согласно (2), необходимо провести аппроксимацию полученной термоасимметрии.

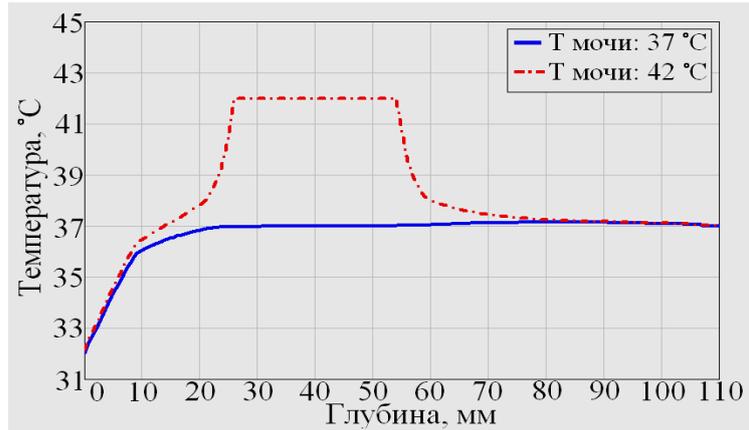


Рис.2. Распределение температур внутри участка тела, содержащего почку при двух значениях температуры урины в почечной лоханке

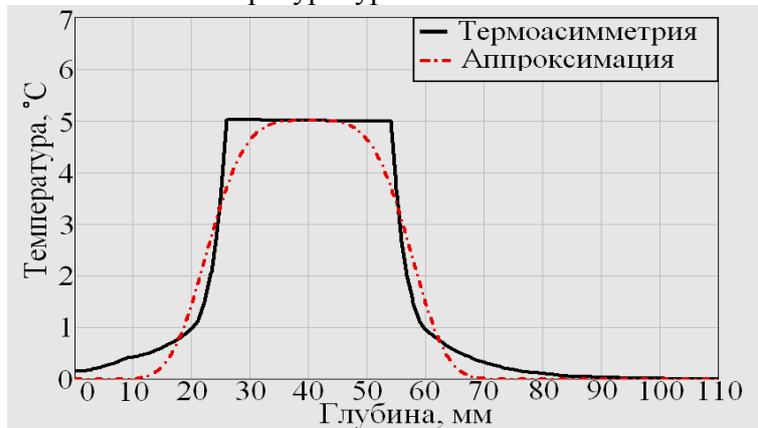


Рис.3. Термоасимметрия тканей участка тела с почкой при нагретой урине внутри почечной лоханке

В качестве аппроксимации термоасимметрии использовалась функция:

$$T(r) = A e^{\frac{-r^n}{(K\frac{D}{2})^n}} \quad (7)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 \quad (8)$$

где  $A = 5$  – увеличение температуры в пределах почечной лоханки в результате заброса нагретой урины в почку;  $D = 20$ ;  $K=1.9$ ;  $n=2$ ;  $x_0, y_0, z_0$  – координаты центра почки. Термоасимметрия, возникающая в результате попадания нагретой урины в почку, и аппроксимирующая функция приведены на рис.3. С помощью (2) в проведен расчет повышения РТ, измеряемой волноводной антенной ( $\varnothing 32$  мм):  $\Delta T_{rad} = 2.15$  °C. Повышение РТ на проекции почки достаточно велико, что говорит о возможности использования рассмотренной антенны для выявления ПМР.

**Заключение**

Для понимания возможностей МР в урологии выполнено математическое моделирование теплового поля почки с помощью численного решения уравнения тепломассопереноса. Для расчёта повышения РТ, которую измеряет радиотермометр на проекции почки при ПМР, вычислена термоасимметрия, возникающая в результате обратного заброса. Получено распределения температуры в биологической ткани, которое аппроксимировано простой формулой (7). Полученная формула будет использоваться в расчетах РТ для проектирования медицинских радиотермографов. Практическое внедрение будет заключаться в интеграции изделий МР с другими медицинскими изделиями, медицинскими робототехническими комплексами и пр.

**Список литературы**

1. *Борисова О.А.* Диагностическая эффективность радионуклидных, ультразвуковых и рентгеновских исследований детей с пузырно-мочеточниковым рефлюксом: Дис. канд. мед. наук. М., 2010, 86 с.
2. *Stauffer P.R. et al.* Microwave radiometry for non-invasive detection of vesicoureteral reflux (VUR) following bladder warming //Energy-based Treatment of Tissue and Assessment VI. – International Society for Optics and Photonics, 2011. – Т. 7901. – С. 79010V.
3. *Arunachalam K. et al.* Modeling the detectability of vesicoureteral reflux using microwave radiometry //Physics in Medicine & Biology. – 2010. – Т. 55. – №. 18. – С. 5417.
4. *Snow B. W. et al.* Non-invasive vesicoureteral reflux detection: Heating risk studies for a new device //Journal of pediatric urology. – 2011. – Т. 7. – №. 6. – С. 624-630.
5. *Vesnina S.G. et al.* Modern microwave thermometry for breast cancer //J. Mol. Imag. Dynamic. – 2017. – Т. 7. – №. 136. – С. 10.1109.
6. Development of a miniature microwave radiothermograph for monitoring the internal brain temperature/Sedankin M.K.[et. al.]// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018 V.3, № .P.28-36
7. Моделирование собственного теплового излучения почки в микроволновом диапазоне/Седанкин М.К.[ и др.]// Медицинская техника. 2019.№1.С.44-47
8. *Bobrikhin A. F. et al.* Modeling of the dipole, helical and cavity-slot antennas applicators for multichannel medical radiothermographs //2014 24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology. – IEEE, 2014. – С. 1047-1048.
9. *Gabriel S., Lau R.W., Gabriel C.* The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz //Physics in medicine & biology. – 1996. – Т. 41. – №. 11. – С. 2251.
10. *Mun P.S. et al.* A study of dielectric properties of proteinuria between 0.2 GHz and 50 GHz //PloS one. – 2015. – Т. 10. – №. 6. – С. e0130011.

05.11.00

**П.В. Писарев канд. техн. наук, А.А. Паньков д-р техн. наук,  
А.Н. Аношкин д-р техн. наук**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
аэрокосмический факультет,  
кафедра механики композиционных материалов и конструкций,  
Пермь, Россия, pisarev85@live.ru

### **ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ И КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

*В рамках данной работы сформулированы физическая и математическая модели прогнозирования акустической эффективности резонансных ячеек звукопоглощающих конструкций призматической и биконической формы. Осуществлен расчет коэффициента потери акустического давления волны на выходе из канала для различных геометрических форм камеры и горла рассматриваемых ячеек для монохроматической звуковой волны в диапазоне частот 100-600 Гц. Анализ полей акустических давлений выявил сильное влияние геометрии горла ячейки на резонансную частоту ячейки и на коэффициент потери акустического давления. Подтверждена эффективность предложенной авторами биконической формы резонансной ячейки.*

*Ключевые слова: звукопоглощающие конструкции, резонатор Гельмгольца, влияние формы, конический резонатор, коэффициент потери акустического давления, численное моделирование.*

В настоящее время в связи с высокими требованиями, предъявляемыми Международной организацией гражданской авиации и ужесточением норм на шум, акустические характеристики авиационных двигателей становятся важнейшими показателями конкурентоспособности самолетов, и современные звукопоглощающие конструкции являются предметом исследований многих отечественных [1-4] и зарубежных [5-8] ученых. В частности, возникает необходимость в разработке новых звукопоглощающих конструкций в канале воздухозаборника и во внешнем контуре авиадвигателя. Наиболее перспективным путем решения данной задачи является использование резонансных звукопоглощающих конструкций, поэтому проведение численных экспериментов по расчету звукопоглощающих свойств отдельных резонансных ячеек звукопоглощающих конструкций с комплексным учетом многих геометрических и акустических особенностей является актуальной задачей [3, 4].

Цель настоящей работы заключается в повышении эффективности шумоглушения в конструкциях современных авиационных двигателей через совершенствование геометрической формы резонансных ячеек на основе уточненного численного математического моделирования взаимодействия монохроматической акустической волны в канале с одной или несколькими резонансными ячейками с комплексным учетом многих геометрических параметров ячеек, в частности: размеров и форм камеры, коническо-цилиндрического горла существенно неоднородного поля акустических давлений в канале с одной или несколькими резонансными ячейками и расчете коэффициента потери акустического давления волны на выходе из канала. Работа основана на численном подтверждении эффективности предложенной авторами в [9] биконической формы резонансной ячейки типа «песочные часы», которая позволила увеличить мощность акустического излучения ячейки на резонансной частоте благодаря более полному преобразованию потенциальной энергии сжатия воздуха внутри камеры в нижней конической части ячейки в кинетическую энергию движения воздуха в коническо-цилиндрическом горле ячейки, что приводит к значительному увеличению коэффициента потери акустического давления волны на выходе из канала.

Для проведения вычислительных экспериментов были построены две геометрические модели. Обе модели содержат канал квадратного сечения и присоединенные посередине ячейки призматической и биконической формы. Резонаторы имеют одинаковые объемы и соединены с каналом узкой «горловиной» цилиндрической формы.

Сеточная модель: структура расчетной сетки принималась следующая. Для лучшей сходимости решения и снижения погрешностей получаемых результатов применялась расчетная сетка, ячейки которой имеют форму, близкую к форме равностороннего тетраэдра [1]. Максимальный размер элемента 0,001 м., минимальный размер элемента принимался 0,0001 м, общее количество элементов составило 3 млн. элементов. Помимо прочего при измельчении сетки избегались резкие отличия геометрических размеров соседних ячеек – линейные размеры соседних ячеек не отличаются более, чем в 2 раза.

Проведение численных экспериментов по определению акустических характеристик резонатора осуществляется посредством решения уравнения Гельмгольца[2]:

$$-\nabla \cdot \left( \frac{\nabla P}{\rho_0} \right) - \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} P = 0, \text{ где } \omega = 2\pi f \quad (1)$$

Волна на входе в модельный канал: задавалась в виде гармонической волны давления с амплитудой  $P_0$ .

$$n \cdot \left( \frac{\nabla P}{\rho_0} \right) = \frac{i\omega}{\rho_0 c} P - \frac{2i\omega}{\rho_0 c} P_0 \quad (2)$$

Волна на выходе описывалась как:

$$n \cdot \left( \frac{\nabla P}{\rho_0} \right) = \frac{i\omega}{\rho_0 c} P_0 \quad (3)$$

Жесткая стенка модельного канала описывалась как:

$$n \cdot \left( \frac{\nabla P_0}{\rho_0} \right) = 0 \quad (4)$$

Коэффициент потери акустического давления на выходе из модельного канала определялся как:

$$TL = 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right); \quad (5)$$

$$P_{in} = \int_{\partial\Omega} \frac{p_0^2}{2\rho c_s} dA; \quad (6)$$

$$P_{out} = \int_{\partial\Omega} \frac{|p_c|^2}{2\rho c_s} dA \quad (7)$$

По результатам вычислительных экспериментов для моделей 1 и 2 были получены зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты (рис. 1 а, б).

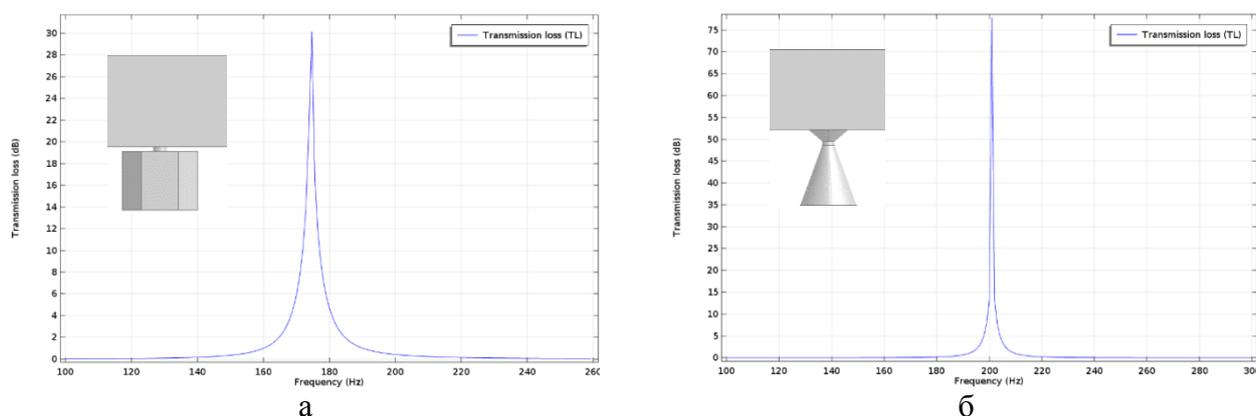


Рис. 1 – Зависимости коэффициента потери акустического давления (TL) от частоты  $\nu$  для базовой геометрической модели (а) с резонатором призматической (б) биконической формы

Анализ зависимостей показал, что резонансной частотой для призматического резонатора является частота  $\nu=174$  Гц и 201 Гц для биконического резонатора. Значение коэффициента потери акустического давления (TL) составило 30 дБ и 77 дБ соответственно.

Анализ распределения полей акустического давления по продольному сечению модельного канала выявил, что для биконического резонатора наблюдается значительное отражение набегающей волны (рис. 2).

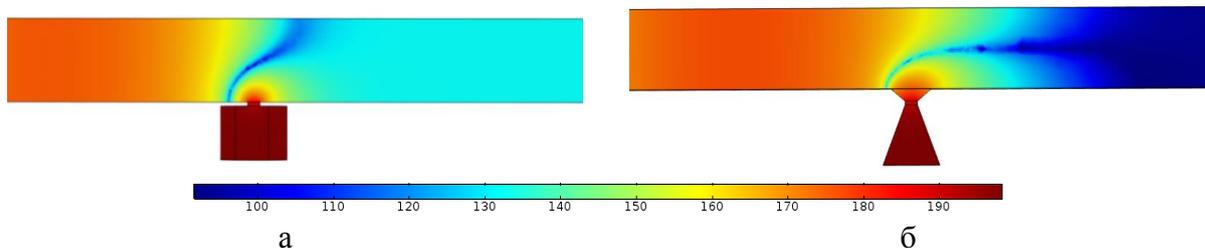


Рис. 2 – Поле распределения акустического давления по продольному сечению С-С модельного канала оснащенного (а) призматическим (б) биконическим резонатором

Волна, входящая в резонатор, за счёт двойного прохода в нём изменяет свою фазу на обратную и складываясь с излучаемой источником первичной волной гасит последнюю. При этом происходит взаимодействие волны, сгенерированной резонатором с основной звуковой волны в канале, с образованием четкой границы, наклоненной в сторону распространения основной волны. В результате этого взаимодействия происходит падение акустического давления набегающей волны.

Таким образом, подтверждена эффективность глушения звуковой волны в канале с использованием установленной на стенке канала предложенной авторами биконической резонансной ячейки [1] по численным результатам математического моделирования процесса распространения и затухания акустической волны в канале с учетом взаимодействия с резонансной ячейкой. Осуществлен расчет величины демпфирующего эффекта, производимого резонаторами различной формы, установленными на стенке канала, в диапазоне рабочих частот 100-600 Гц. Выявлено влияние геометрии горла резонатора, на его акустическую эффективность и резонансную частоту при одинаковом объеме.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00828.*

**Список литературы**

1. *Мунин А.Г., Квитка В.Е.* Авиационная акустика. - М.: «Машиностроение». – 1973. - 448 с.
2. Авиационная акустика: в 2 ч. / под ред. *А.Г. Мунина*. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 243 с.
3. *Чигрин В.С., Белова С.Е.* Конструкция форсажных камер и выходных устройств авиационных ГТД / Рыбинск. гос. авиац. техн. ун-т. – Рыбинск, 2004. – 38 с.
4. *Бакланов В.С., Постнов С.С., Постнова Е.А.* Расчёт резонансных звукопоглощающих конструкций для современных авиационных двигателей // Математическое моделирование. - 2007. – Т.19, № 8.- С. 22-30
5. *Mao Q., Pietrzko S.* Experimental study for control of sound transmission through double glazed window using optimally tuned Helmholtz resonators // Applied Acoustics. – 2010. – Vol. 71. – P. 32–38
6. *Ho J.H., Berkhoff A.* Comparisons between various cavity and panel noise reduction control methods in double-panel structures // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2012. – Vol. 131(4). – P. 3501–3501
7. *Jen-Hsuan Ho, Berkhoff A.* Development of dynamic loudspeakers modified as incident pressure sources for noise reduction in a double panel structure // ICSV20. – Bangkok, Thailand. – July, 2013. -P. 7–11
8. *Pan J., Guo J., Ayres C.* Improvement of sound absorption of honeycomb panels. Proceedings of Acoustics // Busselton, Western Australian, Australia. – November 2005. – P. 9–11
9. Патент RU №2015109509\28(105089). Резонансная ячейка для гашения акустических волн / *Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В.*; опубл. 18.03.2015 г.
10. *Писарев П.В., Аношкин А.Н., Паньков А.А.* Биконическая ячейка («Biconicalcell»). Свидетельство о государственной регистрации программы № 2016616458, дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 14 июня 2016 г.
11. *Писарев П.В., Паньков А.А., Аношкин А.Н.* Анализ влияния формы резонатора Гельмгольца на акустическое давление в модельном канале / Тезисы докладов Четвертой открытой Всероссийской конференции по аэроакустике: 29 сент. - 1 окт. 2015 г. / Центр. Аэрогидродинам. ин-т им. проф. Н.Е.Жуковского. – Москва: Издат. отд. ЦАГИ, 2015. - С. 81-82
12. *Аношкин А.Н., Паньков А.А., Писарев П.В.* Анализ акустического давления в модельном канале с резонатором Гельмгольца цилиндрической формы. – Математическое моделирование в естественных науках. - 2015. - Т. 1. - С. 354-357

05.11.13

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

<sup>1</sup>Альметьевский государственный нефтяной институт,  
кафедра нефтегазового оборудования и технологии машиностроения,  
Альметьевск,

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

## АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ

*Рассмотрены пути повышения чувствительности термического анализа. В качестве теплового сенсора применена батарея из анизотропных термоэлементов (АТЭ) из висмута, сочетающих высокую чувствительность – порог  $10^{-7}$  Вт с уникальным быстродействием –  $10^{-2}$  с.*

Ключевые слова: дифференциально – сканирующая калориметрия (ДСК), анизотропный термоэлемент (АТЭ), быстродействие, чувствительность.

В группу физико-химических методов входит: термометрия и калориметрия [1-4], с помощью которых определяются энергетические (энтальпийные) изменения в исследуемом веществе. Они основаны на измерении температуры (термометрия), самопроизвольных или компенсирующих тепловых потоков (калориметрия).

Термографический анализ основан на регистрации кривой нагревания (охлаждения). Происходящие в результате тепловых изменений в веществе процессы регистрируются по отклонениям в скорости нагревания (охлаждения) вещества от заданной программы. Но простая (температурная) запись не обладает достаточной чувствительностью, поэтому производится регистрация дополнительной, так называемой, дифференциальной кривой, показывающей изменение разности температур в исследуемом веществе и в эталоне. Применение дифференциальной записи в термографии (дифференциальный термический анализ – ДТА) сделало этот метод более чувствительным, поэтому он стал применяться в химических, физических, геологических и биологических исследованиях и анализах.

Однако во многих случаях ДТА не применим, так как существенным недостатком метода является низкая относительная и абсолютная чувствительность на уровне 1% и  $10^{-3}$ г. соответственно, поэтому обнаружение примеси на уровне  $10^{-5}$  % (следовое содержание) не представляется возможным [1].

Реализация высокой чувствительности приборов ДТА требует больших значений термического сопротивления тепловому потоку R [2,3]. Возможности ДТА существенно ограничивает большая инерционность измерений и, вследствие этого, низкая разрешающая способность. Инерционность определяется постоянной времени калориметрической камеры  $\tau = RC$ , где R-термическое сопротивление, C-теплоемкость образца. Чем меньше значение  $\tau$ , тем точнее регистрируется термическое поведение образца. Однако для высокой чувствительности ДТА требуется большое сопротивление R, что несовместимо с требованием быстродействия и высокой разрешающей способности [2,3]. В приборах ДТА (термопарных) – типичная высокая вольт-ваттная чувствительность 10-400мВ/Вт, но одновременно низкое быстродействие 10-1000секунд [4].

Калориметрическим "чистым" методом является метод ДСК, основанный на нагревании (или охлаждении) образца и эталона с заданной скоростью при сохранении их температур одинаковыми и измерений компенсирующего теплового потока, поддерживающего температуру образца в пределах заданной программы. Экспериментальные кривые ДСК представляют собой зависимости теплового потока (в мДж/с) от времени.

Согласно [2,3], выделение или поглощение теплоты образцом в единицу времени  $dH/dt$  можно представить суммой трех составляющих.

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{dq}{dt} + (C_{об} - C_{эт}) \frac{dT}{dt} - RC_{об} \frac{d^2q}{dt^2} \quad (1)$$

где  $dq/dt$  регистрируемый тепловой поток, экспериментальная кривая ДСК.

Принципиальное отличие уравнения (1) от аналогичного соотношения в ДТА состоит в том, что термическое сопротивление  $R$  входит только в составляющую III. Поэтому чувствительность прибора ДСК, определяемая составляющей I, т.е. явно не зависит от  $R$ , а определяется только чувствительностью температурных датчиков и электронными схемами усиления.

Однако, наличие составляющей III и ее возрастание вызывает изменение формы экспериментальной кривой ДСК: уменьшение крутизны на ее переднем фронте, ее уширение ("размытость" по оси абсцисс) и смещение температуры максимума пика  $T_{max}$  к более высоким температурам (так называемое «термическое запаздывание»). Вклад этой составляющей пропорционален постоянной времени  $RC_{об}$ , поэтому актуальность ее уменьшения очевидна, как для повышения разрешающей способности, так и чувствительности; в противном случае, при решении тонких физических задач, «размытый» полезный сигнал будет ограничиваться уровнем шумов электронных устройств.

Поэтому, например, при протекании очень быстрой химической реакции теплота, выделяющаяся мгновенно, может быть зарегистрирована достаточно уверенно прибором, если только постоянная времени измеряющей системы  $\tau$ , того же порядка, либо ещё меньше времени выделения тепла. Расчёты показывают, что для достижения постоянной времени прибора порядка миллисекунд расстояние между источником теплоты и термодатчиком должно составлять доли миллиметра.

В приборах ДСК уменьшение вклада составляющей III достигается, во-первых, максимальным уменьшением термических масс камер образца и эталона, т.е. термического сопротивления  $R$ , и, во-вторых, использованием небольших масс образцов ( $m \leq 0,1 \text{ мг}$ ) [3].

Можно ожидать, что применение новых материалов, в качестве датчиков тепла, и технологий расширит температурные возможности и обеспечит создание миниатюрных прецизионных калориметров с чётко определенными характеристиками, импульсным нагревом, очень малой постоянной времени и повышенной чувствительностью.

С конца XX века интенсивно разрабатываются новые виды тепловых сенсоров: на основе анизотропных термоэлементов, сочетающих быстродействие и чувствительность, превосходящих на два и более порядка [6] параметры известных тепловых устройств [5-14]. Применение новых тепловых датчиков, основанных на АТЭ из висмута, позволило авторам разработать и изготовить быстродействующий дифференциальный микрокалориметр. С рабочими параметрами: быстродействие  $10^{-2}$  с., вольт-ваттная чувствительность 10-15 мВ/Вт, минимально обнаруживаемая мощность  $10^{-7}$  Вт, объём реакционной камеры 0,03-0,1 см<sup>3</sup>, рабочий интервал температур 100-400 К. Перспективной методикой определения содержания галлиевых включений является дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК). Данный метод включает измерение дифференциального теплового потока при непрерывном уменьшении температуры, при условии  $\tau_{яч} \leq \tau_{крист}$ , где  $\tau_{яч}$  - быстродействие калориметра (ячейки),  $\tau_{крист}$  - время кристаллизации включений [13].

На рис. 1 показано фазовое превращение включений  $\alpha$ -галлия при изменении температуры арсенида галлия. Условия эксперимента: масса образца 50 мг; скорость нагревания и охлаждения  $V=1$  град/мин. При нагревании и охлаждении на температурной (либо временной) зависимости потока тепловой мощности наблюдаются характерные аномалии, а именно, при температуре + 30<sup>0</sup>С наблюдается плавление галлия (а), а взрывной кристаллизации соответствует пик + 23,5<sup>0</sup> С (б) Длительность процессов плавления и кристаллизации галлиевых включений значительно отличаются. Структурные превращения при их охлаждении сопровождаются взрывной кристаллизацией за время менее чем 0,1с, поэтому для увеличения чувствительности метода измерение дифференциального теплового потока нужно осуществлять при кристаллизации включений, т.е. при уменьшении температуры.

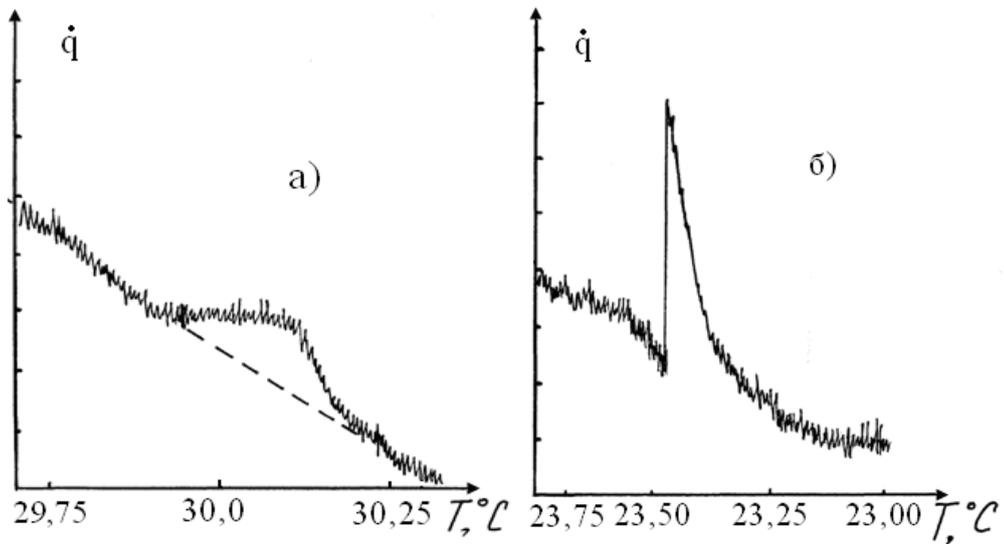


Рис. 1. Теплограмма Ga As:Te (кривые ДСК соответствуют плавлению (а) и кристаллизации (б) микровключений  $\alpha$ -галлия)

Целью изобретения [13] является повышение чувствительности определения содержания металлических микровключений в арсениде галлия. При этом эталон и исследуемый образец, приготовленный в виде порошка массой  $\leq 1$  мг с дисперсностью  $\approx 0,1$  мг, располагают непосредственно на тепловых сенсорах – АТЭ из висмута. Нагревают воздействием инфракрасного лазера с длиной волны 10,6 мкм в течение секунды на 100 градусов выше температуры плавления микровключений галлия. Затем с такой же скоростью осуществляют закалку расплава галлия с образованием жидкой фазы  $\beta$ -Ga. Далее снимают искомую зависимость при термоэлектрическом охлаждении в области температур кристаллизации фазы  $\beta$ -Ga при температуре  $-25^\circ\text{C}$  и при превращении  $\beta$ -Ga в  $\alpha$ -Ga при температуре  $-90^\circ\text{C}$ . Впервые экспериментально показано, что разрешение теплового спектра при термическом анализе сравнимо по чувствительности с результатами спектрального анализа (рис.2). При пробе GaAs $\approx 1$ мг, приготовленного в виде порошка, дисперсность которого  $\approx 0,1$ мг, зарегистрированы отклики при кристаллизации включений  $\beta$ -галлия на уровне  $\approx 0,15$ мкВт, что соответствует массе галлия  $10^{-10}$ г. при относительной чувствительности  $10^{-5}\%$ .

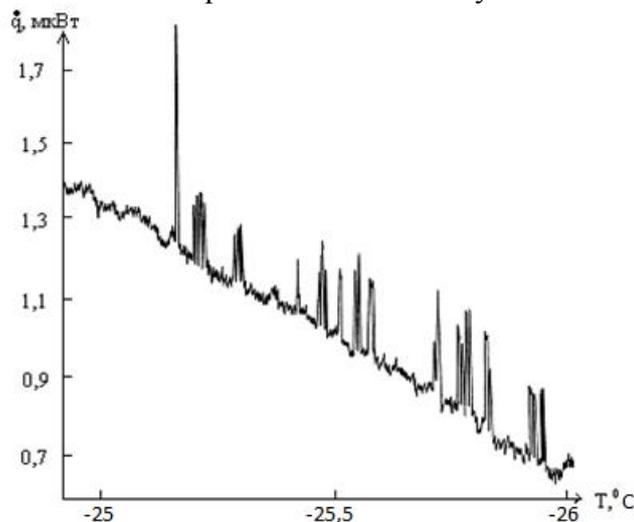


Рис. 2. Теплограмма GaAs: Te (пики на кривой ДСК соответствуют кристаллизации микровключений галлия). Условия эксперимента: масса пробы, приготовленной в виде порошка с дисперсностью  $\approx 0,1$  мг, равна  $\approx 1$  мг; скорость охлаждения  $v = 0,2$  град/мин.

Данная работа в более широком формате была представлена на конкурс «Пятьдесят лучших инновационных идей для Республики Татарстан» в номинации «Старт инноваций». Результат: проект является перспективным и был высоко оценен экспертом в данной номинации и рекомендован для дальнейшей реализации.

**Список литературы**

1. Уэндланд У. Термические методы анализа. /М.: Мир, 1978. - 526 с.
2. Топор Н.Д., Огородова Л.П., Мельчакова Л.В. Термический анализ минералов и неорганических соединений /М.: МГУ, 1987. – 190 с.
3. Берштейн В.А., Егоров В.М. Дифференциальная сканирующая калориметрия в физикохимии полимеров /Л.: Химия, 1990.- 256 с.
4. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика / М.: Химия, 1990. – 176 с.
5. Дивин Н.П. Физические основы управляемого выращивания монокристаллов висмута для анизотропных термоэлементов и их применение.// Автореф. дисс. к ф-м. наук. - Ленинград. 1982. – 14 с.
6. Митяков В.Ю. Возможности градиентных датчиков теплового потока на основе висмута в теплотехническом эксперименте // Дисс. д.т.н. - Санкт-Петербург. 2005. – 239 с.
7. Семиколонова Н.А., Чернуха О.Е., Шляхова А.Г., Шляхов А.Т. Оптимизация термического анализа веществ // Вестник Омского университета. – 2004. - №3. - С.54-56.
8. Шляхова А.Г., Дивин Н.П., Шляхов А.Т. Быстродействующий дифференциальный микрокалориметр // Ученые записки Альметьевского нефтяного института – 2005. – т.3. – С.225-235.
9. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т., Галимов Э.Р. Калориметрическое исследование включений матричного металла в GaAs:Te. // Ученые записки Альметьевского нефтяного института. – 2006. - т.4. – С.423-432.
10. Шляхова А.Г. Дифференциально-сканирующая калориметрия для контроля качества арсенида галлия // Изв. ВУЗов: Проблемы энергетики. - 2006. - №11-12. - С.104-107.
11. Шляхова А.Г., Галимов Э.Р., Шляхов А.Т. Разработка высокочувствительных и быстродействующих калориметрических устройств для изучения тепловых процессов // Изв. ВУЗов: Проблемы энергетики. - 2007. - №3-4. - С. 125-129.
12. Шляхова А.Г. Быстродействующий калориметрический метод контроля примеси в полупроводниковых материалах // Дисс. канд. техн. наук. - Казань: КГЭУ, 2007. – 124 с.
13. Патент №2561335 (RU). Способ определения содержания металлических микровключений в полупроводниковых материалах // Шляхов А.Т., Шляхова А.Г. Опубликовано: 27.08.15. Бюл. №24.
14. Шляхова А.Г., Шляхов А.Т. Термический анализ веществ: идеи, реализации, результаты // Научно-технический вестник Поволжья. -2018. - №3. - С.33-36.

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

05.13.18

<sup>1</sup>А.И. Акимов канд. техн. наук, <sup>2</sup>И.А. Акимов д-р техн. наук,  
<sup>2</sup>Д.И. Сиделов канд. физ.-мат. наук

<sup>1</sup>Филиал Российского Государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина в г. Оренбурге, отделение экономики гуманитарных и естественнонаучных дисциплин (ЭГ и ЕНД),  
<sup>2</sup>Оренбургский государственный педагогический университет, физико-математический факультет, кафедра математики и МПМ, кафедра информатики, физики и МПИФ, Оренбург, akimovff11@mail.ru, akimov\_ia@mail.ru, disideloff@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОСЕВОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИММЕТРИЕЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ**

*В работе представлены результаты изучения термоупругих напряжений и деформаций в производстве многослойных композитов методом полимеризации с осевой и центральной симметрией в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП).*

Ключевые слова: *полимеризация, композиты, многослойные конструкции, напряжения, деформации, перемещения.*

В связи с возросшими требованиями к прочностным характеристикам многослойных конструкций из композитов с осевой и центральной симметрией в самолетостроении и космической технике, возникает необходимость разработки практически более удобных аналитических методов расчета термоупругих напряжений и деформаций, вызванных неравномерным распределением температуры в пресс-формах установки автоматического ведения технологического процесса (АВТП), где изготавливаются изделия методом полимеризации.

Исследования термоупругих напряжений и деформаций при нестационарных температурных режимах с помощью точных методов их решения приводит к сложным и громоздким аналитическим зависимостям, что часто задерживает внедрение их в практику инженерных расчетов.

В работе предложен приближенный метод решения задач нестационарной теплопроводности для многослойных изделий с осевой и центральной симметрией, что значительно упрощает инженерные расчеты.

В работе [1] приводится приближенный расчет нестационарной теплопроводности для конструкций с осевой и центральной симметрией. Применим его к исследованию термоупругих напряжений и деформаций в производстве многослойных композитов цилиндрической и сферической формы [3] в пресс-формах и автоклавах.

Изделия цилиндрической формы (лонжероны лопастей вертолетов) изготавливаются в установках АВТП, а сферической формы (корпуса спутниковых аппаратов) в автоклавах.

Если температурное поле является функцией радиального расстояния и времени  $u(r, \tau)$ , то в этом случае общая задача термоупругости в силу симметрии упрощается. Рассмотрим именно симметричную задачу термоупругости для цилиндра и шара.

Как известно [3], общее уравнение относительно радиального напряжения  $\sigma_r$ , когда  $\alpha_u$  и  $E$  – произвольные функции от радиуса для цилиндрических и сферических координат имеют вид

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \left(\frac{3}{r} - \frac{1}{E} \frac{dE}{dr}\right) \frac{d\sigma_r}{dr} - \left[\frac{(1-2\mu)}{(1-\mu)Er} \cdot \frac{dE}{dr}\right] \sigma_r = -\frac{E}{(1-\mu)r} \cdot \frac{d(\alpha_u u)}{dr}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \left(\frac{4}{r} - \frac{1}{E} \frac{dE}{dr}\right) \frac{d\sigma_r}{dr} - \left[\frac{2(1-2\mu)}{(1-\mu)Er} \cdot \frac{dE}{dr}\right] \sigma_r = -\frac{2E}{(1-\mu)r} \cdot \frac{d(\alpha_u u)}{dr}, \quad (2)$$

где  $r$  – координата;  $\sigma_r$  – нормальное напряжение в радиальном направлении;  $\sigma_\varphi$  – нормальное окружное напряжение;  $\sigma_z$  – нормальное напряжение в осевом направлении (для цилиндра);  $\varepsilon_\varphi$  – окружная деформация,  $\varepsilon_z$  – осевая деформация;  $\varepsilon_r$  – радиальная деформация;  $m_r$  – радиальное перемещение,  $V_i$  – коэффициент Пуассона;  $\alpha_u$  – коэффициент линейного расширения;  $\mu$  – некоторая постоянная задачи Штурма-Лиувилля  $[\psi''(\eta) + \lambda\psi(\eta) = 0, \lambda = \mu^2]$ ,  $E$  – модуль Юнга;  $m_z$  – осевое перемещение.

В общем случае решение уравнений (1) и (2) может быть получено лишь приближенными аналитическими или численными методами.

Так как в производстве композитов в установках АВТП или в автоклавах рассматриваются изделия с коэффициентами  $\mu = const$ ,  $E = const$ ,  $\alpha_u = const$ , то уравнения (1) и (2) принимают вид:

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \frac{3}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{\alpha_u E}{(1-\mu)r} \cdot \frac{du}{dr}; \quad (3)$$

$$\frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + \frac{4}{r} \frac{d\sigma_r}{dr} = -\frac{2\alpha_u E}{(1-\mu)r} \cdot \frac{du}{dr}. \quad (4)$$

После определения  $\sigma_r$  остальные компоненты определяются из формул [2]:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_\varphi + \sigma_z)] + \alpha_u u; \quad (5)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [\sigma_\varphi - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] + \alpha_u u; \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_\varphi + \sigma_r)] + \alpha_u u. \quad (7)$$

Т.к.  $m_z = 0$  и  $\sigma_z = 0$ , то из равенства (7) определяем

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\varphi) - E\alpha_u u. \quad (8)$$

Для изделий сферической формы

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - 2\mu\sigma_\varphi] + \alpha_u u; \quad (9)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_\varphi - \mu\sigma_r] + \alpha_u u. \quad (10)$$

Подставляя (8) в уравнения (5) и (6), будем иметь

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [(1-\mu^2)\sigma_r - (1+\mu)\mu\sigma_\varphi] + (1+\mu)\alpha_u u; \quad (11)$$

$$\varepsilon_\varphi = \frac{1}{E} [(1-\mu^2)\sigma_\varphi - (1+\mu)\mu\sigma_r] + (1+\mu)\alpha_u u. \quad (12)$$

Уравнения равновесия для цилиндра и сферы в радиальном направлении имеют вид:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) = 0; \quad (13)$$

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r} (\sigma_r - \sigma_\varphi) = 0. \quad (14)$$

Геометрические уравнения имеют вид:

$$\varepsilon_z = \frac{dm_r}{dr}, \varepsilon_\varphi = \frac{m_r}{r}. \tag{15}$$

Для бесконечного цилиндра, если торцовые поверхности свободны от напряжений, тепловое напряжение в осевом направлении определяется по формуле

$$\sigma_z = \sigma_r + \sigma_\varphi. \tag{16}$$

Дифференциальные уравнения относительно радиального перемещения  $m_r$  для случая, когда  $\mu = const$ ,  $\alpha_u = const$ ,  $E = const$  (для цилиндра и шара) имеют вид:

$$\frac{d^2 m_r}{dr^2} + \frac{dm_r}{r dr} - \frac{1}{r^2} m_r = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_u \frac{du}{dr}; \tag{17}$$

$$\frac{d^2 m_r}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dm_r}{dr} - \frac{2}{r^2} m_r = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_u \frac{du}{dr}. \tag{18}$$

Соотношения между напряжениями и перемещениями массы связующих для цилиндрических и сферических изделий имеют вид

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ (1-\mu) \frac{dm_r}{dr} + \mu \frac{m_r}{r} - (1+\mu) \alpha_u \cdot u \right]; \tag{19}$$

$$\sigma_\varphi = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left[ \mu \frac{dm_r}{dr} + 3\mu \frac{m_r}{r} + (1+\mu) \alpha_u \cdot u \right]. \tag{20}$$

Решив уравнения (17) и (18) при заданных граничных условиях, напряжения и деформации можно найти из выражений (15), (19), (20), (8) или (16).

Исследование термонапряженного состояния для трехслойного цилиндрического тела с осевой симметрией рассмотрим на примере определения тепловых напряжений и деформаций, возникающих в процессе охлаждения изделий (композитов) в пресс-формах. Когда пресс-форма отключается от электрообеспечения и температура среды значительно ниже, чем температура изделия в пресс-формах (около 165 °С), т.е.  $u_{cp} < u_0$  при следующих условиях:

- 1) слои неразрывно полимеризованы на поверхности контакта;
- 2) внешняя поверхность цилиндра свободна от нагрузки;
- 3) температурное поле известно и является функцией радиального расстояния и времени;
- 4) при  $u_i(R, F_0) = u(R, 0) = u_{cp} = const$  система находится в ненапряженном состоянии,

$R$  – средний радиус слоев;  $F_0 = a\tau/R^2$  – число Фурье (безразмерное время).

Рассматриваемая задача может быть сформулирована в виде дифференциального уравнения термоупругости в напряжениях со следующими граничными условиями и условиями сопряжения для цилиндрических конструкций (Радиусы условно обозначим через  $\rho$ , т.е.  $r_i = \rho_i$ ).

$$\frac{d^2 \sigma_{\rho i}}{d\rho^2} + \frac{3}{\rho} \frac{d\sigma_{\rho i}}{d\rho} = - \frac{\alpha_{\rho i} E_{\rho i}}{(1-\mu_i)\rho} \cdot \frac{d\varphi_i}{d\rho}; \quad (i = 1, 2, 3) \tag{21}$$

$$\left. \frac{d\sigma_{\rho 1}}{d\rho} \right|_{\rho=0} = 0; \tag{22}$$

$$\sigma_{\rho 1} \Big|_{\rho=\rho_1} = \sigma_{\rho 2} \Big|_{\rho=\rho_1}; \quad m_{\rho 1} \Big|_{\rho=\rho_1} = m_{\rho 2} \Big|_{\rho=\rho_1}; \quad \sigma_{\rho 2} \Big|_{\rho=\rho_2} = \sigma_{\rho 3} \Big|_{\rho=\rho_2} \tag{23}$$

$$m_{\rho 2} \Big|_{\rho=\rho_2} = m_{\rho 3} \Big|_{\rho=\rho_2}; \quad \sigma_{\rho 3} \Big|_{\rho=1} = 0, \tag{24}$$

где  $\sigma_\rho = \sigma/\sigma_M$ ;  $E_\rho = E/E_M$ ;  $\alpha_\rho = \alpha/\alpha_M$ ;  $m_\rho = m/m_M$ ;  $\rho = r/r_3$ ;  $u_M = \alpha_M(u_0 - u_{cp})r_3$ ;  $\varphi_i = (u_i - u_{cp})/(u_0 - u_{cp})$ ;  $\sigma_M = E_M \alpha_M (u_0 - u_{cp})$ ;  $\sigma_M$ ,  $E_M$ ,  $\alpha_M$ ,  $m_M$  – масштабные значения величины.

Интегрирование системы уравнений (21) – (24) дает следующие соотношения для определения радиальных и окружных напряжений:

$$\sigma_{\rho_i}(\rho, F_0) = N_{2i} + \frac{N_{1i}}{\rho_2} - \frac{E_{\rho_i} \alpha_{\rho_i}}{(1 - \mu_i) \rho_2} \cdot \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho_1 \varphi_i(\rho, F_0) d\rho, \quad (i = 1, 2, 3); \quad (25)$$

$$\sigma_{\varphi_i}(\rho, F_0) = N_{2i} - \frac{N_{1i}}{\rho_2} - \frac{E_{\rho_i} \alpha_{\rho_i}}{1 - \mu_i} \varphi_i(\rho, F_0) - \frac{E_{\rho_i} \alpha_{\rho_i}}{(1 - \mu_i) \rho_2} \cdot \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho_1 \varphi_i(\rho, F_0) d\rho, \quad (26)$$

где  $\sigma_{\varphi\rho} = \sigma_{\varphi} / \sigma_M$ ,  $\sigma_M$  – масштабное напряжение.

Для перемещений будет иметь вид

$$m_{\rho_i}(\rho, F_0) = \frac{(1 - 2\mu_i)(1 + \mu_i)}{E_{\rho_i}} \cdot \left[ \rho N_{2i} - \frac{N_{1i}}{\rho_2} + \frac{E_{\rho_i} \alpha_{\rho_i}}{1 - \mu_i} \right] \cdot \frac{1}{R} \cdot \int_{\rho_{i-1}}^{\rho_i} \rho \varphi_i(\rho, F_0) d\rho, \quad (27)$$

где  $N_{1i}$ ,  $N_{2i}$ , ( $i = 1, 2, 3$ ) – постоянные интегрирования, определяемые из граничных условий и условий сопряжения (21) – (24). Из условия (22) следует, что  $N_{11} = 0$ . Остальные постоянные следуют из решения системы алгебраических линейных уравнений.

$$\begin{aligned} N_{21} - \frac{N_{12}}{\rho_1^2} - N_{22} &= \frac{E_{\rho_1} \alpha_{\rho_1}}{(1 - \mu_1) \rho_1^2} \cdot \int_0^{\rho_1} \rho \varphi_1(\rho, F_0) d\rho; \\ -b_1 N_{21} - \frac{b_2}{\rho_1^2} N_{12} + b_2 N_{22} &= \frac{b_1 E_{\rho_1} \alpha_{\rho_1}}{(1 - \mu_1) \rho_1^2} \cdot \int_0^{\rho_1} \rho \varphi_1(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{N_{12}}{\rho_2^2} + N_{22} - \frac{N_{13}}{\rho_2^2} - N_{23} &= \frac{E_{\rho_2} \alpha_{\rho_2}}{(1 - \mu_2) \rho_2^2} \cdot \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho \varphi_2(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{b_2 N_{12}}{\rho_2^2} - b_2 N_{22} - \frac{b_3 N_{13}}{\rho_2^2} + b_3 N_{23} &= \frac{b_2 E_{\rho_2} \alpha_{\rho_2}}{(1 - \mu_2) \rho_2^2} \cdot \int_{\rho_1}^{\rho_2} \rho \varphi_2(\rho, F_0) d\rho; \\ \frac{N_{13}}{\rho_3^2} + N_{23} &= \frac{E_{\rho_3} \alpha_{\rho_3}}{(1 - \mu_3) \rho_3^2} \cdot \int_{\rho_2}^{\rho_3} \rho \varphi_3(\rho, F_0) d\rho, \text{ где } b_i = \frac{(1 - 2\mu_i)(1 + \mu_i)}{E_{\rho_i}}, \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned}$$

Практические исследования показывают, что:

- радиальные напряжения  $\sigma_{\rho}$  принимают максимальные значения в центре шара или на оси цилиндра;
- на оси цилиндра или в центре шара  $\sigma_{\rho} = \sigma_{\varphi}$ ;
- окружные напряжения имеют место в более жестких слоях, величина их возрастает с уменьшением относительной доли этих слоев в общей толщине конструкции. Для изделия цилиндрической формы окружное напряжение становится растягивающим при охлаждении и сжимающим при нагревании;
- на месте контакта слоев график функции  $\sigma = \sigma(\rho)$  может иметь конечный разрыв. Величины скачков окружных напряжений на границе слоев могут быть различными и определяются условиями непрерывности для окружных деформаций (вследствие непрерывности перемещений связующих).

### **Список литературы**

1. П.В. Цой. Методы расчета задач тепломассопереноса. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 413 с.
2. В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, В.В. Калашиников. Аналитическое решение задач тепломассопереноса и термоупругости для многослойных конструкций. М.: «Высшая школа», 2005. – 429 с.
3. И.А. Акимов. Исследование и разработка математических моделей расчетных формул теплообмена на первом этапе производства многослойных конструкций сферической формы методом полимеризации/ И.А. Акимов, В.А. Урбан// Научно-технический вестник Поволжья. – 2018, №2, С. 50-53.

05.13.00

<sup>1</sup>В.В. Андреев д-р техн. наук, <sup>2</sup>Н.Г. Андреев, <sup>1</sup>К.Г. Галстян, <sup>1</sup>С.Л. Леванов

<sup>1</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,  
Институт ядерной энергетики и технической физики,  
<sup>2</sup>АО «ОКБМ Африкантов»,  
Нижний Новгород, karine-95@mail.ru, vyach.andreev@mail.ru

## ОБОСНОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕЙТРОННОГО КОНВЕРТЕРА НА ВСЕХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА В РАМКАХ ПРОЕКТНО ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ НГТУ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

*В данной статье обосновывается безопасность лабораторной установки «Нейтронный конвертер». Описана методика расчета программ DOT-III и DOT-Activ. На основании нормативной документации и результатов расчетов по программам DOT-III и DOT-Activ делается вывод о безопасности работы с установкой и ее утилизации по окончании срока эксплуатации.*

Ключевые слова: *нейтронный конвертер, биологическая защита, нейтронная физика, DOT-III, DOT-Activ, жизненный цикл установки, радиационная безопасность.*

В рамках проектно-ориентированного обучения в НГТУ им. Р.Е. Алексеева студентами ИЯЭиТФ разработана установка, которая получила название «Нейтронный конвертер» (см. рисунок). Она предназначена для выполнения научно-исследовательских работ, укомплектована плутоний-бериллиевыми источниками ионизирующего излучения (ИИИ) типа ИБН-8, имеет широкий спектр применения: от лабораторной установки до использования ее в промышленных и сельскохозяйственных целях.



Рис. 1- Лабораторный комплекс «Нейтронный конвертер»

Биологическая защита установки проектировалась в соответствии с нормами радиационной безопасности, изложенными в НРБ-99/2009[1] и ОСПОРБ-99/2010[2]. Для обоснования радиационной безопасности лабораторной установки «Нейтронный конвертер» использовались современные программные коды DOT-III [3] и DOT-Activ [4].

Биологическая защита нейтронного конвертера представляет собой стальные конструкции, заполненные первичным замедлителем (парафином) в месте расположения источников излучения и сплавом парафина с борной кислотой на периферии. В центре конвертера в качестве основного замедлителя использован реакторный графит.

Центральный графитовый блок имеет цилиндрическую воздушную «рабочую» полость с линейными размерами, обеспечивающими размещение в ней исследуемых материалов для облучения. Также в конструкции конвертера предусмотрен измерительный блок для помещения образцов на разной высоте.

На начальном этапе реализации проекта в соответствии с техническим заданием требовалось расчётно-теоретическое обоснование конструкции конвертера.

При выполнении расчётно-теоретического обоснования для всех этапов жизненного цикла нейтронного конвертера студентами ИЯЭиТФ были решены следующие задачи:

- определен поток тепловых нейтронов в центральном канале установки;
- определена мощность дозы излучения на поверхности установки;
- определена активность материалов установки после окончания срока её эксплуатации.

Оценка уровней излучения включала расчет плотности потоков нейтронов и гамма-излучения в экспериментальном канале, а также мощности дозы нейтронов и гамма-излучения на внешней поверхности установки и в местах возможного нахождения обслуживающего персонала и студентов при работе установки.

Для оценки экологической безопасности утилизации нейтронного конвертера в конце срока эксплуатации был выполнен расчет удельной активности оборудования и произведена оценка источников активационного гамма – излучения и уровней излучения после извлечения источников.

Расчет плотности потоков нейтронов и гамма-квантов в экспериментальном канале и в элементах конструкции нейтронного конвертера выполнялся в 2D-геометрии по коду DOT-III [3] с использованием библиотеки констант CASK-40 [5]. Также по коду DOT-III выполнен расчет мощности дозы нейтронного и гамма-излучения в местах возможного расположения персонала и студентов.

Поскольку в 2D геометрии не представлялось возможным описать 3-х мерную конструкцию нейтронного конвертера, расчеты выполнялись в R-Z и X-Y геометрии. С помощью расчетов в R-Z геометрии учитывался конечный размер источников излучения по высоте, а расчеты в X-Y геометрии (в данной модели источники бесконечны по высоте) позволили учесть влияние шести источников на функционалы радиационного поля.

Сравнение результатов расчётов в R-Z и в X-Y геометрии позволило получить коэффициенты перехода от 2-х мерных моделей к реальной 3-х мерной конструкции нейтронного конвертера.

При умножении на эти коэффициенты результатов расчёта в R-Z геометрии были получены значения, отражающие реальную картину распределения полей нейтронного и гамма-излучения.

Подготовка входных данных для расчетов, включающая задание геометрической модели, материального состава расчетной композиции, спектра и мощности источников излучения была выполнена с помощью кода DOT-Activ [3].

Код DOT-Activ это универсальная интегрированная система моделирования биологической защиты и расчета источников излучения широкого класса реакторных установок, включая оборудование для обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами.

Одной из функций программы DOT-Activ является расчет накопления активности в конструкционных материалах реакторной установки и материалах биологической защиты при работе реакторных установок. DOT-Activ рассчитывает величину удельной активности радионуклидов активационного происхождения, а также мощность источников гамма-излучения в элементах сетки программы DOT. Кроме того, вычисляется величина и изотопный состав полной активности для каждой из указанных геометрических зон [4].

Расчет удельной активности  $A_i(r, T_a, t)$  проводится по формуле:

$$A_i(r, T_a, t) = \frac{\rho_i \varepsilon_{i,i} F_{акт}^i(r) \lambda_i}{\lambda_i} [1 - \exp(-\lambda_i T_a)] \cdot \exp(-\lambda_i t), \quad (1)$$

где  $\rho_i$  - ядерная концентрация  $i$ -го элемента в материале,

$\varepsilon_{i,i}$  - доля  $i$ -го изотопа в  $i$ -ом элементе,

$\lambda_i$  - постоянная распада радионуклида, образовавшегося в результате активации  $i$ -го изотопа,

$F_{акт}^i(r)$  - относительная скорость активации  $i$ -го изотопа в точке  $r$ .

Относительная скорость активации  $i$ -го изотопа в точке  $r$  определяется следующим образом:

$$F_{акт}^i(r) = \sum_{j=1}^N \Phi^j(r) \sigma_{акт}^j, \quad (2)$$

где  $\Phi^j(r)$  - плотность потока нейтронов  $j$ -ой группы в точке  $r$ ,

$\sigma_{акт}^j$  - сечение активации  $i$ -го изотопа нейтронами  $j$ -ой группы,

$N$  – число энергетических групп нейтронов.

Полученные значения активности по каждому изотопу сравнивались с приведенными значениями в ОСПОРБ-99/2010 [2]. В результате было показано, что все величины находятся ниже предела, установленного данным нормативным документом. Следовательно, материалы нейтронного конвертера после назначенного срока эксплуатации 30 лет не относятся к категории РАО [6].

Таким образом, в рамках проектно-ориентированного обучения в НГТУ им. Р.Е. Алексеева студентами ИЯЭиТФ была разработана установка «Нейтронный конвертер», получен уникальный опыт проектирования, расчетно-теоретического обоснования с помощью современных программных кодов на всех этапах ее жизненного цикла, а так же опыт практической реализации конструкции.

### Список литературы

1. СанПиН 2.6.1.2523–09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902170553>, свободный. – Дата обращения: [07.12.2018]- 70 листов.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. В редакции Изменений № 1, утвержденных Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 16.09.2013 № 43.
3. Rhoades W.A. and Mynatt F.R. The DOT III Two Dimensional Discrete Ordinates Transport Code, ORNL/TM-4280, 1973.
4. Андреев Н.Г., Вавилкин В.Н. Разработка программы DOT-Activ для расчета источников и уровней излучения остановленного реактора в 2D-геометрии / ОКБМ, X российская научная конференция «Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях» М, 2015 г.
5. CASK, 40 Groups Coupled Neutron and Gamma ray Cross Section Data. RSIC Data Library DLC23, 1973.
6. Андреев В.В., Андреев Н.Г., Кувшинова А.А., Леванов С.Л., Худяков И.С. Расчетно-теоретическое обоснование конструкции нейтронного конвертера/ Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.- 2018.-№3 (122) – С. 37-45.

05.13.18

**В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.А. Бобров канд. техн. наук**

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
Институт электроники и светотехники,  
кафедра электроники и электротехники,  
Саранск, dubuch1995@mail.ru

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ДРОССЕЛЕЙ И ФИЛЬТРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРЁХФАЗНЫХ СЕТЯХ**

*Приведены результаты моделирования режимов работы корректора коэффициента мощности. Выполнен расчет параметров схемы. Построены графики зависимостей коэффициента мощности от входных индуктивностей и фильтрующих емкостей.*

Ключевые слова: *коэффициент мощности, Виенна-выпрямитель, корректор коэффициента мощности, входная сеть, PSIM.*

В настоящее время возрастают требования к качеству потребляемой электроэнергии. Принимаются различные стандарты по эмиссии гармонических составляющих тока, направленные на ограничение гармоник, отдаваемых в сеть и улучшение формы сетевого тока.

Использование трехфазного выпрямителя с активной коррекцией коэффициента мощности позволяет снизить или подавить гармоники потребляемого тока из-за возможности контроля тока каждой фазы, что приводит к улучшению качества сети и к снижению потерь на фильтрующих элементах.

Исследование особенностей работы силовой схемы выпрямителя Виенна, при различных параметрах L и C проводилось на его имитационной модели в программном пакете PSIM [1], представленной на рисунке 1.

В качестве источника используется блок переменного трехфазного напряжения 380 В, которое подается через повышающие дроссели и диоды на IGBT транзисторы.

Преобразованное напряжение поступает на фильтрующие конденсаторы, а затем на нагрузку [2].

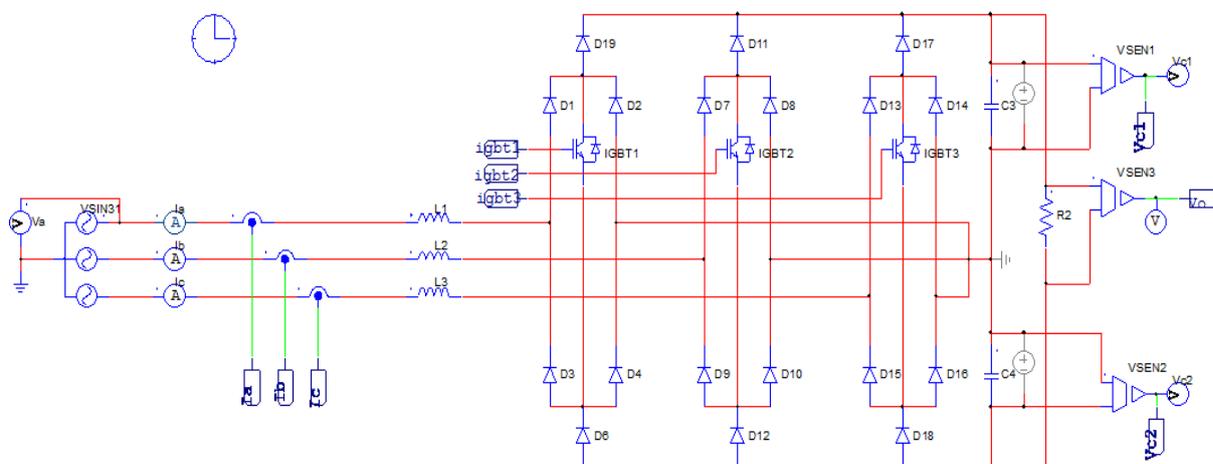


Рис. 1 – Модель активного выпрямителя Виенна

При исследовании функционирования схемы в номинальных режимах работы используются следующие значения: входное напряжение – 380 В; частота питающей сети – 50 Гц; стабилизируемое напряжение – 800 В; частота ШИМ – 10 кГц.

В статье исследуется модель выпрямителя Виенна мощностью

$P = 16$  кВт. Гармоника сетевого тока  $I_1$ , которая нужна для дальнейших расчетов входной индуктивности находится по формуле 1.

$$I_1 = \frac{P}{3U_\phi} = \frac{16 * 10^3}{3 * 220} = 24,25 \text{ A}, \quad (1)$$

где  $P$ -мощность,  $U_\phi$ - фазное напряжение.

Индуктивность повышающего дросселя должна быть выбрана такой, чтобы в течение периода работы транзистора через дроссель протекал ток, обеспечивающий наименьший коэффициент искажения входной сети [3,4]. Индуктивность дросселя рассчитывается по формуле 2.

$$L = \frac{k_p U_\phi}{2\pi f_{сети} I_1} = \frac{0,05 * 220}{2 * 3,14 * 50 * 24,25} = 1,5 \text{ мГн}, \quad (2)$$

где  $k_p$  — коэффициент регулирования, пропорциональный мощности нагрузки;  $f_{сети}$  - частота сети.

Пульсации напряжения в нагрузке определяет только вторая гармоника сетевого тока [5]. При заданном коэффициенте пульсации на нагрузке величина конденсатора  $C$  определяется по формуле 3.

$$C = \frac{k_{n2}}{2k_{н.н.} \pi f_{сети} R} = \frac{7,5\%}{2 * 2,5\% * 3,14 * 50 * 64} = 150 \text{ мкФ}, \quad (3)$$

где  $R$  – сопротивление нагрузки выпрямителя;  $k_{н.н.}$  - коэффициент пульсации на нагрузке;  $k_{n2}$  - коэффициент пульсации второй гармоники.

Пульсации напряжения на конденсаторах не только увеличивают напряжение, прикладываемое к ключам, но и могут вывести систему управления из устойчивого режима работы [6]. Для исключения этого необходимо увеличить емкость конденсаторов фильтра в несколько раз по сравнению с выражением 3 [7].

Коэффициент мощности равен коэффициенту искажения сети и находится по формуле 4.

$$\chi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{k_r}{k_p A}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,64}{0,05 * 400}\right)^2}} = 0,9919, \quad (4)$$

где  $k_r$  выбирается по методикам расчета, исходя из режима работы [ ] и в нашем случае равен 0,64.

Произведем моделирование имитационной модели корректора коэффициента мощности и построим графики зависимостей коэффициента мощности при различных параметрах входной индуктивности и фильтрующей емкости.

На рисунке 2 представлены графики тока и напряжения для фазы А совпадающих по фазе, форма и амплитуда фазных токов при номинальных параметрах схемы.

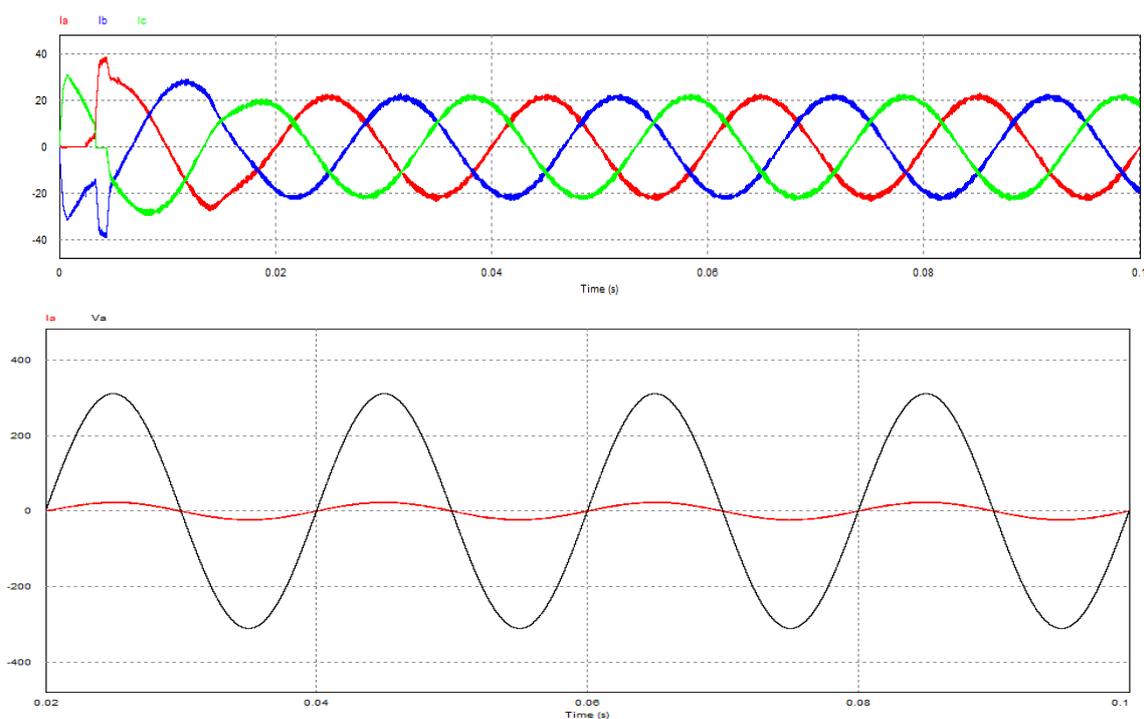


Рис. 2 – графики тока и напряжения для фазы А совпадающих по фазе, форма и амплитуда фазных токов при номинальных параметрах схемы

Было произведено исследование зависимости коэффициента мощности при различных значениях входной индуктивности и фильтрующей емкости, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость коэффициента мощности от значений индуктивности и емкости

Значение L, мГн	Значение $\cos \varphi$	Значение C, мкФ	Значение $\cos \varphi$
0,02	0,8012	1	0,9888
0,06	0,8254	50	0,9887
0,08	0,872	100	0,9907
0,1	0,8857	500	0,9904
0,3	0,9528	900	0,9884
0,5	0,9759	1600	0,9848
0,8	0,986	2000	0,9839
1	0,9863	3500	0,9701
1,2	0,9868	5000	0,9633
1,5	0,991		
1,8	0,9868		
2	0,9739		

Исходя из значений, представленных в таблице 1, получены зависимости коэффициента мощности от значений индуктивности и емкости, которые представлены на рисунках 3,4.

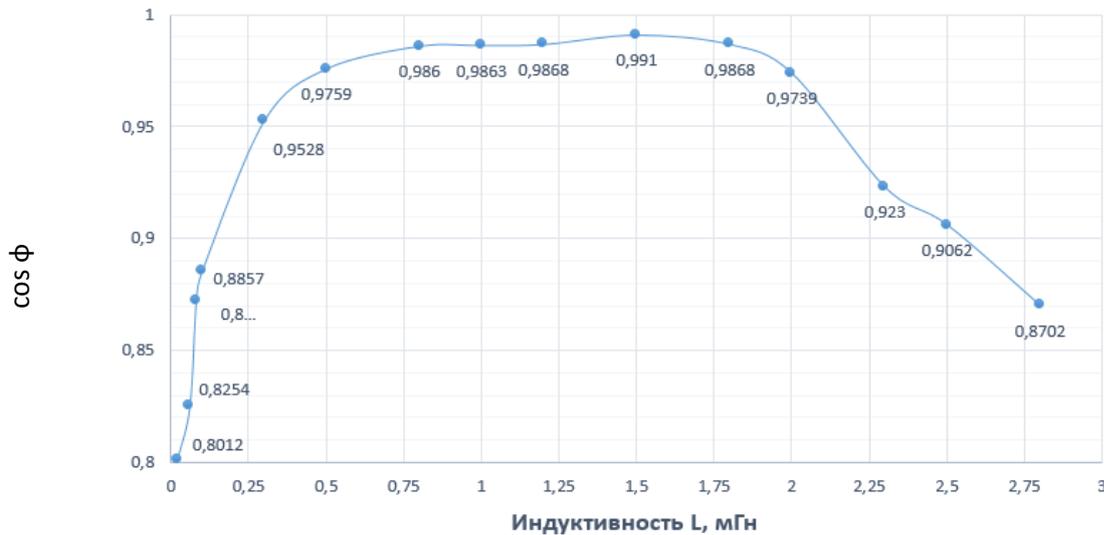


Рис. 3 – Зависимость коэффициента мощности от индуктивности

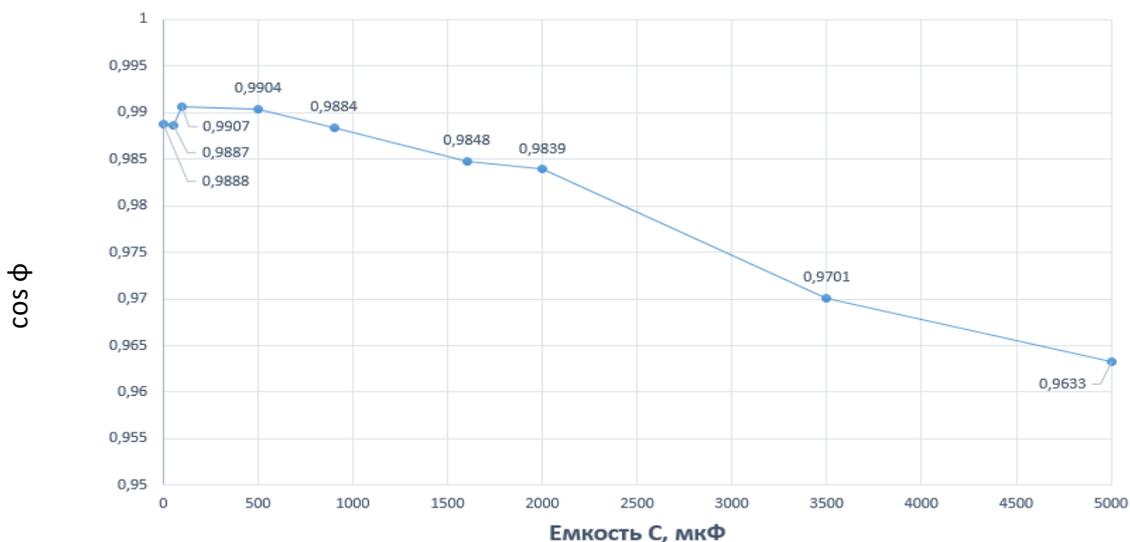


Рис. 4 – Зависимость коэффициента мощности от емкости

В результате исследования можно отметить диапазон индуктивностей, при которых форма токов и коэффициент мощности имеют наилучшие показатели  $0,5\text{ мГн} < L < 2\text{ мГн}$  и емкостей  $500\text{ мкФ} < C < 1000\text{ мкФ}$ .

В заключении можно сделать следующие выводы: при рациональном выборе параметров входных индуктивностей и фильтрующих емкостей использование корректора коэффициента мощности позволяет добиться высоких энергетических показателей и уменьшить искажения входной сети.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-48-130010.*

**Список литературы**

1. *Сидоренко В.Н.* Системно-динамическое моделирование в среде POWERSIM: Справочник по интерфейсу и функциям. – М.: МАКС-ПРЕСС, 2001. – 159 с.
2. *Кастров М.Ю., Герасимов А.А.* Однофазные корректоры коэффициента мощности в системах вторичного электропитания //ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 1. – С. 16-20.
3. *Зиновьев Г.С.* Основы силовой электроники: учебное пособие. Изд. 3-е. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – С. 144 – 149.
4. *Малаханов А. А.* Математическое моделирование импульсно-модуляционных систем с коррекцией коэффициента мощности: дис. канд. техн. наук: 05.13.18 Брянск, 2007. – С. 170-175.
5. *Баховцев И.А.* Построение трехфазного трехуровневого инвертора напряжения на базе квази-импедансного преобразователя: Научный вестник НГТУ. №4(53). 2013. – С. 144 –149.
6. *Чаплыгин Е.Е., Нгуен Хоанг Ан* Способы управления Виенна-выпрямителем // Практическая силовая электроника, № 21, 2006, – С1. 1-16.
7. *Kolar J.W., Ertl H.W., Zacc F.C.* Design and experimental investigation of a three-phase high power density high efficiency unity power factor PWM (Vienna) rectifier employing a novel integrated power semiconductor module. IEEE Transactions on Plasma Science. V. 32. No.5. 2004. P. 2026 -2031.

05.13.01

**Л.З. Гумерова канд. педагог. наук**

Набережночелнинский государственный педагогический университет,  
факультет математики и информатики,  
кафедра информатики и вычислительной математики,  
Набережные Челны, gum9370@mail.ru

**ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ  
В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ»  
ДЛЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ**

*В работе проанализированы основные сервисы Google Apps for Education и возможности их применения в процессе обучения студентов по дисциплине «Информационные технологии в профессиональной деятельности» педагогических направлений подготовки, предложен современный подход к организации лабораторных занятий.*

Ключевые слова: *Google Apps for Education, Google Classroom, Google Диск, Google форма.*

Облачные технологии являются одним из перспективных направлений современных информационно-коммуникационных технологий. Они представляют собой технологии распределенной обработки цифровых данных, с помощью которых компьютерные ресурсы предоставляются интернет-пользователю как онлайн-сервис» [1].

Среда Google предоставляет много инструментов, которые могут оказаться полезными не только для индивидуальной деятельности пользователя. Использование облачных технологий в образовании помогают найти новые педагогические и организационные решения учебных ситуаций, а сам процесс обучения становится открытым для всех участников учебного процесса. В работе [2] рассматривались возможности преобразования в педагогический инструмент таких сервисов, как Google Диск, Google-документ, Google-таблица и Google-презентации. В статье рассматриваются вопросы создания виртуального класса средствами Google.

Google Apps for Education является инструментом построения информационно-образовательной среды в образовательном учреждении, включая, и почтовый сервис, и облачное хранилище, также сервисы по созданию документов, таблиц, сайтов и презентаций [3].

При создании школьного аккаунта в Google Apps for Education пользователи получают много бонусов [4]. Приведем лишь некоторые из них: доступ к Google Classroom; получение почтового школьного домена; увеличенный объем места внутри Gmail и Drive; отсутствие рекламы; безопасность передачи и хранения данных; администрирование всех созданных в домене аккаунтов.

При использовании Google Apps for Education мы получаем эффективный инструмент для администраторов, учителей, учеников и родителей. Поскольку продукт нацелен на все образовательное учреждение, предполагается регистрация школьного аккаунта на ответственное лицо, обычно это директор. Внутри этого аккаунта создаются уже аккаунты учителей, учеников с разными правами доступа. Например, полный доступ к управленческой информации имеют директор и завучи, учителя и ученики имеют доступ к инструментам совместной деятельности, а родители получают новостную рассылку от учителей.

На первом этапе выполнения лабораторных работ по дисциплине «Информационные технологии в профессиональной деятельности» студенты выполняют лабораторные работы со следующими заданиями:

- Создание аккаунта Google, использование Почтового сервиса Gmail.com, Google Диск. Предоставление доступа к некоторым документам своим одноклассникам, возможность просмотра, скачивания, редактирования и комментирования общих материалов.
- Использование возможности сервиса обмена сообщениями Google Hangouts, создание фотогалерею Google, создание формы Google (анкеты и тесты), создание презентации Google
- Создание фотогалереи Picasa, создание своего сайта средствами Google.

На втором этапе обучающиеся должны создать виртуальный класс с помощью Сервиса Класс (classroom). Данный сервис, как и Gmail, Диск и Документы, входит в пакет бесплатных сервисов Google Apps for Education. В своем Классе студенты должны разместить материалы по какому-нибудь разделу учебного предмета, разместить тесты и задания, которые будут создаваться и проверяться задания в электронной форме. В результате проверки теста или контрольного задания учитель должен получить анализ выполнения теста по классу в табличной форме и в виде графиков. Задания при этом автоматически систематизируются в папках на Диске.

Пример выполнения лабораторной работы по созданию виртуального класса (рис.1).

Учитель должен уметь организовать самостоятельную работу в Классе. На странице заданий видно, какое упражнение нужно выполнить учащимся. Им достаточно выбрать задание, чтобы приступить к его выполнению.

Для прохождения нового материала студент подключил к классу элективный ресурс, разработанный на HTML языке (Рис.2). К каждому уроку была разработана дополнительная страница с вопросами по пройденному материалу.

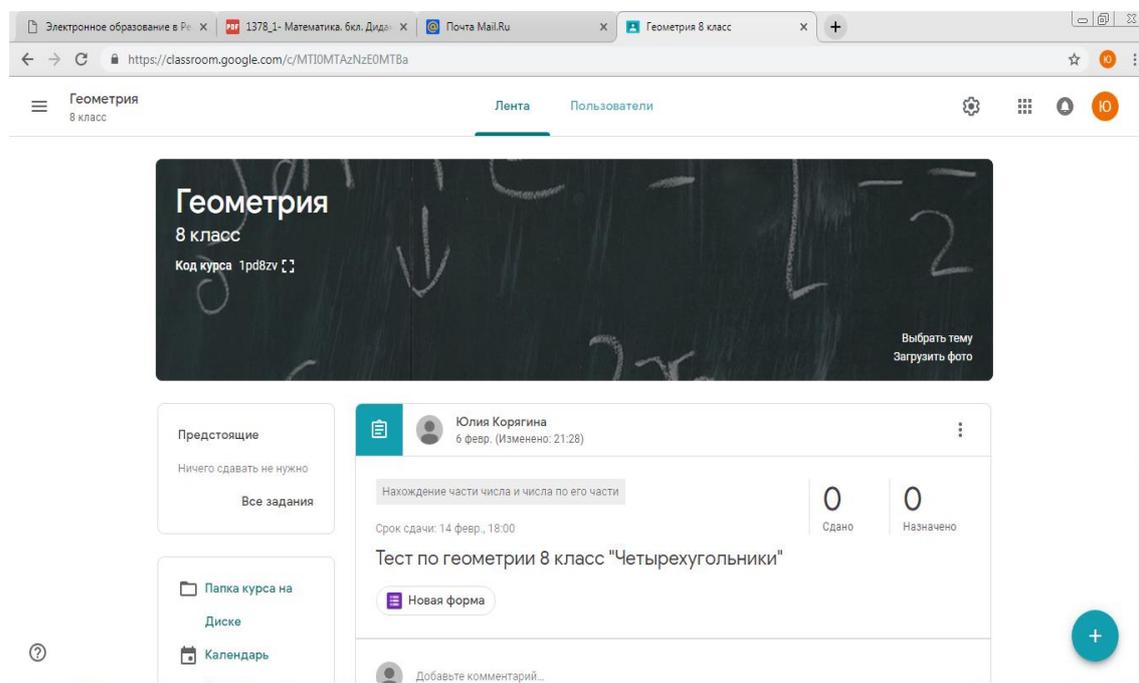


Рис. 1- Страница класса

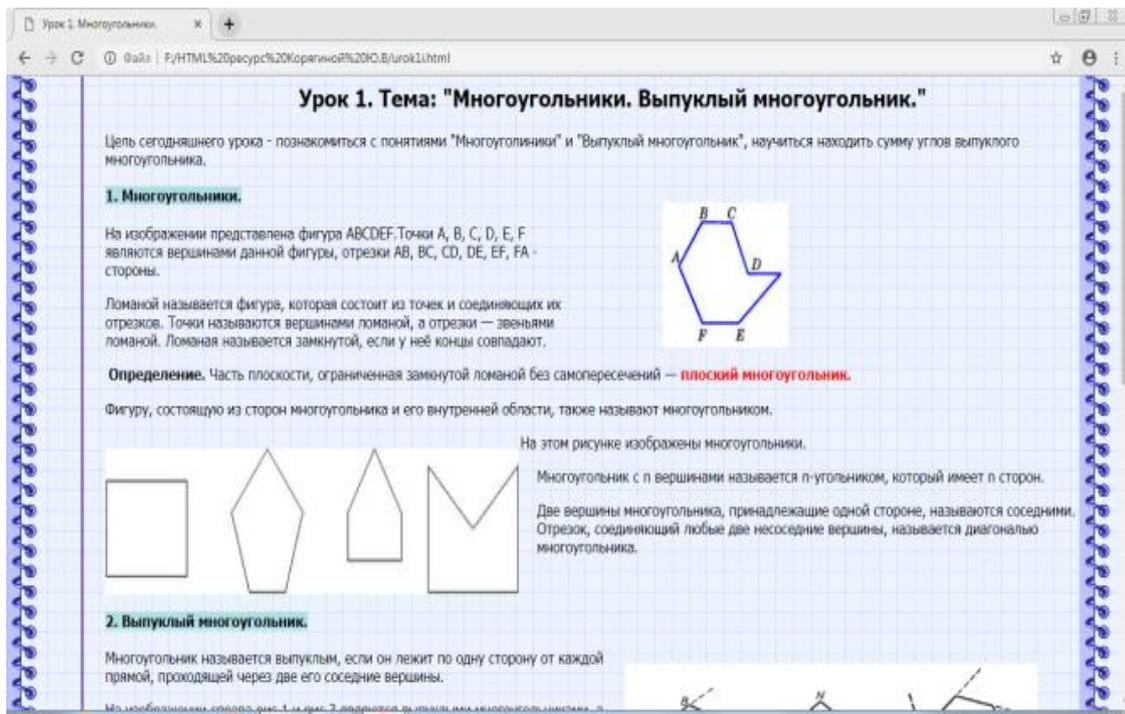


Рис. 2- Пример урока

Студент, создавший Класс, может добавлять пользователей (учащихся) или предоставляет им код для регистрации в качестве учеников.

Учащиеся данного класса могут видеть на странице задания, какие работы еще не сданы, а новые материалы раздела предмета автоматически добавляются в их папки на Google Диске (Рис. 3). Информация обновляется в режиме реального времени.

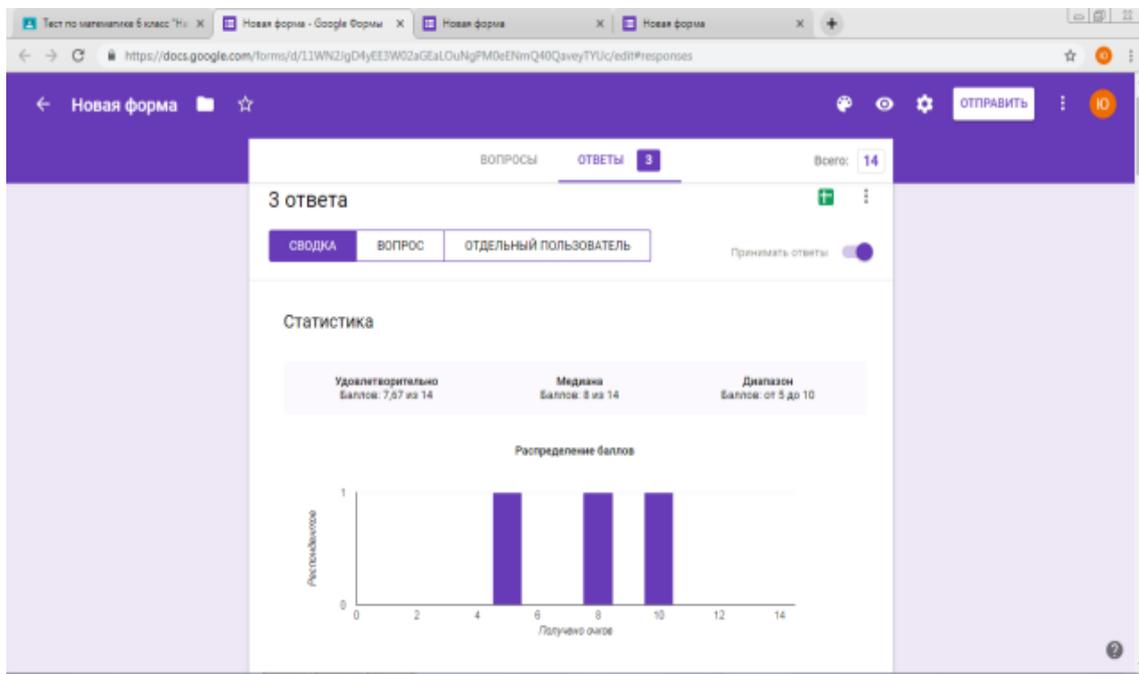


Рис. 3- Сводка по результатам теста

Заключительное задание для студентов – организация рассылки в классе. Это могут быть результаты самостоятельной работы или какие-нибудь объявления для родителей.

Опыт использования облачных технологий является одной из новых форм организации совместной работы обучающихся и преподавателя, а так же расширяет методические возможности образовательного процесса, являясь эффективным инструментом построения индивидуальной траектории обучения.

**Список литературы**

1. Тренинг «Облачные технологии для обеспечения хранения и обработки данных, организация взаимодействия» [Электронный ресурс] / Веб-сайт. Режим доступа: <http://manualgoogledrive.blogspot.ru/>
2. *Аглямзянова Г.Н., Гумерова Л.З., Сиразева, Д.Ф.* Опыт использования облачных сервисов в преподавании предмета «численные методы» для педагогических направлений подготовки // *Международный журнал перспективных исследований.* 2018 . Т. 8, № 1-2, с. 7-13
3. *Латинов О.О., Храпов С.Д., Графова Н.С., Старичихин М.Г.* Применение облачных технологий в образовательном процессе ( на примере GOOGLE APPS FOR EDUCATION) [Электронный ресурс] / Веб-сайт. Режим доступа [http://issledo.ru/wp-content/uploads/2017/02/Sb\\_k-1-2.pdf](http://issledo.ru/wp-content/uploads/2017/02/Sb_k-1-2.pdf)
4. Как использовать Google Apps в школе? [Электронный ресурс] / Веб-сайт. Режим доступа: <https://newtonew.com/school/kak-ispolzovat-google-apps-v-shkole>
5. *Новикова, Н.В.* Разработка обучающего курса с помощью пакета сервисов Google Apps [Электронный ресурс] / Веб-сайт. Режим доступа: [http://ripo.unibel.by/assets/masterstvo\\_online/docs/6/1\\_11.pdf](http://ripo.unibel.by/assets/masterstvo_online/docs/6/1_11.pdf)
6. *Газейкина А.И., Кувина А.С.* Применение облачных технологий в процессе обучения школьников // *Народное образование.* 2012. № 6. С. 55.
7. *Катунцов Е.В.* Созданий условий для повышения профессиональной компетентности преподавателя вуза в области информационных технологий // *Материалы XX Международной научно-методической конференции «Современное образование: содержание, технологии, качество», 23 апреля 2014 г. Том 1. СПб., 2014. С. 122.*

05.13.00

**В.Н. Дюпин**

Саровский физико-технический институт,  
филиал «Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,  
факультет информационных технологий и электроники,  
кафедра вычислительной и информационной техники,  
Саров, rehcraser@mail.ru

### **МОДЕЛЬ ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА**

*В работе содержится обзор систем виртуальной реальности. Представлена модель виртуального адаптационного пространства. Содержится описание коммунитатора виртуального пространства. Приведен пример погружения объектов в виртуальное пространство.*

Ключевые слова: *виртуальная реальность, дополненная реальность, виртуальное адаптационное пространство.*

Современное общество активно развивается за счет модернизации информационных технологий и средств вычислительной техники. Инновации в сфере информационных технологий позволили моделировать физические процессы окружающей среды в виртуальном пространстве.

Виртуализация окружающих процессов позволила создать искусственный мир, проецируемый на каналы восприятия человека за счет средств вычислительной техники – виртуальную реальность. Синтез виртуальной реальности и систем реального времени позволил создать гибридную технологию дополненной реальности.

Известны устройства Microsoft HoloLens и технология дополненной реальности HoloAnatomy, реализующие виртуальное образовательное пространство медицинских высших учебных заведений [1]. Технология HoloAnatomy позволяет студентам взаимодействовать с 3D макетом человеческого тела в виртуальном пространстве – перемещать макет в пространстве, вращать отдельные детали макета, масштабировать сегменты виртуального представления.

В сфере военного направления известны устройства Google Glass и технология виртуального баллистического калькулятора Precision Guided Firearm (PGF) компании TrackingPoint созданная в рамках проекта HUD 3.0 для обучения военных США [2]. Технология PGF позволяет военнослужащему осуществлять динамическую корректировку прицела. Комплексные технологии дополненной реальности помогают правительству США сэкономить существенную часть бюджетных средств, выделяемых на транспортировку солдат и проведение военных учений.

Для навигации в окружающем пространстве и измерения размеров окружающих объектов известна технология дополненной реальности AirMeasure компании LaanLabs [3].

Общий подход технологий виртуальной и дополненной реальности заключается в создании математической модели виртуального мира, погружения окружающих объектов в виртуальный мир с использованием специальных устройств, взаимодействия с виртуальными объектами и проецирование этого взаимодействия на каналы восприятия человека. В части дополненной реальности наиболее распространенным является воздействие на визуальный канал восприятия [4].

Существенным недостатком систем виртуальной и дополненной реальности является отсутствие осязательного восприятия объектов виртуальной реальности.

К прочим недостаткам систем виртуальной и дополненной реальности следует отнести быструю утомляемость глаз пользователя, вызванную чрезмерной нагрузкой на визуальный канал восприятия, необходимость близкого взаимодействия с объектами, погружаемыми в виртуальную реальность, высокая цена оборудования виртуальной реальности.

В данной статье предложена комплексная модель адаптации пользователя к дополненной реальности путем динамического воздействия на визуальный, акустический и осязательный канал восприятия пользователя – модель виртуального адаптационного пространства.

Для погружения объектов в виртуальное адаптационное пространство (ВАП) используется коммуникатор ВАП, состоящий из дальномера, модуля управления, фокусирующего модуля и модуля проекции. Модуль управления осуществляет построение математической модели окружающего пространства за счет погружения окружающих объектов в ВАП и проекции виртуальных объектов на каналы восприятия пользователя. Фокусирующий модуль осуществляет пространственный поворот дальномера. Модуль проекции осуществляет отображение виртуальных объектов на акустический и осязательный каналы восприятия.

Рассмотрим модель ВАП на примере участка березовой рощи (см. рис.1).



Рис. 1 – Исследуемая область

Для погружения объектов в ВАП коммуникатор ВАП осуществляет построение двумерной поверхностной регулярной сетки окружающего пространства путем сегментации пространства по вертикали и горизонтали на одинаковое количество сегментов. Каждый сегмент образует ячейку двумерной регулярной сетки.

На рисунке 2 представлен вариант сегментации березовой рощи на 6 частей по горизонтали и вертикали. Границы сегментов выделены красным цветом.

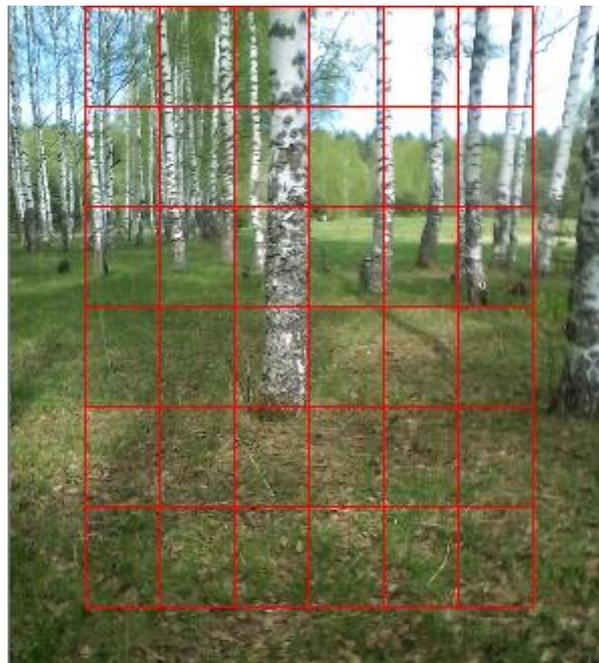


Рис. 2 – Результат сегментации исследуемой области

С помощью дальномера коммуникатор ВАП назначает пространственные характеристики узлам ячеек сетки и осуществляет смещение узлов сетки на соответствующее расстояние от наблюдателя.

На рисунке 3 представлены вариации видов двумерной сетки, полученной путем сегментации исследуемой области и пространственного узлов. смещения узлов.

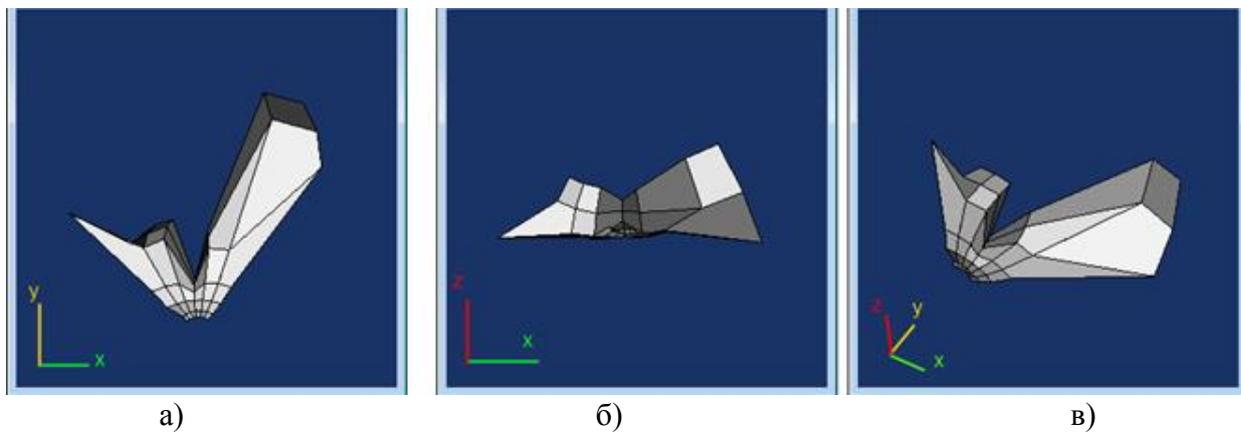


Рис. 3 – Виды регулярной сетки: а) сверху; б) спереди; в) изометрический

Выделение объектов ВАП осуществляется путем разбиения регулярной сетки на подмножества ячеек по критерию допустимого угла отклонения нормали ячейки, образующих контуры объектов ВАП.

На рисунке 4 представлен вариант разбиения сетки на объекты, выделенные зеленым, красным, желтым, синим, лазурным и черным маркерами.

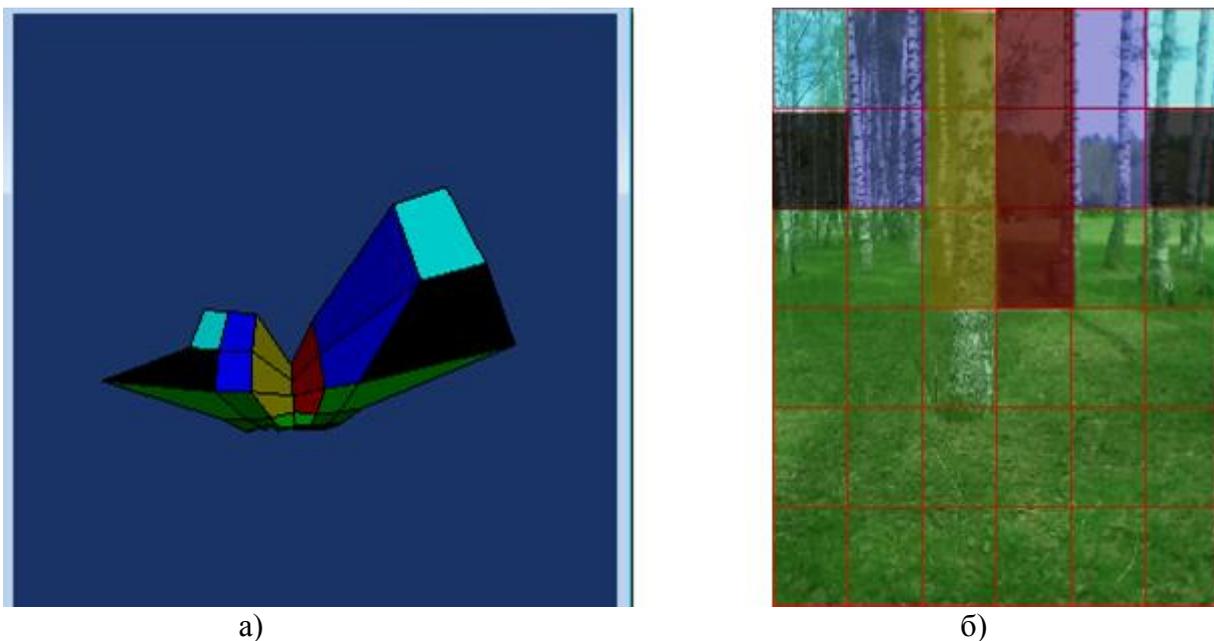


Рис.4 – Разбиение регулярной сетки на подобласти объектов: а) сетка; б) эквивалент исследуемой области

Контуры полученных объектов ВАП проецируются коммуникатором ВАП по отдельности с использованием вибрационного воздействия для восприятия границ объектов и акустического воздействия для восприятия расстояний до объектов.

#### ***Список литературы***

1. <https://www.microsoft.com/ru-ru/p/holoanatomy/9nblggh4ntd3>
2. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2018-09-21/magic-leap-is-bidding-on-an-army-combat-contract>
3. <http://armeasure.com/>
4. Дюпин В.Н. Комплексная процессная модель архитектуры предприятия как эффективный инструмент управления // Сборник материалов XII Всероссийской молодежной научно-инновационной школы. – Саров: Интерконтакт, 2018. – С. 11-12.

05.13.18

**Т.И. Епанчинцев**

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН,  
Уральский федеральный университет,  
кафедра высокопроизводительных компьютерных технологий,  
Екатеринбург, eti@imm.uran.ru

## **ОТКРЕПЛЕНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ОТ НЕВОЗБУДИМОГО ПРЕПЯТСТВИЯ В ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ МИОКАРДА С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СТИМУЛЯЦИИ**

*В работе представлено исследование открепления и вытеснения спиральной волны от невозбудимого препятствия в двумерной модели Алиева-Панфилова с помощью метода низковольтной высокочастотной стимуляции. Были использованы точечный и линейный электроды. Форма невозбудимого препятствия варьировалась.*

Ключевые слова: моделирование сердца, невозбудимые препятствия, спиральная волна, высокочастотная стимуляция.

### **Введение**

Сердечная ткань, как и любая другая возбудимая среда, поддерживает автоволновые процессы, которые могут принимать форму спиральных волн. Появление спиральных волн электрического возбуждения в миокарде приводит к приступообразной тахикардии или фибрилляции; эта аритмия может поражать как верхние камеры сердца (фибрилляция предсердий), так и нижние (фибрилляция желудочков). Несмотря на то, что при фибрилляции предсердий сердце может продолжать выполнять свою функцию, при фибрилляции желудочков необходимо немедленное лечение.

Миокард не является однородным, так как он содержит структуры с различными свойствами возбудимости, а также может содержать полностью невозбудимые элементы. Например, верхняя полая вена правого предсердия, небольшие сосуды внутри миокарда и фиброз ткани после инфаркта. В патологических ситуациях такие препятствия могут сыграть значительную роль в процессе распространения волны возбуждения. Невозбудимые регионы могут служить центром, вокруг которого может вращаться ядро спиральной волны. Проведенные исследования показывают, что вращение ядра вокруг препятствия может быть результатом «закрепления» [1].

Наиболее интересным методом лечения аритмии является низковольтная высокочастотная стимуляция (НВС). Проведенные исследования в вычислительной кардиологии [2], а также в реальных лабораторных исследованиях [3] подтверждают эффективность метода НВС в однородных возбудимых средах.

Целью данной работы является исследование влияния формы электрода и режима стимуляции на успех открепления спиральной волны от невозбудимого препятствия в феноменологической модели сердечной клетки. Кроме того, после открепления необходимо вытеснить спиральную волну на границу вычислительной области. Важной характеристикой метода НВС является эффективность и безопасность стимуляции — после применения внешней стимуляции миокард должен остаться чистым и не содержать побочных спиральных волн.

### **Модель и методы**

В данной секции описывается модель сердечной клетки и миокарда, протоколы стимуляции, параметры модели и численный метод, который был использован.

Мы использовали феноменологическую безразмерную модель Алиева-Панфилова [4] (АП). Распространение электрического сигнала в миокарде описывается согласно системе реакции-диффузии:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad } u) - ku(u - a)(u - 1) - uv + I_{\text{stim}}(x, y, t),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \epsilon(u)(ku - v), \quad \text{где } \epsilon(u) = \begin{cases} 1, & \text{если } u < a; \\ \eta, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$u(x, y, t)$  – трансмембранный потенциал в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ .  $I_{\text{stim}}(x, y, t)$  – внешний стимулирующий ток. Для моделирования анизотропной проводимости вдоль волокон миокарда мы использовали анизотропный диффузионный тензор  $D$  с декартовыми компонентами  $D^{ij} = D_a \delta_{ij} + (D_f - D_a) \bar{w}^i \bar{w}^j$ ,  $i, j = 1, 2$ , где  $\delta_{ij}$  – символ Кронекера и  $\bar{w} = \bar{w}(\varphi) = (\cos \varphi, \sin \varphi)$  – единичный вектор направления волокна. Известно, что распространение электрической волны вдоль волокна, быстрее, чем поперек него, поэтому  $D_f > D_a$ , где  $D_f$  – коэффициент диффузии вдоль волокна, а  $D_a$  – поперек него. В работе использовались  $D_f = 3$  и  $D_a = 1$ . Направление волокон параллельно нижней стороне квадрата ( $\varphi = 0$ ). На границах вычислительной области и на границах препятствия были использованы условия нулевого потока  $\vec{n} \cdot D \text{grad } u = 0$ , где  $\vec{n}$  – локальный нормальный вектор. В качестве численного метода использовался явный метод Эйлера с шагом по времени  $dt = 0.008$ . Расчет диффузии в пространстве производился по девяти точкам с шагом  $dx, dy = 0.5$  на вычислительной сетке  $200 \times 200$  узлов. Были использованы следующие параметры модели АП:  $\eta = 0.1, a = 0.05, k = 8$ . Во всех экспериментах спиральная волна генерировалась по протоколу S1S2 [5]. Внешняя стимуляция подавалась с момента времени  $t_0 = 500$  модельных единиц (МЕ).

В качестве источников внешней стимуляции использовались две формы электродов: точечный и линейный с координатами  $x < 5$  МЕ,  $y < 5$  МЕ и  $x < 5$  МЕ соответственно.

### **Результаты**

В качестве невозбудимых препятствий было выбрано 2 прямоугольника и 1 квадрат с периметром равным 16 узлам вычислительной сетки (8 МЕ). Параметры выбранных препятствий:  $4 \times 12$ ,  $12 \times 4$  и  $8 \times 8$  узлов. Препятствие помещалось в центр вычислительной области, а спиральная волна создавалась так, чтобы она была сразу прикрепленной к нему. В ходе исследований периода вращения спирали обнаружено, что в анизотропной области без препятствий период равен  $T = 15.4$  МЕ. Вокруг препятствий  $4 \times 12$ ,  $12 \times 4$  и  $8 \times 8$  период равен 21.3 МЕ, 19.1 МЕ и 20.2 МЕ соответственно, а в изотропной области он составил  $T = 17.9$  МЕ для всех размеров препятствий. Такая разница в периодах в анизотропном случае объясняется тем, что волна возбуждения проходит быстрее вдоль волокон, чем поперек них. В нашем случае чем выше размер препятствия по оси  $oY$ , тем выше период.

На рисунке 1 проиллюстрирована динамика и открепление спиральной волны от препятствия под воздействием внешней стимуляции с линейного электрода, который выделен оранжевым цветом. Препятствие  $4 \times 12$  выделено красной рамкой. Черная точка указывает на кончик спиральной волны, с помощью которой можно отслеживать ее перемещение. На рисунке 1а изображена спиральная волна, прикрепленная к препятствию в момент  $t = 500$  МЕ. Рисунок 1б демонстрирует начальный этап стимуляции в момент  $t = 501$  МЕ. На рисунке 1в изображен момент, когда волны от электрода достигают кончика спиральной волны в момент  $t = 571$  МЕ. Рисунок 1г изображает момент  $t = 617$  МЕ, когда спиральная волна открепилась от препятствия и начала дрейфовать к правой границе вычислительной области и в момент  $t = 735$  МЕ она исчезла.

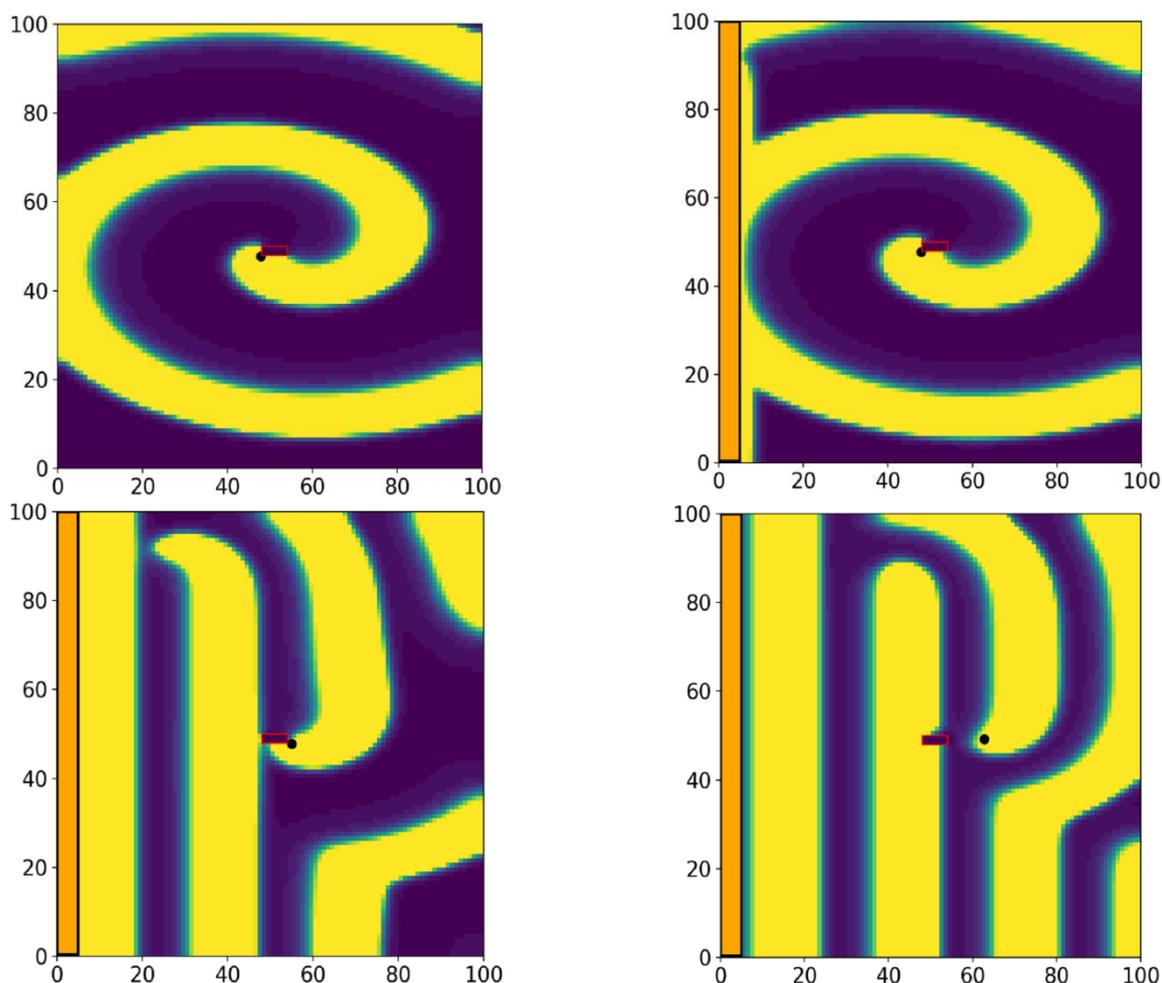


Рис. 1- Продвижение плоских волн от линейного электрода и открепление спиральной волны от препятствия

Таблица – Результаты открепления и вытеснения спиральной волны

		4x12		12x4		8x8	
		Электрод					
		1	2	1	2	1	2
Период стимуляции	10	+	+	+	+	+	+
	10,5	+	+	+	+	+	+
	11	+	+	+	+	+	+
	11,5	+	+	+	+	+	+
	12	+	-	+	-	+	-
	12,5	+	-	+	-	+	-
	13	+	-	+	-	+	-
	13,5	+	-	+	-	+	-
	14	+	-	+	-	+	-
	14,5	+	-	+	-	+	-
	15	+	-	+	-	+	-
	15,5	-	-	-	-	-	-

Следующей задачей являлось прекратить стимуляцию так, чтобы после нее не осталось побочных спиральных волн. Было обнаружено, что существует такой минимальный безопасный период, который не дает побочных волн на препятствии. Для линейного

электрода такой период равен  $T=14$  МЕ, а для точечного  $T=11$  МЕ. Поэтому, после того, как спиральная волна исчезла, период стимуляции постепенно изменялся до безопасного, а затем стимуляция прекращалась. Результаты проведенных вычислительных экспериментов для различных препятствий и электродов представлены в Таблице. Точечный и линейный электроды обозначены 1 и 2 соответственно. Знак “+” означает, что открепление, последующее вытеснение и выход на безопасный период были успешными, а знак “-” – не успешными.

По результатам таблицы видно, что точечный электрод значительно эффективнее, чем линейный. Также можно заметить, что форма препятствия не влияет на эффективность открепления. Для линейного электрода интервал эффективных периодов стимуляции 10-11.5 МЕ, для точечного 10-15.5 МЕ.

#### **Обсуждение и выводы**

Проведенное исследование позволяет оценить эффективность метода НВС в применении к откреплению спиральных волн от невозбудимых препятствий. Определено, что период спиральной волны в анизотропном миокарде зависит от расположения препятствия: чем больше длина препятствия поперек волокон, тем период выше. Однако, в изотропном миокарде форма препятствия не имеет значения.

Длина интервалов периодов эффективной стимуляции равна 1.5 МЕ и 5 МЕ для линейного и точечного электродов соответственно. Поэтому можно сделать вывод, что точечный электрод эффективнее линейного для всех исследованных форм препятствия.

В дальнейшем планируется исследовать открепление от препятствий другой формы и размера, а также рассмотреть случай, когда их в миокарде два и более. Также важно провести исследования откреплений на более сложных ионных моделях, например модели тен Тюссер-Панфилова [6] или модели Луо-Руди [7].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00370.*

#### **Список литературы**

1. A.V. Panfilov u J.P. Keener, «Effects of high frequency stimulation on cardiac tissue with an inexcitable obstacle» Journal of theoretical biology, т. 163, № 4, pp. 439-448, 1993.
2. S.F. Pravdin, T.V. Nezlobinsky u A.V. Panfilov, «Modelling of low-voltage cardioversion using 2D isotropic models of the cardiac tissue» в 2017 Days on Diffraction (DD), St. Petersburg, 2017.
3. B.J. Caldwell, M.L. Trew u A.M. Pertsov, «Cardiac Response to Low-Energy Field Pacing Challenges the Standard Theory of Defibrillation» Circulation: Arrhythmia and Electrophysiology, т. 8, № 3, pp. 685-693, 2015.
4. R.R. Aliev u A.V. Panfilov, «A Simple Two-variable Model of Cardiac Excitation» Chaos, Solitons and Fractals, т. 7, № 3, pp. 293-301, 1996.
5. K. Nakazawa u others, Clinical Application of Computational Mechanics to the Cardiovascular System, Tokyo: Springer Tokyo, 2000.
6. K.H. W. J. ten Tusscher u A. V. Panfilov, «Alternans and spiral breakup in a human ventricular tissue model» American journal of physiology. Heart and circulatory physiology, т. 291, № 3, pp. H1088-H1100, 2006.
7. C.H. Luo u Y. Rudy, «A model of the ventricular cardiac action potential. Depolarization, repolarization, and their interaction» Circulation Research, т. 68, № 6, pp. 1501-1526, 1991.

05.13.17

**Н.А. Мунасыпов канд. физ.-мат. наук**

Оренбургский государственный педагогический университет,  
кафедра математического анализа и методики преподавания математики,  
Оренбург, nail.munasyrov@mail.ru

### **ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ С АДДИТИВНЫМ КРИТЕРИЕМ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

*В работе рассмотрена задача распределения ограниченных ресурсов в системе распознавания и идентификации объектов, причём эффективность функционирования системы описывается аддитивным критерием. Сформулированная постановка задачи представляет собой задачу математического программирования, и в качестве метода решения предложен метод динамического программирования.*

*Ключевые слова: система распознавания, распределение ресурсов, метод динамического программирования, оптимальное управление.*

Система распознавания объектов представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для определения признаков распознаваемых объектов. Пусть  $x_j$  – признаки объектов,  $S_j$  – технические средства, предназначенные для определения соответствующих признаков  $x_j$  (допустим при этом, что каждое техническое средство предназначено для определения только одного признака, и каждый признак может быть определён только одним из средств). Пусть  $F(t) = F(f_1(t_1), f_2(t_2), \dots, f_N(t_N))$  – критерий эффективности системы распознавания, где  $f_j(t_j)$  – эффективность при вложении ресурсов  $t_j$  на средства  $S_j$ . Допустим, что функция  $F(t)$  является аддитивной, то есть  $F(t) = \sum_{j=1}^N f_j(t_j)$ . Поставим задачу: распределить ограниченное количество ресурсов  $T_0$  по средствам  $S_j$  так, чтобы критерий эффективности принял максимальное значение. Постановка задачи приводит к модели математического программирования:

$$F(t) = \sum_{j=1}^N f_j(t_j) \rightarrow \max \quad (1)$$

при ограничении

$$\sum_{j=1}^N t_j = T_0, j = \overline{1, \dots, N}. \quad (2)$$

Для решения данной задачи (1)-(2) может быть применён метод динамического программирования (ДП). Опишем сущность метода ДП применительно к рассматриваемой задаче [1]. Процесс выделения ресурсов на средства  $S_j$  можно рассмотреть как поэтапный (динамический) процесс, при этом каждому  $S_j$  приписывается номер, соответствующий этапу, в процессе которого на определение соответствующего признака выделяются определённые ресурсы. Для каждого шага находим условный оптимальный выигрыш, если к данному шагу имеется запас ресурсов  $C$ . Обозначим  $F_k(C)$  – условный оптимальный выигрыш;  $t_k(C)$  – соответствующее ему условное оптимальное управление (то есть средства, вкладываемые в  $S_k$ ). По принципу оптимальности Беллмана имеем

$$F_k(C) = \max_{t \leq C} \{f_k(t) + F_{k+1}(C - t)\}. \quad (3)$$

Оптимизацию начинаем с последнего шага, то есть шага, при котором  $k = N$ . Условное оптимальное управление на последнем шаге имеет вид  $t_N(C) = C$ , а условный оптимальный выигрыш  $F_N(C) = f_N(C)$ . Тогда последний шаг оптимизирован, и переходим к рассмотрению предпоследнего шага. Условный оптимальный выигрыш на двух последних шагах равен

$$F_{N-1}(C) = \max_{t \leq C} \{f_{N-1}(t) + F_N(C - t)\}.$$

Максимум этого выражения достигается при некотором значении  $t$ , которое и есть

условное оптимальное управление на  $(N - 1)$ -ом шаге. Рассуждая аналогично, оптимизируем  $(N - 2)$  –й шаг,  $(N - 3)$  –й шаг, и т.д. Тем самым подойдём к первому шагу (при  $k = 1$ ), и получим:

$$F_1(T_0) = \max_{t \leq T_0} \{f_1(t) + F_2(T_0 - t)\} = F^*.$$

Разворачивая процесс оптимизации в обратную сторону (от первого шага к последнему), последовательно находим оптимальные управления на всех шагах.

Проиллюстрируем этот процесс на конкретном численном примере. Допустим, что задана система распознавания объектов, характеризуемых шестью признаками, и для определения этих признаков имеются соответствующие технические средства  $S_j, j = \overline{1, \dots, 6}$ . Допустим также, что в каждое средство может быть выделено определённое количество ресурсов, общий запас которых составляет  $T_0 = 20$ , и пусть известны значения эффективностей  $f_j(t_j)$ , приведённые ниже в таблице 1. Предположим для простоты, что вкладываемые ресурсы принимают лишь целочисленные значения. Математическая модель задачи (1)-(2) принимает вид:

$$F(t) = \sum_{j=1}^6 f_j(t_j) \rightarrow \max$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^6 t_j = 20, j = \overline{1, 6}; \text{ где } t_j \in Z.$$

Таблица 1 – Значения эффективностей вкладываемых ресурсов

$t$	$f_1(t)$	$f_2(t)$	$f_3(t)$	$f_4(t)$	$f_5(t)$	$f_6(t)$
0	0	0	0	0	0	0
1	4	6	3	4	3	5
2	5	9	5	8	6	8
3	8	11	7	11	8	11
4	10	13	10	14	10	13
5	13	14	12	16	12	15
6	15	15	14	18	15	17
7	17	16	15	19	17	18
8	18	16	16	19	19	19
9	19	16	16	20	21	20
10	21	16	16	20	22	21
11	22	17	16	20	23	22
12	22	17	16	21	23	22
13	23	17	16	21	24	22
14	23	17	16	21	25	22
15	23	17	16	21	25	22
16	23	17	16	21	25	22
17	23	17	16	21	25	22
18	23	17	16	21	25	22
19	23	17	16	21	25	22
20	23	17	16	21	25	22

Результаты условной оптимизации и всех вычислений согласно равенству (3) приведены в таблице 2. В первом столбце этой таблицы указаны значения  $C$ , то есть те предположительные запасы ресурсов, с которыми подходим к данному определённому шагу оптимизации. Далее в таблице приведены шесть пар столбцов, соответствующих номеру шага, причём значение  $t_k = t_k(C)$  есть условное оптимальное управление, а  $F_k = F_k(C)$  есть условный оптимальный выигрыш.

Таблица 2 – Результаты условной оптимизации методом ДП

C	k = 6		k = 5		k = 4		k = 3		k = 2		k = 1	
	$t_6$	$F_6$	$t_5$	$F_5$	$t_4$	$F_4$	$t_3$	$F_3$	$t_2$	$F_2$	$t_1$	$F_1$
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1	1	5	0	5	0	5	0	5	1	6		
2	2	8	0;1	8	1	9	0	9	1	11		
3	3	11	0-2	11	2	13	0	13	1	15		
4	4	13	1;2	14	2;3	16	0;1	16	1	19		
5	5	15	2	17	2-4	19	0;1	19	1;2	22		
6	6	17	2;3	19	2-4	22	0;1	22	1;2	25		
7	7	18	2-4	21	2-4	25	0;1	25	1;2	28		
8	8	19	2-6	23	3;4	28	0;1	28	1;2	31		
9	9	20	6	26	4	31	0;1	31	1;2	34		
10	10	21	6;7	28	4;5	33	1	34	1;2	37		
11	11	22	6-8	30	4-6	35	1;2	36	1;2	40		
12	12	22	6-9	32	3-6	37	1-4	38	2	43		
13	13	22	7-9	34	4	40	4	41	2;3	45		
14	14	22	8;9	36	4;5	42	1;4;5	43	1-4	47		
15	15	22	9	38	4-6	44	1;2;4-6	45	2	50		
16	16	22	9;10	39	4-6	46	1-6	47	2;3	52		
17	17	22	9-11	40	4-6	48	4	50	2-4	54		
18	18	22	9-11	41	4-6	50	4;5	52	1-4	56		
19	19	22	9-11	42	4-6	52	4-6	54	2	59		
20	20	22	9-11	43	5;6	54	4-6	56	2;3	61	1;5	63

Для первого шага имеем начальное условие  $T_0 = 20$ , поэтому в крайнем правом столбце достаточно провести расчёты для фиксированного значения  $C = 20$ . В результате последовательной оптимизации получаем, что на первом шаге целесообразно выделить или 1 единицу ресурсов, или 5 единиц. Допустим, что выделяется одна единица ресурсов, то есть  $t_1^* = 1$ . Тогда ко второму шагу остаётся 19 единиц ресурсов, и из таблицы видно, что на втором шаге целесообразно выделить 2 единицы ресурсов, то есть  $t_2^* = 2$ . Значит, к третьему шагу подходим с 17 единицами ресурсов, и выделяем 4 единицы ресурсов, то есть  $t_3^* = 4$ . К четвёртому шагу остаётся 13 единиц ресурсов, и тогда  $t_4^* = 4$ . Следовательно, к пятому шагу остаётся 9 единиц ресурсов, и находим  $t_5^* = 6$ . Наконец, к последнему шагу подходим с остатком  $t_6^* = 3$ . Таким образом, получаем оптимальное управление  $t^* = (1; 2; 4; 4; 6; 3)$ , и при этом критерий эффективности принимает наибольшее значение (с учётом имеющихся ресурсов)  $F_{optim} = F(t^*) = 63$ . Кроме того, в задаче имеется и другое оптимальное управление, которое можно получить, проведя аналогичные рассуждения:  $t^* = (5; 2; 4; 4; 2; 3)$ . Стоит отметить, что в задаче динамического программирования, вообще говоря, оптимальное управление может быть не единственным (хотя критерий эффективности при всех этих возможных оптимальных управлениях принимает единственное оптимальное значение).

Рассматриваемая проблема распределения ресурсов в системе распознавания важна ввиду того, что количество имеющихся ресурсов может быть сильно ограничено. По этой причине в условиях ограничений необходимо искать наилучшее решение. Если в рассмотренной задаче отсутствуют ограничения на ресурсы, то показатель эффективности системы принимает максимальное значение, равное 124 единицам, так как  $F_{max} = 23 + 17 + 16 + 21 + 25 + 22 = 124$ . При этом потребуется количество ресурсов, равное как минимум  $T = 13 + 11 + 8 + 12 + 14 + 11 = 69$  единиц. Это показывает, что затраты ресурсов при попытке увеличить оптимальное значение критерия эффективности становятся весьма существенными, и возможно, неоправданно большими. Поэтому во многих случаях

целесообразно уменьшить расходы имеющихся ресурсов при условии, что значение показателя эффективности системы находится в некоторых приемлемых границах [2]. Для решения подобных задач используются различные математические методы, в том числе и метод динамического программирования.

#### ***Список литературы***

1. *Мунасыпов Н.А.* Применение метода динамического программирования в задачах распределения ресурсов в системе распознавания // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. – 1998. – №4. С.4–12.
2. *Горелик В.А., Мунасыпов Н.А.* Задача распределения ограниченных ресурсов в системе распознавания // Моделирование, оптимизация и декомпозиция сложных динамических процессов. – М.: ВЦ РАН, 1996. –С.105–122.

05.13.00

**В.В. Олоничев канд. техн. наук, Б.А. Староверов д-р техн. наук,  
М.А. Смирнов канд. техн. наук**

Костромской государственной университет,  
кафедра автоматики и микропроцессорной техники,  
Кострома, sba44@mail.ru

### **ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ**

*Для практической реализации динамических регуляторов состояния необходим контур адаптации, для чего, в свою очередь, требуется параметрическая идентификация объектов управления в темпе с процессом. В статье представлены способы повышения производительности в несколько раз программной реализации вычислительных операций идентификации для процессоров ARM-CORTEX-A. Данные решения предназначены для систем с быстроизменяющимися параметрами объектов управления.*

*Ключевые слова: регулятор состояния, контур адаптации, параметрическая идентификация, одноплатные компьютеры, язык С.*

Для управления техническими объектами при высоких требованиях к качеству статических и динамических характеристик наиболее эффективным подходом является применение регуляторов состояния. Они имеют ряд преимуществ перед наиболее распространенными ПИД регуляторами [1, 2]. В то же время регуляторы состояния до сих пор не нашли широкого практического применения. В основном исследования таких систем ограничиваются результатами математического моделирования и полунатурными экспериментами. Причина кроется в том, что требуется сравнительно точная модель объекта управления. При неточной модели и при изменении параметров объекта в течение его эксплуатации система управления остается работоспособной, но динамические характеристики ухудшаются, что ставит под вопрос целесообразность применения сравнительно сложного динамического регулятора состояния. Решением данной проблемы является введение контура адаптации, осуществляющего параметрическую автоподстройку в темпе с процессом управления [1, 3, 4].

Для упрощения программной реализации процесс наблюдения осуществляется путем решения двух матричных уравнений:

$$\begin{aligned}\hat{x}(k) &= \hat{x}_a(k) + \mathbf{L} \hat{\varepsilon}_n(k-1), \\ \hat{x}_a(k) &= \mathbf{A} \hat{x}_a(k-1) + \mathbf{B} u(k-1),\end{aligned}$$

где  $\hat{x}_a(k)$  – априорная оценка, вычисляемая на предыдущем шаге;  $\hat{\varepsilon}_n(k-1) = y(k-1) - \mathbf{C} \hat{x}_a(k)$  – ошибка наблюдения;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  – матрицы динамики, управления и выхода ОУ;  $\mathbf{L}$  – коэффициентная матрица подстройки наблюдателя.

Регулятор состояния ОУ описывается уравнением:

$$u(k) = u(k-1) + k_u \varepsilon(k) + \mathbf{K} \hat{x}(k),$$

где  $k_u$  – коэффициент добротности интегратора;  $\varepsilon(k) = g(k) - y(k)$  – ошибка управления;  $\mathbf{K}$  – коэффициентная матрица регулятора состояния.

Элементы матриц  $\mathbf{L}$  и  $\mathbf{K}$  рассчитываются исходя из требований к динамическим процессам управления (например, процессы с конечным временем установления). Для определения параметров модели ОУ (элементов матриц  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ) наиболее перспективным с точки зрения эффективности и простоты вычислительных операций является метод наименьших квадратов (МНК). Оценка параметров объекта по экспериментальным данным, определяемая из условия минимума среднеквадратичных ошибок, находится из решения

матричного уравнения, которое в общем виде можно записать как [1]:

$$[\Psi^T \Psi]^{-1} \Psi^T Y, \quad (1)$$

где  $\Psi$  – матрица размером  $N \times 2M$ , содержащая значения на входе и выходе объекта, полученные за  $N$  тактов квантования;  $Y$  – вектор размерности  $N$ , содержащий значения на выходе объекта;  $M$  – порядок объекта управления.

Таким образом, алгоритм адаптивного управления в пространстве состояний включает в себя следующие основные этапы:

- 1) проводится идентификация ОУ путем решения уравнения (1);
- 2) определяются элементы матриц  $A, B, C, K, L$ ;
- 3) вычисляются координаты состояния ОУ и управляющее воздействие.

Вычисления должны выполняться параллельно с ходом процесса управления или, другими словами, «на лету». Проблема вычислительного быстродействия особенно актуальна при использовании одноплатных миникомпьютеров или микроконтроллеров для объектов, подверженных частым девиациям параметров. При этом параметрическая идентификация в темпе с процессом остается наиболее «узким местом».

На сегодняшний день цифровые системы адаптивного управления с высокой степенью эффективности могут быть реализованы на серийных микроконтроллерах STM32 (процессор ARM Cortex-M) и одноплатных компьютерах (32- и 64-разрядные процессоры ARM Cortex-A) [5]. Для организации вычислений по умножению матриц и обращению матрицы согласно выражению (1) имеются два варианта: воспользоваться стандартной научной библиотекой `gsl` [6], в которой используется QR-разложение, что наиболее эффективно для больших матриц, или разработать программу, реализующую прямые матричные операции, т. к. в рассматриваемых случаях порядок моделей ОУ обычно не превышает семи.

Вычислительные эксперименты на одноплатных компьютерах CubieBoard3 (двухъядерный 32-разрядный процессор ARM-CORTEX-A7, частота 1 ГГц; ОЗУ – 2 Гб) и Odroid C2 (четырёхъядерный 64-разрядный процессор ARM-CORTEX-A53, частота 1.5 ГГц; ОЗУ – 2 Гб) показали, что использование прямых операций с матрицами предпочтительней для задач небольших размерностей. Дальнейшее уменьшение времени вычислений можно достигнуть за счет замены чисел с плавающей точкой двойной точности на числа одинарной точности. Целесообразность использования чисел одинарной точности заключается в том, что снижается вероятность кэш-промахов (приблизительно в два раза).

Следующий шаг оптимизации также связан со снижением количества кэш-промахов, возникающих в программах на языке C при перемножении матриц. Для того чтобы избежать подобной ситуации, вторую матрицу в (1) рекомендуется предварительно транспонировать.

Повысить скорость вычислений можно также за счет использования технологии параллельных вычислений, т. к. плата CubieBoard3 имеет двухъядерный процессор и операционная система Linux в стандартной конфигурации включает библиотеку OpenMP [7]. Такой подход позволяет получить из одного исходного кода два бинарных исполняемых файла: без параллелизма и с многопоточностью. Многопоточность дает уменьшение времени расчетов для объектов с порядком больше семи. При меньшем порядке, что чаще встречается на практике, замена чисел двойной точности числами одинарной точности при однопотоковом варианте дает снижение затрат времени приблизительно на 25%.

Еще один шаг в повышении быстродействия программы – это векторизация. В эксперименте были использованы встроенные функции блока NEON, поскольку они обеспечивают лучшее управление ходом вычислительного процесса по сравнению с векторными типами [8]. Возможны два подхода в использовании векторизации для умножения матриц:

– горизонтальная векторизация, когда каждый элемент результирующей матрицы вычисляется как результат скалярного произведения соответствующих строчек исходных матриц;

– вертикальная, при которой матрицы должны содержать данные в векторном формате `float32x4_t` по колонкам.

Испытания на миникомпьютере CubieBoard3 показали, что вертикальная векторизация не повышает производительность программы, а горизонтальная дает хорошие результаты для объектов шестого порядка и выше. На Odroid C2 и горизонтальная, и вертикальная векторизация дает прирост производительности сразу же, начиная со 2-го порядка объекта.

Таким образом, комплексное применение рассмотренных способов повышения быстродействия программы параметрической идентификации дает прирост производительности для процессоров ARM-CORTEX-A в зависимости от марки процессора и размерности задачи от 2.5 до 4 раз. Это решает проблему практического использования адаптивных динамических регуляторов состояния объектов управления с быстроизменяющимися параметрами на современных серийно выпускаемых бюджетных вычислительных платформах. Исходные тексты всех вариантов программ выложены на GitHub [9] под лицензией GPL3.

### Список литературы

1. Изерман Р. Цифровые системы управления: Пер. с англ. / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
2. Тарарыкин С. В. Робастное модальное управление динамическими системами / С. В. Тарарыкин, В. В. Тютиков // Изв. РАН. Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 30–37.
3. Ильина А. Г. Синтез оптимального наблюдателя состояний для системы управления вентильного электропривода / А. Г. Ильина, А. Г. Маматов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – № 4. – С. 33–38.
4. Староверов Б. А. Самонастраивающаяся система управления с цифровым астатическим регулятором состояния / Б. А. Староверов, В. В. Олоничев, М. А. Смирнов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2011. – № 6. – С. 43–47.
5. E. Brown, Ringing in 2017 with 90 hacker-friendly single board computers. [Electronic Resource]. Режим доступа: <http://linuxgizmos.com/ringing-in-2017-with-90-hacker-friendly-single-board-computers/>. Дата обращения: 10.11.2018.
6. GSL – GNU Scientific Library. [Electronic Resource]. Режим доступа: <https://www.gnu.org/software/gsl/>. Дата обращения: 12.11.2018.
7. OpenMP. [Electronic Resource]. Режим доступа: <http://www.openmp.org>. Дата обращения: 12.10.2018.
8. Summary of NEON intrinsics. [Electronic Resource]. Режим доступа: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.dui0491h/CIHJBEFE.html>. Дата обращения: 15.11.2018.
9. lsq\_armv7. [Electronic Resource]. Режим доступа: [https://github.com/basv0/lsq\\_armv7](https://github.com/basv0/lsq_armv7). Дата обращения: 31.12.2018.

05.13.00

**Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова**

Набережночелнинский институт (филиал) КФУ,  
отделение информационных технологий и энергетических систем,  
кафедра автоматизации и управления,  
Набережные Челны, guzel1208@mail.ru

### **СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТАХ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ**

*В работе представлена многоуровневая структурная модель интеллектуальной системы управления информационными потоками в альтернативных технологических маршрутах на этапе технологической подготовки производства (ТПП) с применением многоагентной системы.*

Ключевые слова: *технологическая подготовка производства, интеллектуальная система, многоагентная система, структурная модель.*

Ускорение научно-технического прогресса и усиление конкурентной борьбы предприятий на рынке привело к новой промышленной революции, называемой индустрия 4.0 – переходу на цифровое производство, которое подразумевает широкое распространение информационных технологий как при проектировании, так и при подготовке производства и самого производства продукта. Данный подход позволяет в виртуальном пространстве создать цифровой двойник продукта и производственного процесса, в онлайн режиме отслеживать ход производства, автоматически перестраиваться при изменениях внешней и внутренней среды. Одним из наиболее перспективных способов достижения высокой конкурентоспособности является повышение эффективности на этапе технологической подготовки производства (ТПП) и планирования производства (ПП) за счёт применения современных подходов в информатизации. Большинство этих подходов в информатизации позволяют обеспечить управление производством, но не решают часть таких задач, как выбор в оперативном режиме оборудования, инструмента и оснастки с оптимальным значением технико-экономических показателей для выполнения технологического процесса (ТП), подбор оптимального маршрута изготовления изделия исходя из критериев, влияющих на ход производства, физические ограничения мощностей, конкурентную и макроэкономическую среду предприятия.

На сегодняшний день имеются попытки решения данной задачи с применением методов распределенного искусственного интеллекта [1,2]. Базовые принципы построения и взаимодействия интеллектуальных систем (ИС) управления подготовкой производством и их приложения отражены в трудах ведущих ученых [3,4,5,6]. Однако теоретические и особенно прикладные основы ИС управления в области технологической подготовки производства еще далеки от завершения.

Задача моделирования производственных процессов является неформализованной, так как технологический процесс имеет большое количество вариантов решений. Необходимость модификации схемы принятия решений в ИС оказывается сложной и трудоемкой задачей, которая требует высокой квалификации эксперта, генерирующего новые правила и модель поведения системы. Это делает разработку и эксплуатацию ИС крайне дорогостоящими. Зачастую классические методы решения задач по заранее разработанным алгоритмам неприменимы к реальной жизни. Использование нечеткой логики позволит уйти от однозначных формулировок закономерностей и позволит решить задачу управления производственным процессом в непредсказуемой динамичной обстановке.

Учитывая выше изложенные ограничения управления производственными процессами целесообразно применение нечеткой логики в комбинации с МАС, которая обладает развитой моделью внешнего мира благодаря наличию у них базы знаний, механизмов решения и анализа действий.

Поскольку в процесс производства вовлечено множество лиц разных подразделений, работающих в разных направлениях, важной задачей автоматизации данного процесса является разрешение противоречий при построении оптимального технологического маршрута изготовления изделия на этапе ТПП и ПП. При многоагентном подходе эта задача решается путем использования методов организации взаимодействия и координации действий интеллектуальных агентов. Для достижения максимального эффекта необходимо, чтобы система управления производством при этом была полностью автоматизированной.

На основе выше изложенных требований к системе управления информационными потоками в процессах ТПП была разработана структурная модель интеллектуальной системы с использованием взаимодействующих друг с другом агентов: агентов с типом поведения на основе знаний и на основе быстрой реакции на события. Структурная модель платформы управления потокам в альтернативных технологических маршрутах на этапе ТПП представлена на рисунке 1.

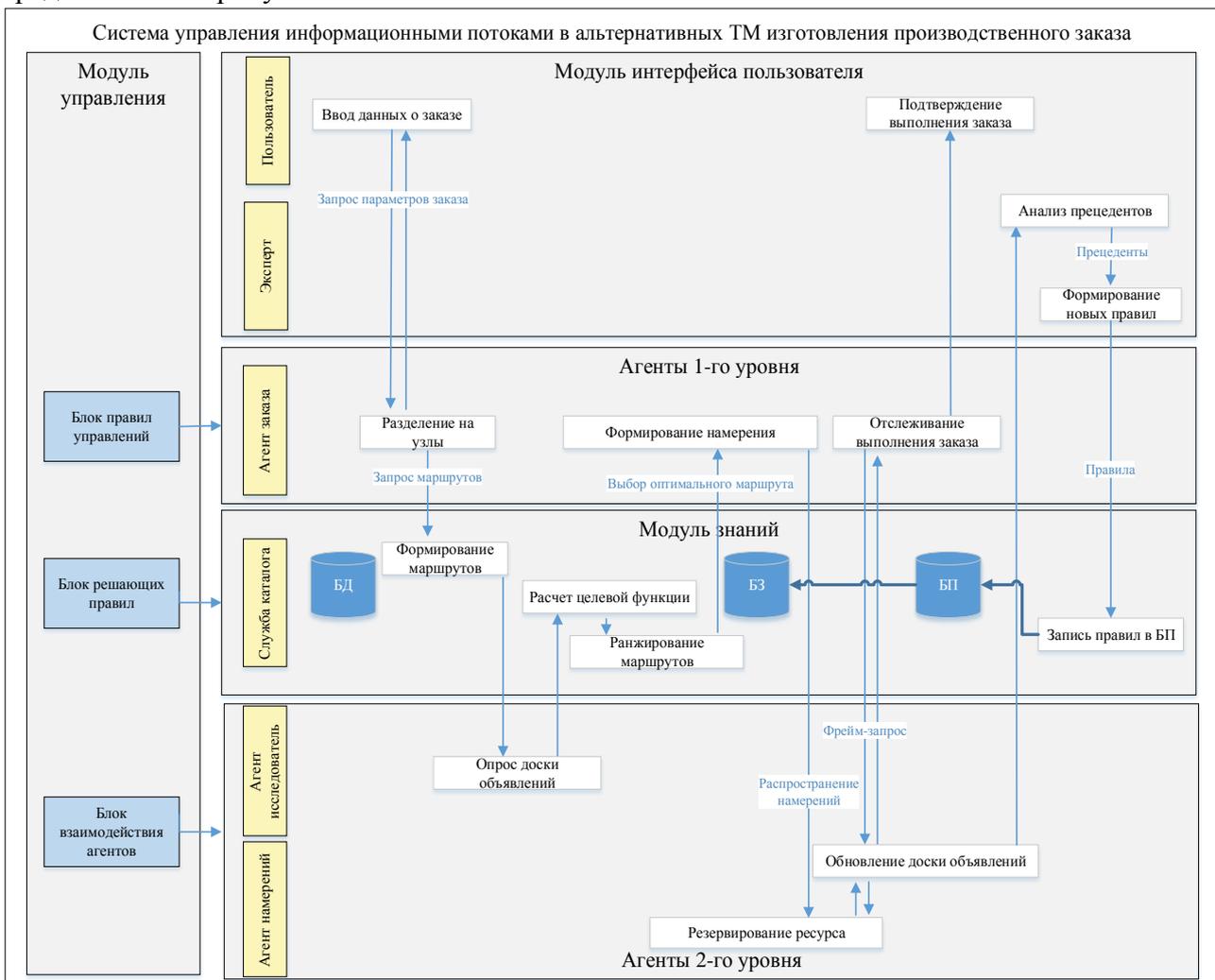


Рис. 1 – Многоуровневая структурная модель информационной системы управления потоками в альтернативных технологических маршрутах на этапе ТПП с применением МАС

В архитектуре реализована совместная работа таких компонент, как блок решающих правил для определения производственных маршрутов изготовления заказа, блок правил для управления агентами, их декомпозицией и размещением. Также имеется блок правил для взаимодействия с другими агентами. С помощью управляющего модуля реализуется

реактивное поведение агентов в системе. Управляющий модуль реагирует на изменение состояния рабочей памяти. Ключевым моментом данной архитектуры является трехуровневая организация знаний.

Такое трехуровневое функциональное разделение знаний на предметные знания, знания о процедурах вывода и управляющие знания существенно упрощает их представление, повторное использование и эксплуатацию, поскольку эти знания могут создаваться и поддерживаться независимо.

Уровень специфических предметных знаний содержит технологические маршруты, типовые техпроцессы, базу данных оборудования предприятия, данные о план-графике производства (заказов) и базу данных о доступных ресурсах. Предметные знания не содержат какой-либо информации о том, как их следует использовать, здесь представлены только свойства предметной области. Предметные знания в базе данных структурированы в виде психологической модели памяти человека и его сознания, представляя собой объектно-ориентированную модель представления знаний, называемой фреймовой.

В уровне знаний о процедурах вывода (интерфейсный уровень) содержатся декларативные правила вывода, которые должны применяться к предметным знаниям о конкретной детали, чтобы определить наиболее оптимальный маршрут изготовления ее в зависимости от входных параметров. Данный уровень - основной в архитектуре. База знаний динамична, постоянно дополняется новыми правилами, на основе анализа прецедентов, вырабатывающихся в условиях неопределенности и в процессе управления агентами.

Уровень управляющих знаний использует знания о процессе вывода к предметным знаниям, что позволяет генерировать схему вывода, если в рабочую память добавляются новые знания.

Человеко-машинный интерфейс определяет схему взаимодействия между системой и пользователем, поскольку данная многоагентная система не является автономной, что связано с личной ответственностью пользователя за принятие решений.

Для построения гибкой интеграционной системы автоматизации ТПП понятие агента необходимо расширить. Технологический агент должен быть наделен рядом дополнительных функций, позволяющих ему участвовать не только в одноранговом взаимодействии в рамках интеграционной сети, но и в классических централизованных системах управления.

Применение МАС для решения задач ТПП позволит создать открытую среду интеграции технологических данных и знаний, построенную на простой модели расширения функциональности и горизонтального масштабирования информационного пространства технологической подготовки производства.

#### **Список литературы**

1. *Селиванов С.Г., Никитин В.В.* Использование методов искусственного интеллекта в технологической подготовке производства // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2010. – №1. – том 14.
2. *Кузнецов А.А.* Разработка системы автоматизированного проектирования технологических процессов изготовления корпусных конструкций на основе методов искусственного интеллекта: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. тех. Наук. – Санкт-Петербург, 2009.
3. Информационные системы в производстве и экономике / Аверченков В.И., Лозбинев Ф.Ю., Тищенко А.А. Учебное пособие, ФЛИНТА, 2011.
4. *Попов Э.В.* Экспертные системы // – М.: Наука, – 1987. – с. 288.
5. *Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А.* Организация технологической подготовки производства в распределенной среде // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 6.
6. *Фомина Ю.Н.* Многоагентные технологии при решении производственных задач. Программные продукты и системы // – М.: МНИИПУ, – 2008. – № 2. – С. 66–68.

05.13.00

**Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова**

Набережночелнинский институт (филиал) КФУ,  
отделение информационных технологий и энергетических систем,  
кафедра автоматизации и управления,  
Набережные Челны, guzel1208@mail.ru

### **АЛГОРИТМ РАБОТЫ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТАХ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

*В работе представлен алгоритм работы многоагентной системы управления информационными потоками в альтернативных технологических маршрутах на примере решения задачи подтверждения обеспеченности комплектующими изделиями для конкретного производственного заказа.*

Ключевые слова: *агент, интеллектуальная система, многоагентная система, алгоритм работы многоагентной системы, управление подготовкой производства.*

На крупных машиностроительных предприятиях одновременно ведутся работы по выпуску серийного производства и работы по внедрению новой продукции. Учитывая, что производственные площадки для уже освоенного производства и вновь вводимого зачастую используются одни и те же, перед группой технологов, обеспечивающих подготовку производства, зачастую встают вопросы выбора наиболее оптимального маршрута изготовления изделия, согласно которому обеспечивается выполнение заказов в установленный срок с наиболее экономически выгодной позицией с точки зрения снижения затрат в процессе производства. Невыполнение этих условий ведет к серьезным затратам со стороны предприятия. В связи с этими обстоятельствами реальным шагом по совершенствованию процесса подготовки производства является рациональное формирование маршрутов изготовления изделий с учетом мощностей предприятия и его загрузки основного оборудования [1].

Наиболее качественное решение по выбору маршрута изготовления можно принять тогда, когда имеется обратная связь с производством. Методики формирования маршрутов, наряду с разработкой содержания технологического процесса и расчетом его параметров, должны обеспечивать получение законченного комплекса итоговых показателей каждого варианта его выполнения, необходимого для объективной сравнительной оценки эффективности всех альтернативных вариантов его реализации и отбора наиболее оптимального варианта [2]. Необходимым условием автоматизации какого-либо процесса является возможность его представления в виде модели, которая описывается типовыми элементами и связями. Рассмотрим работу модели на примере решения задачи подтверждения обеспеченности комплектующими изделиями для выполнения производственного заказа. Алгоритм работы взаимодействия агентов представлен на рисунке 1.

Агент-заказа управляет процессом производства продукта, отслеживает состояния исполнения этого процесса и отвечает за логику обработки информации, связанной с производством продукта. В качестве атрибутов задаются значения показателей, относящиеся к искомому заданию, в нашем случае это - ID заказа, количество и конечный срок выполнения заказа. Атрибуты могут быть представлены в виде целого числа, даты, времени, массива. На данном этапе к заказу присваивается первичный статус равный 01. Данные о производственном заказе поступают в блок правил управления. Блок правил управления отвечает за декомпозицию задач на подзадачи (разделение заказа на узлы) и их распределение по агентам-исполнителям (агенты-исследователи и агенты-намерения).

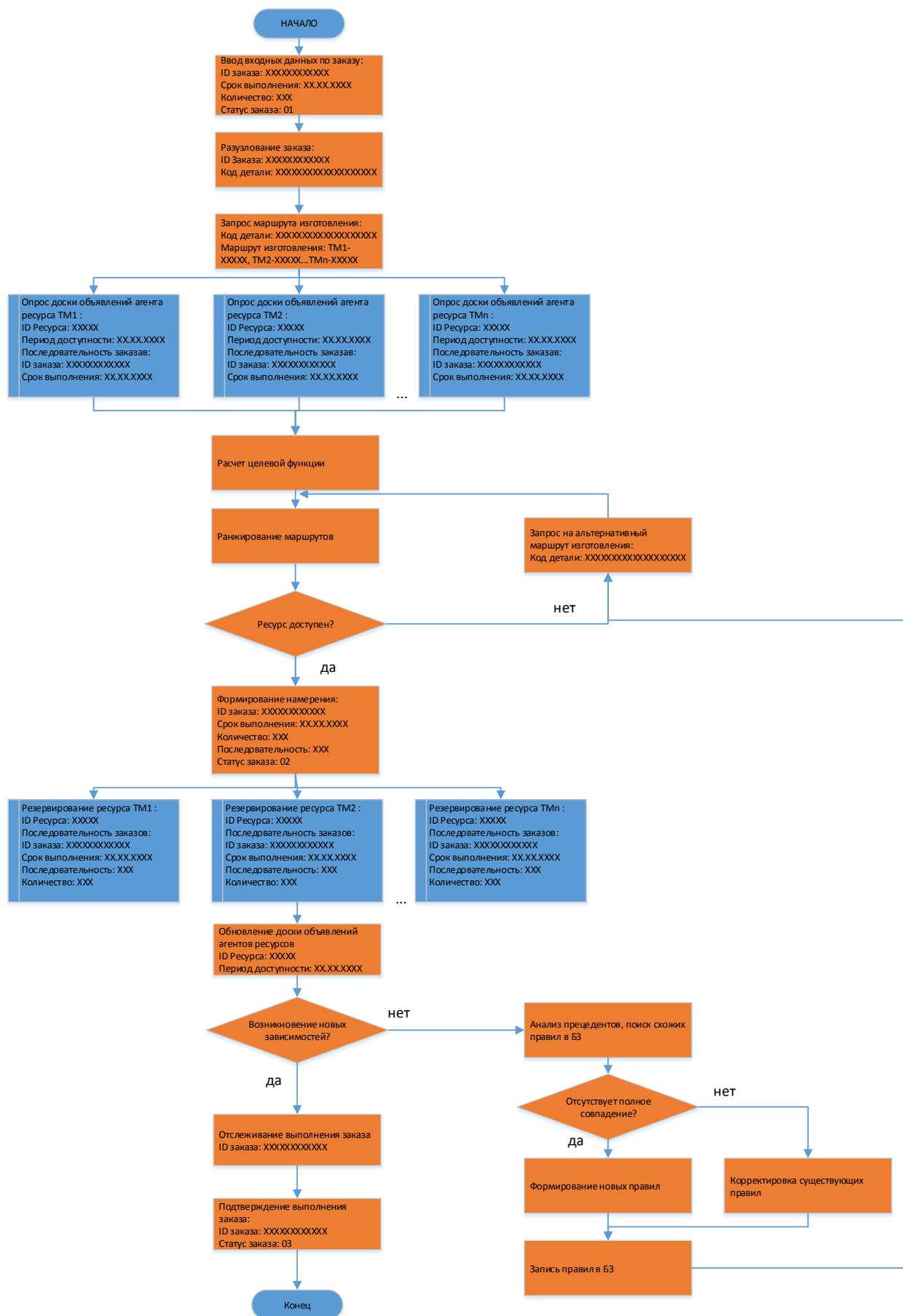


Рис. 1 – Алгоритм решения задачи подтверждения обеспеченности комплектующими изделиями для выполнения производственного заказа

Управление осуществляется агентом системы управления, который контролирует выполнение запроса в конкретной предметной области, который находится в блоке управления основных функций взаимодействия с другими агентами.

Для координации агентов используется модель косвенного взаимодействия. При формировании своих решений о последовательности операций, связанных с выполнением задачи, агенты-заказа используют механизмы координации двух типов: исследование состояния ресурсов и распространение намерений. В следствии работы блока правил управления производственный заказ декомпозируется до компонентов заказа, генерируя в системе мобильных агентов-исследователей, которые направляются анализировать состояние ресурсов согласно маршруту изготовления изделия. Данные о маршрутах изготовления каждого изделия хранятся, как упоминалось ранее, на уровне специфических предметных знаний в базе данных. Мобильный агент-исследователь определяет возможности исполнения заказа путем изучения его текущего состояния исполнения и посещения досок объявлений всех агентов-ресурсов для сбора и обработки их информации. Агент-исследователь сравнивает доску объявления агента-ресурса с данными о заказе, записанными в свою память, формирует сообщение для агента-заказа, которое строится на формировании модели запроса в соответствии с атрибутами запроса. Список атрибутов напрямую зависит от параметров запроса и имеет нефиксированную длину. Доска объявлений служит для запоминания текущих данных, генерируемых агентом-ресурса. Типы информации, которая хранится в рабочей памяти, таковы: ID ресурса, последовательность, принятых заказов, период доступности ресурса. На основании данных параметров рассчитывается целевая функция, по значению которой происходит ранжирование маршрутов: определяется доступность и рейтинг выполнения заказа агентом-ресурса.

После определения значений весовых коэффициентов и анализа предложений агент-исследователь формирует список агентов-ресурсов, которые могут обработать заказ с рассчитанными рейтингами. Из списка ранжированных маршрутов выбирается следующий по значимости целевой функции маршрут изготовления заказа. Если не находится свободный агент-ресурса для выполнения заказа на заданный период, то агент системы управления готовит агенту-интерфейсу сообщение о невозможности выполнения задачи и переходит на запрос альтернативного маршрута изготовления. Информация доставляется агенту-заказа, после чего агент-исследователь уничтожается. В случае сообщения о том, что имеются доступные ресурсы, агент-заказа анализирует данные и формирует прогноз выполнения заказа, формирует план производства изделия, в котором указывается последовательность шагов производства, привязку их ко времени и потребности в ресурсах с указанием количества и/или периодов времени их использования. Это решение называется намерением агента-заказа, которое доводит до системы в целом с помощью механизма распространения намерений. Для решения этой задачи агент заказа генерирует мобильного агента-намерений и поручает ему задачу резервирования ресурсов: формируются отдельные задания для непосредственного решения задачи и резервируются у агентов-ресурсов выбранные ресурсы в необходимые агенту-заказа слоты времени. Агент-ресурса проверяет свой график использования ресурсов и фиксирует эту информацию на своей доске объявлений. Но при изменении состояния ресурсов агент ресурса обеспечивает агента намерений информацией о состоянии ресурсов в реальном масштабе времени. Резервированные слоты использования ресурса снабжаются определенным статусом 02. Данный процесс происходит до получения ответа от всех агентов-ресурсов для каждого агента-намерений. В ходе обновления доски объявлений могут возникнуть новые зависимости, называемые прецедентами – зафиксированные в ходе работы МАС отклоненные состояния ключевых параметров системы. В МАС осуществляется поиск похожего правила в базе знаний. В зависимости от степени совпадения имеющегося правила производится его оценка с новым правилом. По команде эксперта либо выполняется корректировка существующих правил, либо на основе зафиксированных прецедентов база знаний пополняется утвержденными новыми правилами. Таким способом образуются новые знания, которые используются для

последующего управления технологическим процессом производства [3]. По результатам выполненных действий происходит подготовка и отправка ответа решения задачи пользователю.

Основанная на базовых принципах теории многоагентных систем и нечеткой логики система управления информационными потоками позволит облегчить работу технолога подготовки производства в части принятия решения по выбору наиболее оптимального маршрута изготовления изделия и сократит сроки подготовки производства при внедрении новой продукции на производстве.

#### **Список литературы**

1. Яблочников Е.И., Фомина Ю.Н., Саломатина А.А. Организация технологической подготовки производства в распределенной среде // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – № 6.
2. Методы и модели разработки и принятия управленческих решений. URL:[https://studme.org/1246122021570/menedzhment/metody\\_modeli\\_razrabotki\\_prinyatiya\\_upravlencheskih\\_resheniy](https://studme.org/1246122021570/menedzhment/metody_modeli_razrabotki_prinyatiya_upravlencheskih_resheniy) (дата обращения 08.02.2019)

05.13.00

А.Б. Сорокин канд. техн. наук, Е.В. Бражникова канд. техн. наук, В.И. Тихвинский

МИРЭА – Российский технологический университет,  
 Институт информационных технологий,  
 кафедра вычислительной техники,  
 Москва, ab\_\_sorokin@mail.ru, bra\_vt@mail.ru, tvitaly1@yandex.ru

**СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ**

*Рассматриваются вопросы проектирования ситуационных центров поддержки принятия решений с позиции системного исследования. Анализ дефиниций понятия «система» помогает определить не только конструктивные особенности ситуационных комплексов – полиструктурность и полифункциональность, но также системообразующий фактор – деятельность.*

Ключевые слова: *большая система, сложная система, полиструктурность, полифункциональность, деятельность.*

Общеизвестно, что системные представления не существует в виде строгой методологической концепции, но при этом они тесно связаны с различными направлениями современной науки. Поэтому, в зависимости от того какое определение будет взято за первооснову, зависит решение вопроса о специфических признаках исследования системного объекта.

В связи лавинообразным характером системных исследований, предложено достаточно большое количество общих и специальных определений понятия «система». Одни из них претендуют на универсальность. Тогда в самом общем случае понятие «система» характеризуется: 1) наличием множества элементов; 2) наличием связей между ними; 3) целостным характером данного устройства [1].

В формальном виде данную группу определений термина система можно представить через теоретико-множественные представления элементов  $a_i$  и отношений  $r_i$ :

$$S \stackrel{def}{=} \langle A, R \rangle, \text{ где } A = \{a_i\}, R = \{r_i\}$$

Тогда структура строится из множества элементов  $A$ , заполняющих пространство системы  $S$ . Элементы системы представляют собой части пространства, между которыми существуют определенные связи (отношения)  $r$  (рис. 1).

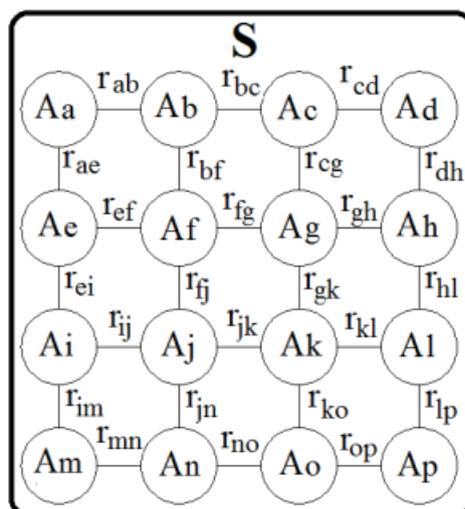


Рис.1. Структура пространства системы

Практическое применение определений такого класса невелико. При этом примитивный редукционизм, сводящий сложную систему к сумме ее элементов, почти всегда приводит к

ошибочным выводам. Однако данные дефиниции позволяют рассматривать систему относительно свойства универсальности.

Существует достаточное количество определений системы, которые приводить в статье не целесообразно. В контексте данной статьи необходимо рассматривать ситуационные центры с позиции проектирования больших и одновременно сложных систем.

Большая система – это система, которая не может рассматриваться иначе как в качестве совокупности априорно выделенных подсистем [1].

Таким образом, большая система  $S_b$  определена мерностью и однородностью состава, который может быть описан на одном языке моделирования. Это позволяет утверждать, что связи между подсистемами возможны только в том случае, если их объединяет общая основа. Тогда в пространстве системы  $S_b$  может существовать некоторая подсистема  $S_1$  со множеством элементов  $\{Aa, Ab, \dots, Ah\}$  и подобная ей подсистема  $S_2$ , состоящая из связанных друг с другом элементов  $\{Ai, Aj, \dots, Ap\}$  (рис. 2).

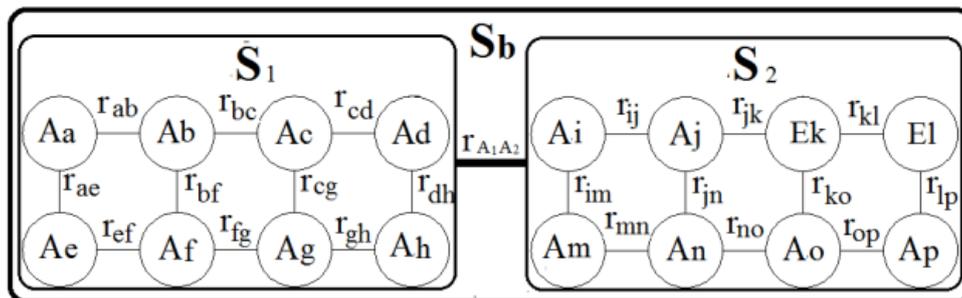


Рис. 2. Структура пространства большой системы

Понятие подсистема подразумевает, что выделяется относительно независимая часть системы, обладающая свойствами системы и, в частности, имеющая подцель, на достижение которой ориентирована подсистема [2].

Тогда подсистему согласно данным определениям возможно представить, как сложный объект, которому может быть приписано столько систем, сколько можно придумать. Каждая такая система выражает лишь определенную грань объекта. Сложная система (рис. 3) – эта система, построенная для решения многоцелевой задачи; система, отражающая разные, несравнимые аспекты характеристики объекта; система, для описания которой необходимо несколько языков; система, включающая взаимосвязанный комплекс разных моделей [1].

Тогда по отношению к пространству большой и сложной системы  $S_{bc}$  в подсистемах  $S_1$  и  $S_2$  существуют структуры  $(S_1^1, S_1^2, S_1^3, S_1^4)$  и  $(S_2^1, S_2^2, S_2^3, S_2^4)$ , которые увеличивают мерность состава (рис.3). При этом проявляется сложность состава, которая сводится к количеству всех деталей системы.

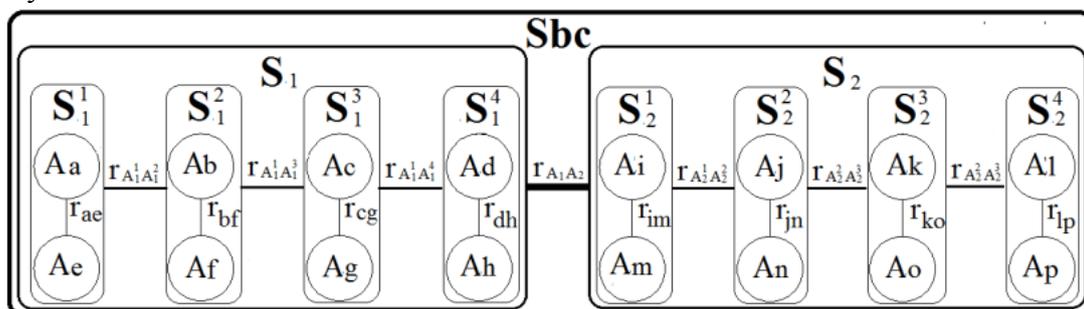


Рис.3. Структура пространства большой и сложной системы

Структура определяет функцию, так как при одном и том же составе элементов, но при различном взаимодействии между ними меняется функция системы и ее возможности. В тоже время одна и та же функция может реализоваться различными структурами, которые находятся в различных средах. Тогда можно утверждать, что большие и сложные системы не только полиструктурны, но и полифункциональны.

Включение полифункционального элемента в систему неизбежно разделяет функции по значимости: одни из них являются главными, а другие – второстепенными (лишними).

Однако избыток лишних функций служит резервом для адаптации большой и сложной системы к новым условиям динамически сложной среды.

Изменчивость среды определяет высокую активность ее элементов, компонентов и систем, т.е. они обладают большой степенью свободы их различных организаций. Тогда в динамически сложной среде необходимо произвести отбор тех степеней свободы у компонентов большой и сложной системы, которые при их интегрировании определяют получение полезного эффекта. Такой отбор основывается на выявлении системообразующего фактора, который определяет причинно-следственную связь между компонентами системы.

При этом сложность состава среды рассматривается исходя из ситуационных представлений, а сложность организации как упорядоченность системы в соответствии с системообразующим фактором – деятельностью.

Получить конечное рассудочное определение понятия «деятельность» сложно, так как это универсальная общенаучная категория предельной абстракции и используется в форме объяснительного принципа. В мире все может рассматриваться как деятельность, при этом она носит объясняющий характер того, что происходит в мире, хотя сама в обосновании не нуждается. Структура деятельности релевантна структуре больших и сложных систем (рис.4) [3].



Рис. 4. Иерархическая структура деятельности

Таким образом, по мере уточнения представлений о термине «система» осуществляется переход от этапа анализа и исследований системы к этапу проектирования деятельности.

В результате проведенных системных исследований динамически сложной среды определено для принятия решений в динамически сложной среде и управления ею должна быть создана большая и одновременно сложная система, которая может быть представлена как ситуационный комплекс поддержки принятия решений. Хотя считается, что большие и сложные системы – это фактически два способа разложения задачи на ее составляющие, но объединение этих смыслов приводит к порождению свойств полиструктурности и полифункциональности.

Обоснование свойств полиструктурности и полифункциональности больших и сложных систем приводит к идее о необходимости построения базы знаний, выступающей в качестве ядерной части процессов принятия решений, на основе концепта деятельности. Возможно, именно эта идея позволит по-новому строить систему знаний, и поле знаний о проблемных ситуациях в динамически сложных предметных областях, вспоможение разрешению которых составляет суть поддержки принятия решений.

#### Список литературы

1. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учебное пособие / под ред. В.Н. Волковой, А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика, 2006. - 848 с.
2. Болотова, Л.С. Системы искусственного интеллекта: модели и тех-нологии, основанные на знаниях / Л.С. Болотова. – М.: Финансы и статистика – 2012. – 663 с.
3. Щедровицкий Г.П. Избранные труды / Г.П. Щедровицкий. – М.: Шк.Культ.Полит. 1995.–800 с.

05.13.00

**Л.А. Феоктистова канд. техн. наук, Т.В. Рзаева**

Набережночелнинский институт (филиал)  
Казанского (Приволжского федерального университета),  
Набережные Челны, feol4538@gmail.com

### **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОФОРМЛЕНИЯ КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ ANSI**

*Авторами в статье рассматривается специфика в оформлении конструкторской документации, принятой в США. Показаны некоторые значительные, по мнению авторов, отличия в оформлении конструкторской документации принятых в США и России.*

*Ключевые слова: Международная система мер (СИ), конструкторская документация, простановка размеров на чертежах, размерные числа, виды штриховки.*

Подготовка инженерных кадров, в современных условиях невозможна без установления международных связей и расширения сотрудничества с ведущими зарубежными научно-образовательными центрами. И как следствие, современному инженерно-техническому работнику приходится сталкиваться не только с отечественными разработками, но и с зарубежными.

Стандарты США на оформление конструкторской документации несколько отличаются как от российских, так и от европейских.

Приведем некоторые отличия в оформлении конструкторской документации с которыми приходится сталкиваться современному инженеру.

1. Международной системой мер служит метрическая система, построенная на системе СИ (метры и килограммы). Эта система официально используется во всех странах кроме США, Либерии и Бирмы. В США применяется дюймовая система мер (ярд, фунт и галлон).

2. Простановка размеров на чертежах, выполненных в дюймовой системе мер, имеет следующие особенности:

1) Размеры невысокой степени точности допускается проставлять в дюймах и простых дробях.

2) Размеры высокой точности проставляются в дюймах и десятичных дробях.

3) Размеры величиной до 72 дюймов проставляются в дюймах; размеры свыше 72 дюймов – в футах и дюймах.

4) Размеры в дюймах обозначаются знаком ("), размеры в футах – знаком ('). Если все размеры выражены в дюймах, знак (") обычно не проставляется. Размеры в футах и дюймах разделяются префиксом. Например, 4' – 5".

3. Размерные числа и надписи на чертеже изделия всегда располагают горизонтально, т.е. параллельно основной надписи и в разрывах размерных линий. При недостатке места размерные числа выносят за выносные линии и размещают так, что продолжения размерных линий или полки линий-выносок упираются в них. Выносная линия отступает от линии контура.

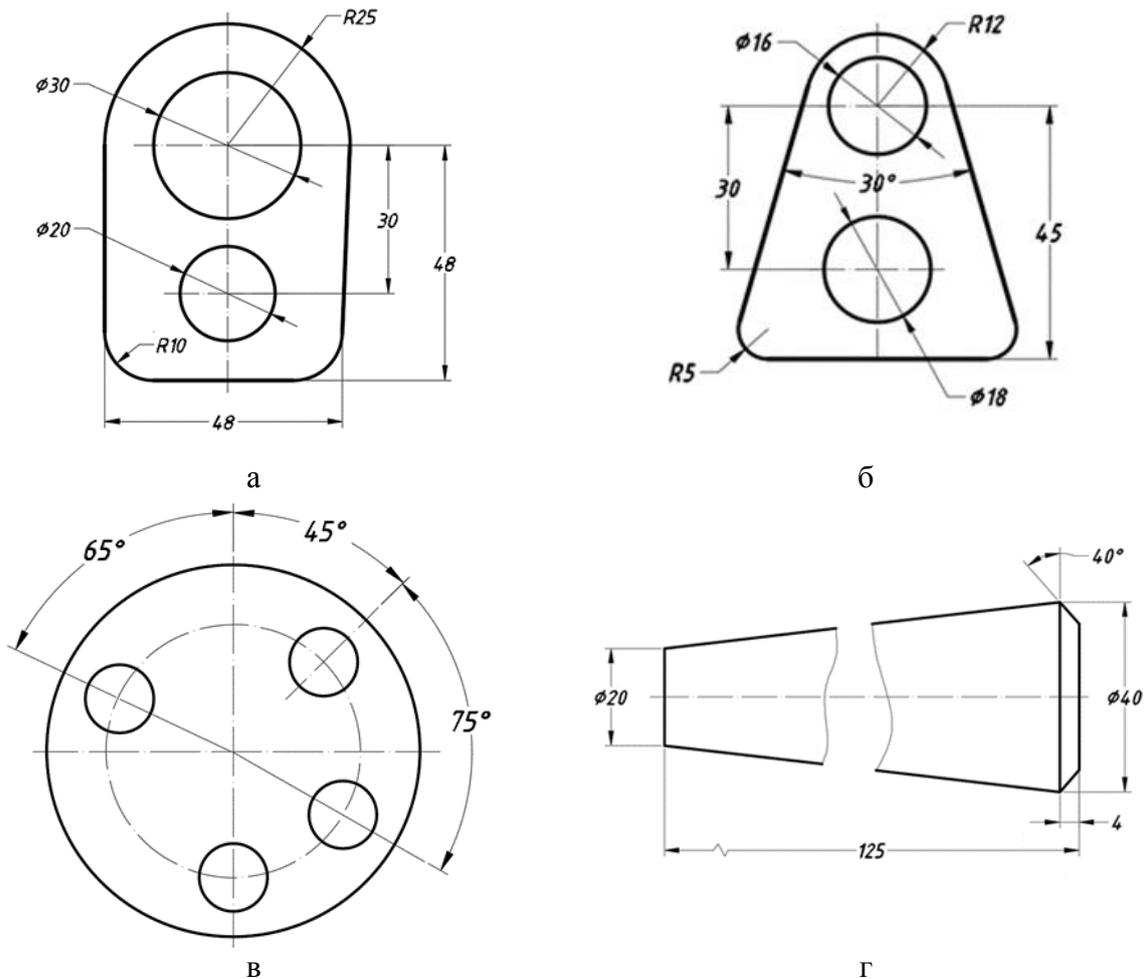


Рис. 1 –Примеры нанесения размеров по стандартам ANSI:

а - нанесение линейных размеров; б - диаметров и радиусов скруглений; в- нанесение угловых размеров; г - нанесение размеров при разрыве части изображения

3. Формат чертежа определяется размерами внешней рамки.

Американские форматы чертежей задаются в дюймах и приведены в таблице 1.

Таблица 1

	Обозначение формата				
	A	B	C	D	F
Размер (в дюймах)	8.5x11	11x17	17x22	22x34	34x34

Российские форматы чертежей определяет ГОСТ 301-68 и представлены в таблице 2.

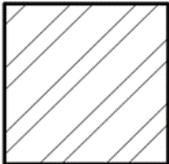
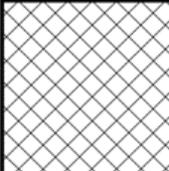
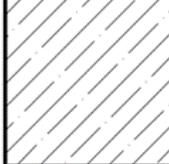
Таблица 2

	Обозначение формата				
	A0	A1	A2	A3	A4
Размер (мм)	841x1189	594x841	420x594	297x420	210x297

4. Графические обозначения материалов в сечениях.

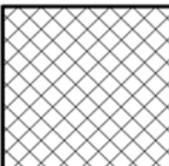
Стандартом США ASA414.2-1979 предусмотрены определенные виды штриховки для разных групп материалов и металлов (таблица 3).

Таблица 3

	Чугун и обозначение металлов		Сталь
	Титан и тугоплавкие металлы		Алюминиевые и магниевые сплавы
	Цинк, свинец, баббит		Медь, латунь, бронза
	Пробка, ткань, кожа, фибра		Резина, пластиковая изоляция

В России на изображениях предмета наносят графическое обозначение в соответствии с указаниями и правилами, установленными ГОСТ 2.306-68 (таблица 4).

Таблица 4

	Металлы и твердые сплавы		Неметаллические материалы, в том числе волокнистые монолитные и плитные (прессованные)
---	--------------------------	--	--

### 5. Изображение резьбы.

В современных технических устройствах, как правило, используют метрические винтовые резьбы с углом профиля  $60^\circ$ . В США чаще всего применяют Американскую национальную резьбу (дюймовую). Изображение Американской национальной резьбы основывается на документах ANSI B1.1 и ANSI Y14.6 (рис.2).

В соответствии со стандартом ANSI Y14.6- 1981, наружная резьба на стержне (рис. 2а) изображается сплошными основными линиями по наружному диаметру и штриховой линией – по внутреннему диаметру.

Внутренняя резьба (рис.2б) – изображается сплошной основной линией по внутреннему диаметру и штриховой – по наружному.

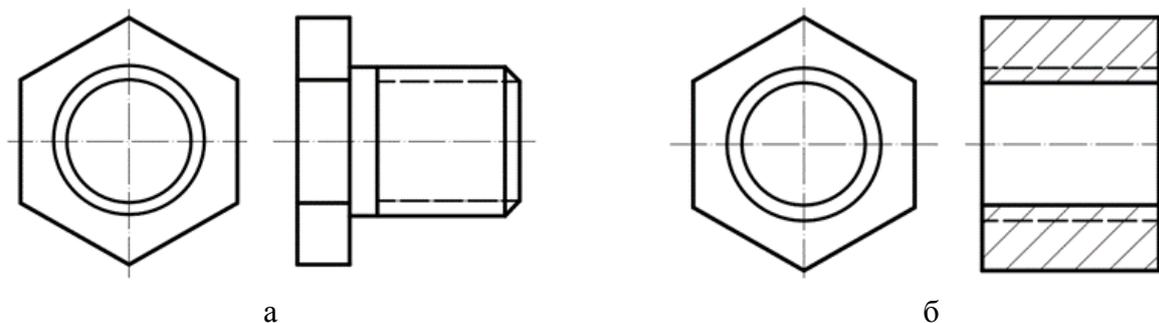


Рис. 2- Условное изображение резьбы по стандарту ANSI Y14.6- 1981:  
а – на наружной поверхности; б – на внутренней поверхности.

Что касается, форм записей, шрифта, размещения текстовой и табличной информации и т.д. при оформлении конструкторской документации в США являются несущественными и не требуют отдельного рассмотрения.

#### **Выводы**

Высокие темпы научно-технического прогресса требуют скорейшего перевода экономики России на инновационный путь развития. Решающее значение в сложившейся ситуации имеет подготовка инженерных кадров новой формации способных разрабатывать высокотехнологичные образцы современной техники. И как следствие, инженерно-техническому работнику необходимо умение и навыки работы не только с отечественной научно-технической литературой, но и с зарубежной.

#### **Список литературы**

1. Райн Д. Инженерная графика в САПР: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 3091 с. ил.
2. Г. Монж. Начертательная геометрия. / Комментарии и редакция Д.И. Каргина. - М.: Изд-во АН СССР, 1974. -с.291.
3. Феоктистова Л.А., Рзаева Т.В., Егорова С.М., Марков Н.А. Американский метод образования проекций и их размещения на чертеже // Естественные и технические науки. № 12 (126). Москва 2018. – С. 305-307

05.13.18

**Д.Ю. Чернышов, В.И. Марчук д-р техн. наук,  
С.В. Маков канд. техн. наук, А.Ю. Минаев**

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ,  
факультет техники и технологии,  
кафедра радиоэлектронные и электротехнические системы и комплексы,  
Шахты, dimcher@inbox.ru

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ**

*В работе рассматривается механизм распространения сигнала в условиях городской местности, который характеризуются многопутным распространением радиоволн и явлением многократного переотражения волны. Представлена разработанная модель многопутного MIMO (Multiple Input Multiple Output) канала.*

Ключевые слова: *система связи, модель канала, MIMO, многопутное распространения сигнала.*

#### **Введение**

Для проверки работоспособности методов обработки сигналов и повышения их эффективности используется имитационное моделирование. Для проведения имитационного моделирования необходимо учесть механизм распространения сигнала, для этого используется модель канала связи. В городских условиях преобладает многопутный характер распространения радиоволн, а также возникает явление многократного переотражения, что, с одной стороны, способствует передаче сигнала в области затенения, с другой, приводит к возникновению межсимвольной интерференции. Для описания подобного рода канала связи в основном используются планарные модели, учитывающие распространение сигнала только по азимуту. Однако они не в полной мере отражают характер распространения радиоволн в городе, а также ограничивают расположение и выбор антенных систем для их оценки. В связи с чем, для проверки работоспособности методов обработки сигналов в условиях городской местности необходимо разработать трехмерную модель канала связи, учитывающую многопутный характер распространения волн.

#### **Модель канала связи**

В общем случае модель канала связи записывается с помощью выражения [1]:

$$y(t) = \int h(t) \cdot x(t) dt + \eta = h(t) \otimes x(t) + \eta, \quad (1)$$

где  $h(t)$  - импульсная характеристика канала связи,  $x(t)$  - передаваемый сигнал,  $y(t)$  - принимаемый сигнал,  $\eta$  - аддитивный шум.

Распространение сигнал в городской местности сильно отличается от распространения сигнала в свободном пространстве. В работах [2,3] было показано, что сигнал в городе проходит, в основном вдоль улиц за счет многократных переотражений, а также за счет дифракции от кромок крыш и домов. При этом выражение (1), в случае дискретной многопутности [1] преобразуется в выражение:

$$y(t) = \sum_{n=1}^N h_n(t) s(t, \tau_n) + \eta, \quad (2)$$

где  $N$  - количество путей распространения сигнала,  $\tau_i$  - задержка распространения для  $n$ -ого пути.

При этом выделяются следующие компоненты сигнала, распространяющегося в

городской местности: сигнал распространяющийся в пределах прямой видимости  $s_{los}(t)$ , отражённый и рассеянный сигнал  $s_{ref}(t)$ , сигнал распространяемый вследствие дифракции  $s_{dif}(t)$ , и их комбинация ( $s_{rd}(t)$ ,  $s_{dd}(t)$ ,  $s_{rr}(t)$ ,  $s_{dr}(t)$ ). Представление канала связи и распространение сигнала по азимуту показано на рисунке 1.

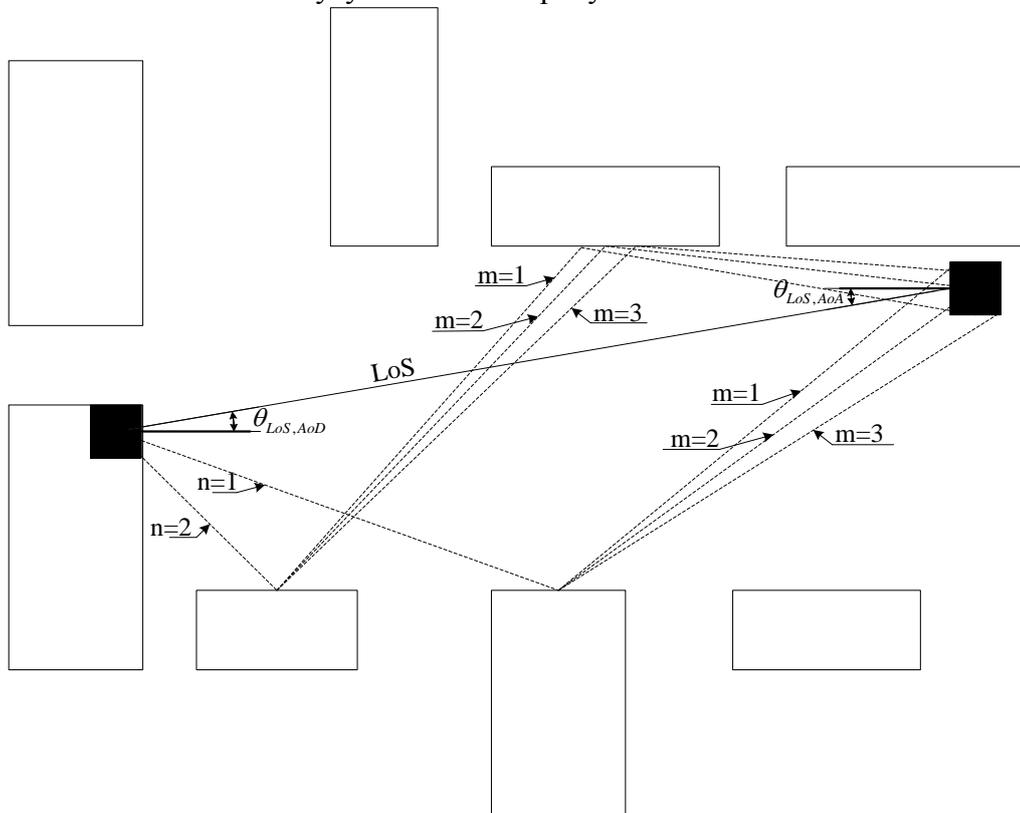


Рис. 1 – Представление канала связи и распространение сигнала по азимуту

Таким образом, результирующий сигнал можно описать как суперпозицию компонент сигнала, распространяющихся различным образом, и представляется в виде:

$$S_{\Sigma}(t) = S_{los}(t) + S_{dif}(t) + S_{ref}(t) + S_{rd}(t) + S_{dr}(t) + S_{rr}(t) + S_{dd}(t). \quad (3)$$

Импульсная характеристика такого канала будет описываться следующим образом:

$$h(t, \tau) = h_{los}(t, \tau) + h_{dif}(t, \tau) + h_{ref}(t, \tau) + h_{rd}(t, \tau) + h_{dr}(t, \tau) + h_{rr}(t, \tau) + h_{dd}(t, \tau) \quad (4)$$

Сигнал, распространяемый в пределах прямой видимости вносит наибольший вклад в результирующий сигнал. Как было показано в работе [4] вероятность появления сигнала в пределах прямой видимости описывается с помощью выражения:

$$P_l(0) = e^{-\gamma_0 l}, \quad (5)$$

где  $l$  - расстояние между приемником и передатчиком,  $\gamma_0$  - среднее число пересечений на единице длины.

Тогда средняя горизонтальная дальность прямой видимости описывается выражением:

$$\bar{p} = \gamma_0^{-1}. \quad (6)$$

При случайном расположении городских зданий, представленных непрозрачными экранами, углы поворота которых распределены от 0 до  $2\pi$ , по нормальному закону распределения, средняя дальность прямой видимости находится из выражения:

$$\bar{p} = \frac{\pi l_0^2}{2\langle L \rangle}, \quad (7)$$

где  $l_0$  - среднее расстояние между центрами экранов,  $\langle L \rangle$  - средний горизонтальный размер экранов.

Как было показано в работе [4] выражение (7) подчиняется распределению Пуассона.

Учитывая, что приемник перемещается только по азимуту, импульсная характеристика, компоненты сигнала распространяемой в пределах прямой видимости описывается с помощью выражения:

$$h_{los}(t, P_l(0)) = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \cdot \sqrt{G_{TX}(\theta_{TX}, \varphi_{TX}, P_l(0))} \cdot \sqrt{G_{RX}(\theta_{RX}, \varphi_{RX}, P_l(0))} \times \\ \times \exp(jkd_{TX,hor} \sin(\theta_{TX})) \cdot \exp(jkd_{TX,ver} \sin(\varphi_{TX})) \times \\ \times \exp(jkd_{RX,hor} \sin(\theta_{RX})) \cdot \exp(jkd_{RX,ver} \sin(\varphi_{RX})) \times \\ \times \exp(jkv \cdot \cos(\theta_{RX} - \theta_v) t), \quad (8)$$

где  $K$  - коэффициент Райса,  $G_{TX}$  - коэффициент усиления антенны передатчика,  $G_{RX}$  - коэффициент усиления антенны приемника,  $k$  - волновое число,  $d_{TX,hor}$ ,  $d_{TX,ver}$  - дистанция между антенными элементами передатчика, относительно первого элемента, в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно,  $d_{RX,hor}$ ,  $d_{RX,ver}$  - дистанция между антенными элементами приемника, относительно первого элемента, в горизонтальной и вертикальной плоскости, соответственно.  $\theta_{TX}$ ,  $\varphi_{TX}$ , - углы положения передатчика по азимуту и углу места, соответственно,  $\theta_{RX}$ ,  $\varphi_{RX}$  - углы положения приемника по азимуту и углу места, соответственно,  $v$  - скорость движения приемника,  $\theta_v$  - угол движения приемника по азимуту.

Волны, подвергающиеся многократной дифракции  $s_{dd}(t)$  имеют большой коэффициент ослабления в связи с чем, они не оказывают существенное влияние на результирующий сигнал на приемнике [5]. В том случае, когда сигнал попадает на поверхность в несколько раз превышающую длину волны происходит переотражение сигнала. Вероятность отражения сигнала в условиях города описывается выражением:

$$P_l(q) = \frac{(\bar{q}_l)^q}{q!} e^{-\bar{q}_l}, \quad (9)$$

где  $\bar{q} = \gamma_0 l$  - среднее число пересечений между приемником и передатчиком.

Данное выражение, также как и в случае вероятности возникновения прямой видимости подчиняется Пуассоновскому распределению [4].

Как было описано ранее, основным источником отражения являются здания, земля и транспортные средства. Поверхность зданий и земли, в общем случае представляется в виде экрана с шероховатой поверхностью, высота неравномерности которой зависит от координат поверхности, и изменяется по нормальному закону распределения [6].

В работе [7] показано, что в том случае, когда высота неровностей  $H \ll \frac{\lambda}{16 \sin(\psi)}$ , то

происходит зеркальное отражение волны от поверхности. Если же условия не выполняются, то происходит полурассеянное отражение волны, при котором происходит разделение одного пути распространения сигнала на множество подпутей, которые, в свою очередь, также могут разделиться на подпути в случае полурассеянного отражения.

При этом, импульсная характеристика, компоненты сигнала распространяемой за счет переотражений описывается с помощью выражения:

$$h_{ref}(t, \tau, \psi) = \sqrt{\frac{E_n}{M}} \cdot \sum_{m=1}^M \left( \begin{aligned} & \sqrt{G_{TX}(\theta_{n,m,AoD}, \varphi_{n,m,AoD}, P_{n,m}(q))} \cdot \sqrt{G_{RX}(\theta_{n,m,AoA}, \varphi_{n,m,AoA}, P_{n,m}(q))} \times \\ & \times \exp(jkd_{TX,hor} \sin(\theta_{n,m,AoD})) \cdot \exp(jkd_{TX,ver} \sin(\varphi_{n,m,AoD})) \times \\ & \times \exp(jkd_{RX,hor} \sin(\theta_{n,m,AoA})) \cdot \exp(jkd_{RX,ver} \sin(\varphi_{n,m,AoA})) \times \\ & \times \exp(jkv \cdot \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v) t) \end{aligned} \right), \quad (10)$$

где  $n$  - текущий путь,  $m$  - текущий подпуть,  $\theta_{n,m,AoD}, \varphi_{n,m,AoD}$  - углы передачи сигнала  $n$ -ого пути,  $m$ -ого подпути,  $\theta_{n,m,AoA}, \varphi_{n,m,AoA}$  - углы приема сигнала  $n$ -ого пути,  $m$ -ого подпути,  $P_{n,m}(q)$  - вероятность появления  $n$ -ого пути,  $m$ -ого подпути,  $\psi$  - угол падения,  $E_n$  - мощность  $n$ -ого пути.

**Заключение**

В данной статье был рассмотрен механизм распространения сигнала в условиях городской застройки. Представленная новая трехмерная модель канала связи, учитывающая механизм распространения сигнала в условиях городской застройки, представляющая собой суперпозицию сигналов распространяющихся по различным путям от передатчика до приемника.

**Список литературы**

1. Прокис Д. Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000 – 800 с.
2. Laurila J., Kalliola K., Toeltsch M., Hugel K., Vainikainen P., Bonek E. Wide-band 3-D characterization of mobile radio channels in urban environment. IEEE Trans. Antennas Propagation., 2002, vol. 50, No. 2, pp. 233-243.
3. Karasawa Y. Multipath propagation theory and modeling in wideband mobile radio: the “ETP model”, connecting “Propagation” and “System”. The Radio Science Bulletin No 302 (September, 2002), pp. 5-15.
4. Гавриленко В.Г., Яинов В.А. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи //Нижний Новгород, 2003. – 148 с.
5. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. -М.: Сов. радио, 1972.-464с.
6. Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности // М.: Наука. – 1972. – Т. 424. – С. 207.

**АННОТАЦИИ  
ABSTRACTS****С.А. Духновский  
ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РЕШЕНИЙ  
КИНЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ГОДУНОВА-  
СУЛТАНГАЗИНА**

*Ключевые слова:* система Годунова-Султангазина, устойчивость, число Кнудсена.

*В работе рассматривается кинетическая система уравнений Годунова-Султангазина. Система Годунова-Султангазина является частным случаем дискретного уравнения Больцмана. Формулируется теорема о стабилизации решений системы Годунова-Султангазина.*

**S.A. Dukhnovsky  
EXPONENTIAL STABILITY OF SOLUTIONS OF THE  
KINETIC SYSTEM OF GODUNOV-SULTANGAZIN  
EQUATIONS**

*Keywords:* system Godunov-Sultangazin, stability, number Knudsen.

*In this article we discuss the kinetic system of Godunov-Sultangazin equations. The Godunov-Sultangazin system is a special case of the discrete Boltzmann equation. A theorem on the stabilization of solutions of the Godunov-Sultangazin system is formulated.*

**В.Ш. Ройтенберг  
О ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЯХ БЕРНУЛЛИ  
С ПЕРИОДИЧЕСКИМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ**

*Ключевые слова:* дифференциальное уравнение Бернулли с периодическими коэффициентами, цилиндрическое фазовое пространство, грубое уравнение, предельный цикл.

*Для уравнений Бернулли с периодическими коэффициентами рассматриваются фазовые портреты на компактификации цилиндрического фазового пространства. Описаны грубые уравнения – уравнения, топологическая структура фазовых портретов которых не меняется при малых возмущениях коэффициентов.*

**V.Sh. Roitenberg  
ON BERNOULLI DIFFERENTIAL EQUATION WITH  
PERIODIC COEFFICIENTS**

*Keywords:* Bernoulli differential equation with periodic coefficients, cylindrical phase space, structurally stable equation, limits cycle.

*For Bernoulli equations with periodic coefficients, phase portraits on the compactification of a cylindrical phase space are considered. We describe structurally stable equations – equations whose topological structure of phase portraits does not change with small perturbations of coefficients.*

**С.И. Гурский, В.А. Тафеенко  
ВЛИЯНИЕ ДВУХЗАРЯДНЫХ КАТИОНОВ ПЕРЕХОДНЫХ  
МЕТАЛЛОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ АНИОНА 3-ЦИАНО-4-  
ДИЦИАНОМЕТИЛЕН-5-ОКСО-4,5-ДИГИДРО-1Н-ПИРРОЛ-2-  
ОЛАТА В АЦЕТОНИТРИЛЕ**

*Ключевые слова:* люминесценция, сенсор на медь(II), хромато-масс-спектрометрия.

*В статье представлены данные по фотолюминесценции 3-циано-4-дицианометилена-5-оксо-4,5-дигидро-1Н-пиррол-2-олат калия K(HA) в растворе в ацетонитриле в результате добавления перхлората меди(II). Эффект увеличения, вызванный катионами меди(II), оказался селективен по отношению к влиянию двухзарядных катионов других переходных металлов на люминесценцию аниона HA<sup>-</sup>. На основании данных хромато-масс-спектрометрии предложена модель, объясняющая влияние меди(II) на интенсивность люминесценции HA<sup>-</sup>.*

**S.I. Gurskiy, V.A. Tafeenko  
EFFECT OF DOUBLY-CHARGED TRANSITION METAL  
CATIONS ON LUMINESCENCE OF 3-CYANO-4-  
DICYANOMETHYLENE-5-OXO-4,5-DIHYDRO-1H-  
PYRROLE-2-OLATE ANION IN ACETONITRILE**

*Keywords:* luminescence, copper(II) sensor, chromatography-mass spectrometry.

*In current article an influence of copper(II) perchlorate addition on luminescence intensity of potassium 3-cyano-4-dicyanomethylene-5-oxo-4,5-dihydro-1H-pyrrole-2-olate K(HA) acetonitrile solution is studied. Sharp increase effect caused by copper(II) cations turned out to be selective with respect to influence of other doubly-charged transition metal cations on luminescence intensity of HA<sup>-</sup> anion. On the basis of chromatography-mass spectrometry data we proposed model explaining copper(II) impact on luminescence intensity of HA<sup>-</sup>.*

**И.М. Ильина, Е.А. Петровичева  
ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ  
ПРЕДРЕАКТОРОВ НА ТУРБУЛЕНТНОЕ ТЕЧЕНИЕ**

*Ключевые слова:* предреактор, конфузур – диффузор, смешение. В статье приводятся результаты исследования формы профиля рабочей зоны трубчатых предреакторов. Вследствие этого интенсифицируется массообмен и теплопередача, что позволяет широко использовать эти аппараты для физико-химических процессов в ряде отраслей экономики.

**I.M. Ilyina, E.A. Petrovicheva  
THE EFFECT OF CONSTRUCTION WORKING ZONES ON  
PREDICTOR OF TURBULENT FLOW**

*Keywords:* pre – reactor, confusor-diffuser, mixing.

*The article presents the results of the study of the profile shape of the working zone of tubular pre-reactors. As a result, mass transfer and heat transfer are intensified, which makes it possible to widely use these devices for physical and chemical processes in a number of sectors of the economy.*

**Г.Е. Кокиева, А.И. Павлова, И.Н. Аммосов, Д.А. Соколов,  
Г.Н. Сидоров, М.Р. Слепцов, А.А. Корякин, А.Г. Васильев  
ПРОЦЕСС АЭРИРОВАНИЯ В АЭРАТОРЕ КОЛОНКОВОГО  
ТИПА**

*Ключевые слова:* массообмен, аппарат, биореактор, массопередача, газосодержание, производительность, циркуляция, зона.

*В данной статье описывается синтез модели процесса культивирования. Этот метод позволяет регулировать степень аэрации и учитывать ее количество. Способствует удалению от клеток микроорганизма продуктов обмена и лизиса, с также обеспечивает равномерное распределение кислорода в культуральную жидкость по всему объему ферментатора.*

**G.E. Kokieva, A.I. Pavlova, I.N. Ammosov, D.A. Sokolov,  
G.N. Sidorov, M.R. Slepsov, A.A. Koryakin, A.G. Vasiliev  
THE PROCESS OF AERATION IN THE AERATOR CORE  
TYPE**

*Keywords:* mass transfer, apparatus, bioreactor, mass transfer, gas content, productivity, circulation, zone.

*This article describes the synthesis model of the cultivation process. This method allows you to adjust the degree of aeration and take into account its amount. It helps to remove from the cells of the microorganism products of metabolism and lysis, C also provides a uniform distribution of oxygen in the culture fluid throughout the volume of the fermenter.*

Г.Е. Кокеева, А.И. Павлова, А.К. Иванов  
ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА МИКРОБНОГО СИНТЕЗА  
В ОБОРУДОВАНИИ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

*Ключевые слова:* экспериментальные исследования, микробный синтез, кормовой белок, скорость циркуляции жидкости, концентрация растворенного кислорода, кормовая добавка.  
В производствах БВК продуценты кормового белка являются аэробными микроорганизмами. Их выращивание в производственных ферментаторах обычно осуществляют непрерывным способом. Массообмен играет решающую роль в достижении заданной производительности аппарата, если соблюдаются технологические и микробиологические условия. Можно считать установленным тот факт, что микроорганизмы потребляют только растворенный кислород. Кислород является труднорастворимым газом. Потребление кислорода происходит со скоростью, не зависящей от концентрации растворенного кислорода до тех пор, пока остается выше критической. Влияние величины скорости растворения кислорода на процесс роста микроорганизмов не требуется.

G.E. Kokieva, A.I. Pavlova, A.K. Ivanov  
THE INTENSIFICATION OF THE PROCESS OF  
MICROBIAL SYNTHESIS IN HARDWARE OF A NEW  
DESIGN

*Keywords:* experimental study, microbial synthesis and feed protein, the rate of circulation of the liquid, the concentration of dissolved oxygen, a feed additive.  
In the production of BVK feed protein producers are aerobic microorganisms. Their cultivation in production fermenters is usually carried out in a continuous manner. Mass transfer plays a crucial role in achieving the desired performance of the device, if the technological and microbiological conditions are met. It can be considered established that microorganisms consume only dissolved oxygen. Oxygen is an insoluble gas. Oxygen consumption occurs at a rate independent of the dissolved oxygen concentration as long as it remains above the critical level. The influence of the oxygen dissolution rate on the growth of microorganisms is not required.

А.В. Митрофанова, Е.А. Фортальнова, М.Г. Сафроненко,  
Е.Д. Политова, А.В. Мосунов  
ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ТВЁРДЫХ РАСТВОРОВ  
НА ОСНОВЕ СЛОИСТОГО ТИТАНАТА ФЕРРИТА  
ВИСМУТА, СОДЕРЖАЩИХ КАТИОНЫ Nb(V)

*Ключевые слова:* титанат феррит висмута, фазообразование, фаза Ауривиллиуса, слоистый перовскит, сегнетоэлектрик, сегнетомагнетик, мультиферроик.  
Исследованы фазообразование и физико-химические свойства твёрдых растворов  $Bi_3Fe_{1+y}Ti_{3-2y}Nb_yO_{15}$  с  $y = 0.0 - 1.0$  и  $\Delta y = 0.2$ , полученных с использованием мuffleного и микроволнового способов термообработки в ходе синтеза. Установлено, что в области гомогенности  $0.0 \leq y \leq 0.4$  полученные фазы характеризуются ромбическим типом симметрии элементарной ячейки. Выявлено, что увеличение содержания катионов Nb(V) в составе полученных фаз приводит к возрастанию объёма элементарной ячейки и понижению температуры сегнетоэлектрического фазового перехода.

A.V. Mitrofanova, E.A. Fortalnova, M.G. Safronenko,  
E.D. Politova, A.V. Mosunov  
PHASE FORMATION AND PROPERTIES OF SOLID  
SOLUTIONS BASED ON LAYERED BISMUTH  
TITANATE FERRITE CONTAINING Nb(V) CATIONS

*Keywords:* bismuth titanate ferrite, phase formation, Aurivillius phase, layered perovskite, ferroelectric, multiferroic.  
Phase formation, physical and chemical properties of  $Bi_3Fe_{1+y}Ti_{3-2y}Nb_yO_{15}$  solid solutions with  $y = 0.0 - 1.0$  and  $\Delta y = 0.2$  were studied. The synthesis was carried out using muffle and microwave heat treatment methods. It was established that the phases obtained are orthorhombic in the homogeneity region of  $0.0 \leq y \leq 0.4$ . It was revealed that an increase in Nb(V) cations content leads to an increase in the unit cell volume, while the temperature of the ferroelectric phase transition decreases.

Е.Ю. Образцова, А.В. Рухов, И.А. Жабкина, Е.С. Бакунин  
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ АДсорбЦИИ  
КРАСИТЕЛЯ МЕТИЛОВОГО ОРАНЖЕВОГО НА  
ПОВЕРХНОСТИ ОКИСЛЕННОГО НАНОГРАФИТА,  
СИНТЕЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ  
СПОСОБОМ

*Ключевые слова:* оксид нанографита, метиловый оранжевый, адсорбция.  
Установлено, что наиболее адекватно процесс адсорбции метилового оранжевого на поверхности окисленного нанографита, полученного электрохимическим способом, описывает уравнение Фрейндлиха, при этом энергия активации, вычисленная исходя из уравнения Дубинина-Радушкевича составляет 0,8 кДж/моль, что говорит о физической природе адсорбции метилового оранжевого на поверхности окисленного нанографита.

E.Yu. Obraztsova, A.V. Rukhov, I.A. Gabkina, E.S. Bakunin  
PHYSICAL AND CHEMICAL FEATURES OF  
ADSORPTION OF METHYL ORANGE DYE ON THE  
SURFACE OF OXIDIZED NANOGRAPHITE  
SYNTHESIZED BY ELECTROCHEMICAL METHOD

*Keywords:* nanografite oxide, methyl orange, adsorption.  
It was found that the most adequate adsorption process of methyl orange on the surface of oxidized nanographite obtained by electrochemical method describes the Freundlich equation, while the activation energy calculated from the Dubinin-Radushkevich equation is 0.8 kJ / mol, which indicates the physical nature of the adsorption.

И.С. Полковников, В.В. Пантелеева, А.Б. Шеин  
АНОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА МОНОСИЛИЦИДЕ МАРГАНЦА  
В РАСТВОРАХ ХЛОРОВОДОРОДНОЙ КИСЛОТЫ

*Ключевые слова:* силицид марганца MnSi, анодное окисление, пассивация, хлороводородная кислота.  
Установлены кинетические закономерности анодного поведения MnSi-электрода в растворах 1.0 M HCl и 0.1 M HCl + 0.9 M NaCl. Сделан вывод, что в процессе анодного окисления на поверхности силицида марганца формируется оксидная пленка, близкая по составу к SiO<sub>2</sub>. Рассчитаны толщина оксидной пленки и ее удельное сопротивление в зависимости от потенциала электрода и кислотности среды.

I.S. Polkovnikov, V.V. Panteleeva, A.B. Shein  
ANODIC PROCESSES ON MANGANESE MONOSILICIDE  
IN HYDROCHLORIC ACID

*Keywords:* manganese silicide MnSi, anodic oxidation, passivation, hydrochloric acid.  
The kinetic regularities of the anodic behavior of the MnSi electrode in solutions of 1.0 M HCl and 0.1 M HCl + 0.9 M NaCl have been established. It was concluded that in the process of anodic oxidation an oxide film is formed on the surface of manganese silicide, which is close in composition to SiO<sub>2</sub>. The thickness of the oxide film and its specific resistance are calculated depending on the potential of the electrode and the acidity of the solution.

А.Ю. Барыкин, Д.И. Нуретдинов, А.М. Фролов, С.М. Кучев  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ПАРАМЕТРОВ И РЕСУРСА АВТОМОБИЛЬНОГО  
ДВИГАТЕЛЯ

*Ключевые слова:* двигатель внутреннего сгорания, моторное масло, ресурс двигателя, угар масла, картерные газы.

*В статье изучены возможности реализации бортового контроля ресурса автомобильного двигателя по косвенным параметрам. Разработан способ оценки расхода моторного масла, связанного с вероятным безотказным пробегом двигателя.*

А.П. Буйносов, К.Н. Яковлев, А.В. Хваловский  
ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОКОМОТИВОВ  
НА ИЗНОС БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

*Ключевые слова:* локомотив, эксплуатация, условия, колесная пара, бандаж, износ, влияние.

*В статье приводятся результаты климатических условий эксплуатации на износ гребня и нарастание прокат бандажей колесных пар локомотивов на Урало-Сибирском полигоне ОАО «РЖД».*

Н.Н. Заболотская, Г.Ф. Журавлева  
ПРЕИМУЩЕСТВА ВНЕДРЕНИЯ СИСТЕМЫ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА НА ПАО «КАМАЗ»

*Ключевые слова:* экологический менеджмент, окружающая среда, экологическая политика, предприятие, внедрение системы.

*В работе представлены результаты исследования преимуществ внедрения системы экологического менеджмента (СЭМ) на ПАО КАМАЗ. Ежегодно проводимая инспекционная проверка СЭМ АС «Русский Регистр» подтверждает соответствие действующей в ПАО КАМАЗ системы МС ИСО 14001.*

О.Ю. Кустов, И.В. Храмов, Р.В. Бульбович, М.А. Лобов  
ОЦЕНКА АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ ПРИ  
НАКЛОННОМ РАСПОЛОЖЕНИИ В ИНТЕРФЕРОМЕТРЕ

*Ключевые слова:* звукопоглощающие конструкции; 3D-печать; акустические характеристики; импеданс; интерферометр с нормальным падением волн.

*На основе технологии 3D-печати создан образец однослойной сотовой звукопоглощающей конструкции из PET-пластика со стандартным размером сотовой ячейки и со степенью перфорации 5%. Акустические характеристики данного образца имеют хорошее согласование с аналогичными образцами, напечатанными под наклоном. Акустические характеристики определялись на интерферометре с нормальным падением волн.*

В.С. Наговицын, А.П. Буйносов, С.И. Лаптев  
ОРГАНИЗАЦИЯ РЕМОНТА ГАЗОТУРБОВОЗОВ В  
СЕРВИСНЫХ ЛОКОМОТИВНЫХ ДЕПО НА ПОЛИГОНЕ  
ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

*Ключевые слова:* железная дорога, полигон, локомотив, газотурбовоз, ремонт, депо, сервис, организация.

*В статье рассматривается модель организации ремонта газотурбовозов, приписанных к эксплуатационным локомотивным депо, а выполняющих ремонт в сервисных локомотивных депо. Используя модель можно создать программный продукт для распределения текущих ремонтов локомотивов между сервисными предприятиями для наилучшей их загрузки.*

Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, П.М. Дёмкин, К.Ю. Панькин  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕПЛОВЫХ  
ПРОЦЕССОВ В СИЛОВОМ ДИОДЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
УДАРНОГО ТОКА

*Ключевые слова:* моделирование, силовой диод, ударный ток, Multisim.

*В статье приведены результаты моделирования электрических и тепловых процессов, протекающих в силовом диоде Д161-200,*

A.Yu. Barykin, D.I. Nuretdinov, A.M. Frolov, S.M. Kuchev  
RESEARCH OF THE INTERRELATION OF  
OPERATIONAL PARAMETERS AND THE RESOURCE OF  
THE MOTOR ENGINE

*Keywords:* internal combustion engine, engine oil, engine resource, oil loss, crankcase gases.

*The article examines the possibility of implementing on-board control of the resource of an automobile engine using indirect parameters. A method has been developed for estimating the consumption of engine oil associated with the likely trouble-free mileage of the engine.*

A.P. Buinosov, K.N. Yakovlev, A.V. Chvalovsky  
THE INFLUENCE OF THE OPERATING CONDITIONS OF  
THE LOCOMOTIVES ON THE WEAR OF WHEEL PAIR  
TREADS

*Keywords:* locomotive, operation, conditions, wheelset, bandage, wear, impact.

*The article presents the results of climatic conditions of operation for the wear of the ridge and the increase in rolling bandages of wheel pairs of locomotives in the Ural-Siberian landfill of JSC «Russian Railways».*

N.N. Zabolotskaya, G.F. Zhuravleva  
ADVANTAGES OF INTRODUCING THE SYSTEM OF  
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AT KAMAZ PJSC

*Keywords:* environmental management, environment, environmental policy, enterprise, system implementation.

*The paper presents the results of a study of the benefits of implementing an environmental management system (EMS) at PJSC KAMAZ. The annual inspection inspection of the EMS of the Russian Register Register confirms the compliance of the MS ISO 14001 system in force at KAMAZ.*

O.Yu. Kustov, I.V. Khramtsov, R.V. Bulbovich, M.A. Lobov  
ESTIMATION OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF  
SOUND-ABSORBING STRUCTURE AT INCLINED  
ORIENTATION IN INTERFEROMETER

*Keywords:* acoustic liners, 3D-printing, acoustical characteristics, impedance, normal incidence interferometer.

*Based on the 3D printing technology, a sample of a single-layer honeycomb sound-absorbing structure made of PET plastic with a standard cell size and perforation degree of 5% was created. The acoustic characteristics of this sample are in good agreement with samples of the inclined orientation. Acoustic characteristics were determined on normal incidence interferometer.*

V.S. Nagovitsyn, A.P. Buinosov, S.I. Laptev  
ORGANIZATION OF REPAIR OF LOCOMOTIVE  
SERVICE LOCOMOTIVE DEPOT AT THE SITE OF THE  
RAILWAY

*Keywords:* railway, landfill, locomotive, gas turbine, repair, depot, service, organization.

*The article deals with the model of the organization of repair of gas turbine locomotives, assigned to the operational locomotive depot, and perform repairs in the service locomotive depot. Using the model, you can create a software product for the distribution of current repairs of locomotives between service enterprises for their best load.*

N.N. Bepalov, Y.V. Goryachkin, P.M. Dyomkin, K.Y. Pankin  
MODELING OF ELECTRICAL AND THERMAL  
PROCESSES OCCURRING IN THE POWER DIODE AT  
THE IMPACT OF THE CURRENT

*Keywords:* modeling, power diode, shock current, Multisim  
*The article presents the results of modeling of electrical and thermal processes occurring in the power diode D161-200, under the influence of shock current. The simulation was*

при воздействии ударного тока. Моделирование проведено в программной среде Multisim. На основании результатов исследования определены необходимые величины параметров аппаратно-программного комплекса для испытания силовых полупроводниковых приборов.

Н.Н. Беспалов, Ю.В. Горячкин, К.Ю. Панькин, П.М. Дёмкин  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ МИКРОСХЕМ  
ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛООВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ПЕРЕХОД-КОРПУС

Ключевые слова: тепловое сопротивление, микросхема, транзистор, p–n переход, термочувствительный параметр, время задержки, моделирование, температура.

Определение теплового сопротивления переход-корпус микросхем с относительно высокой точностью позволяет оценивать тепловой режим микросхемы при эксплуатации. В статье приведены результаты моделирования электрических и тепловых процессов в специализированной микросхеме I24KT1 при испытании по стандартной методике определения теплового сопротивления. Результаты исследования получены на основе моделирования в программной среде Synopsys TCAD. Показано, что для достижения погрешности определения  $R_{T,ПК}$  не более 3% требуется обеспечение подачи импульсов измерительного тока после окончания импульсов греющего тока через время задержки  $t_{зд}$  не более 2 мкс.

Н.Н. Беспалов, А.В. Евишев, Д.С. Кондрашин  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЯ СИЛОВЫХ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В СОСТОЯНИИ  
НИЗКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Ключевые слова: генератор испытательных высоковольтных сигналов, состояние низкой проводимости, силовой диод, токовый шунт, аппаратно-программный комплекс.

В статье приведены некоторые результаты исследования электрических режимов испытания силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости в испытательной цепи и измерения их параметров на основе моделирования в программной среде Multisim. Исследования проводились для выбора предельных значений параметров высоковольтного генератора испытательных сигналов аппаратно-программного комплекса для испытания силовых полупроводниковых приборов в состоянии низкой проводимости. Моделировалась испытательная цепь с силовым диодом с диаметром кристалла равным 100 мм. Исследованы электрические характеристики этой цепи при различных значениях температуры полупроводниковой структуры силового диода и сопротивления токоизмерительного шунта. Получены обоснованные величины параметров испытательной цепи.

М.П. Данилаев, Н.В. Дорогов, Ф.А. Карамов, В.А. Куклин,  
А.В. Пушкарева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВА,  
ФОРМИРУЮЩЕГО НИЗКОСКОРОСТНОЙ ДВУХФАЗНЫЙ  
ГАЗОВЫЙ ПОТОК С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ  
СУБМИКРОННОГО РАЗМЕРА

Ключевые слова: низкоскоростной двухфазный газовый поток, субмикронные частицы, расход частиц.

В работе предложен метод создания двухфазного газового потока с твердыми частицами субмикронного размера. Исследования характеристик на экспериментальной установке, показали возможность создания газового потока с практически неизменяющейся скоростью ( $1 \div 3$  м/с) и с регулируемым расходом субмикронных частиц в широком диапазоне  $1 \div 40$  мг/с.

А.В. Мускатиньев, П.П. Балясов  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА В  
НАПРЯЖЕНИЕ

Ключевые слова: тиристор, время задержки включения, микроконтроллер, измерение, температурная стабильность. В статье рассматривается принципиальная схема устройства,

carried out in the Multisim modeling environment. Based on the results of the study, the necessary parameters of the hardware and software complex for testing power semiconductor devices were determined.

N.N. Bespalov, Y.V. Goryachkin, K.Y. Pankin, P.M. Dyomkin  
MODELING TEST MODES FOR MICROCIRCUITS IN  
DETERMINING THE THERMAL RESISTANCE OF  
JUNCTION-CASE

Keywords: thermal resistance, microcircuit, transistor, p – n junction, thermo-sensitive parameter, delay time, simulation, temperature.

Determining the thermal resistance of junction-case of microcircuits with relatively high accuracy allows evaluating the thermal mode of the microcircuit during operation. The article presents the results of modeling electrical and thermal processes in a specialized chip I24KT1 when tested according to the standard method for determining thermal resistance. The results of the study were obtained based on of modeling in the Synopsys TCAD software. It is shown that to achieve an error in determining  $R_{th}$  no more than 3%, it is necessary to ensure the supply of measuring current pulses after the termination of the heating pulses after a delay time  $t_{delay}$  not more than 2  $\mu$ s.

N.N. Bespalov, A.V. Evishev, D.S. Kondrashin  
MODELING OF TEST MODES POWER  
SEMICONDUCTOR DEVICES IN A STATE OF LOW  
CONDUCTIVITY

Keywords: high voltage test signal generator, low conductivity state, power diode, current shunt, hardware – software complex.

The article presents some results study electrical modes of testing power semiconductor devices in a state of low conductivity in test circuit and measuring their parameters based on modeling in Multisim software environment. Studies were conducted to select the limiting values parameters high-voltage generator of test signals a hardware-software complex for testing power semiconductor devices in a state of low conductivity. A test circuit with a power diode with a crystal diameter of 100 mm was simulated. The electrical characteristics of this circuit are investigated at various temperatures semiconductor structure of a power diode and resistance of a current-measuring shunt. Obtained reasonable values parameters test circuit.

М.П. Данилаев, Н.В. Дорогов, Ф.А. Карамов, В.А. Куклин,  
А.В. Пушкарева

THE DEVICE FOR LOW-SPEED TWO-PHASE GAS FLOW  
FORMING WITH SUBMICRONIC SIZE SOLID  
PARTICLES

Keywords: low-speed two-phase gas flow, submicron particles, particle consumption.

The method for formation the two-phase gas flow with submicron size solid particles is considered in that paper. It is showing the possibility of two-phase gas flow creating with stability rate ( $1 \div 3$  m / s) and controlling consumption of submicron particles in the range of  $1 \div 40$  mg / s.

А.В. Мускатиньев, П.П. Балясов  
PULSE DURATION CONVERTER VOLTAGE

Keywords: thyristor, turn-on delay time, microcontroller, measurement, temperature stability.

The article provides a schematic diagram of the device, allowing the use of the dynamic range of measuring the pulse

применение которой позволяет расширить динамический диапазон измерения длительности импульсов в области малых значений. Приводятся результаты моделирования и оценивается температурная стабильность преобразователя.

duration in the region of small values. The simulation results are presented and the temperature stability of the converter is estimated.

И.В. Нелин, М.К. Седанкин, С.Г. Веснин, В.А. Скуратов,  
С.Д. Мерцалов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ПОЧКИ  
ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ**

*Ключевые слова:* микроволновая радиотермометрия, радиотермометр, радиояркость температура, медицинская робототехника, пузырьно-мочеточниковый рефлюкс.

Проведено математическое моделирование теплообменных процессов для слоистой модели, содержащей нагретую почку. Математическое моделирование выполнено на основе численного решения уравнения тепло-массопереноса с помощью метода конечных элементов. Получена аппроксимирующая функция для температурного распределения. Использование полученных закономерностей позволит решать задачи радиотермометрии, связанные с разработкой новой медицинской техники.

I.V. Nelin, M.K. Sedankin, S.G. Vesnin, V.A. Skuratov,  
S.D. Mertsalov

**MATHEMATICAL SIMULATION OF HEATING OF  
KIDNEY FOR SOLVING THE PROBLEMS OF  
RADIOMETRY**

*Keywords:* microwave radiometry, radiometer, brightness temperature, medical robotics, VUR.

Mathematical simulation of heat exchange processes for a layered model containing a heated kidney was carried out. Mathematical simulation was performed on the basis of a numerical solution of the heat and mass transfer equation using the finite element method. An approximation function for the temperature distribution is obtained. The use of the obtained laws will allow to solve the problems of radiometry associated with the development of new medical equipment.

П.В. Писарев, А.А. Паньков, А.Н. Аношкин  
ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ АКУСТИЧЕСКОЙ

**ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЗОНАТОРОВ ГЕЛЬМГОЛЬЦА  
ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ И КОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

*Ключевые слова:* звукопоглощающие конструкции, резонатор Гельмгольца, влияние формы, конический резонатор, коэффициент потери акустического давления, численное моделирование.

В рамках данной работы сформулированы физическая и математическая модели прогнозирования акустической эффективности резонансных ячеек звукопоглощающих конструкций призматической и биконической формы. Осуществлен расчет коэффициента потери акустического давления волны на выходе из канала для различных геометрических форм камеры и горла рассматриваемых ячеек для монохроматической звуковой волны в диапазоне частот 100-600 Гц. Анализ полей акустических давлений выявил сильное влияние геометрии горла ячейки на резонансную частоту ячейки и на коэффициент потери акустического давления. Подтверждена эффективность предложенной авторами биконической формы резонансной ячейки.

P.V. Pisarev, A.A. Pankov, A.N. Anoshkin  
NUMERICAL CALCULATION OF ACOUSTIC  
EFFICIENCY OF HELMHOLTZ RESONATORS OF  
PRISMATIC AND CONICAL FORMS

*Keywords:* sound-absorbing structures, Helmholtz resonator, shape effect, conical resonator, acoustic pressure loss coefficient, numerical simulation.

In the framework of this work, physical and mathematical models are formulated for predicting the acoustic efficiency of resonant cells of sound-absorbing structures, prismatic and biconical forms. The coefficient of acoustic pressure loss at the exit from the channel was calculated for various geometric shapes of the chamber and throat of the considered cells for a monochromatic sound wave in the frequency range 100-600 Hz. An analysis of the acoustic pressure fields revealed a strong influence of the geometry of the cell throat on the resonant frequency of the cell and on the coefficient of acoustic pressure loss. The effectiveness of the biconical form of the resonant cell proposed by the authors was confirmed.

А.Г. Шляхова, А.Т. Шляхов, Л.А. Гайнулова  
АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ВЕЩЕСТВ

*Ключевые слова:* дифференциально – сканирующая калориметрия (ДСК), анизотропный термоэлемент (АТЭ), быстроедействие, чувствительность.

Рассмотрены пути повышения чувствительности термического анализа. В качестве теплового сенсора применена батарея из анизотропных термоэлементов (АТЭ) из висмута, сочетающих высокую чувствительность – порог  $10^{-7}$  Вт с уникальным быстрым действием –  $10^{-2}$  с.

A.G. Shlyakhova, A.T. Shlyakhov, L.A. Gainulova  
ANALYSIS OF THE PERFORMANCE SPEED AND  
SENSITIVITY OF THERMAL ELEMENTS FOR THERMAL  
ANALYSIS OF SUBSTANCES.

*Keywords:* differential-scanning calorimetry (DSC), anisotropic thermoelement (ATE), performance speed, sensitivity.

The ways of increasing the sensitivity of thermal analysis are considered. As a thermal sensor, a battery of anisotropic thermo elements (ATE) from bismuth; combining sensitivity with a threshold of  $10^{-7}$  W with a performance speed of  $10^{-2}$  s is used.

А.И. Акимов, И.А. Акимов, Д.И. Сиделов  
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И  
ДЕФОРМАЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С ОСЕВОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ  
СИММЕТРИЕЙ МЕТОДОМ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

*Ключевые слова:* полимеризация, композиты, многослойные конструкции, напряжения, деформации, перемещения.

В работе представлены результаты изучения термоупругих напряжений и деформаций в производстве многослойных композитов методом полимеризации с осевой и центральной симметрией в установках автоматического ведения технологического процесса (АВТП).

A.I. Akimov, I.A. Akimov, D.I. Sidelov  
INVESTIGATION OF TEMPERATURE STRESS AND  
STRAIN IN THE PRODUCTION OF MULTILAYER  
STRUCTURES WITH AXIAL AND CENTRAL  
SYMMETRY POLYMERIZATION

*Keywords:* polymerization, composites, stresses, deformation, multilayer structure, movement.

The paper presents the results of the study of thermoelastic stresses and strains in the production of multilayer composites by polymerization with axial and central symmetry in automatic maintenance of the technological process (AMTP).

В.В. Андреев, Н.Г. Андреев, К.Г. Галстян, С.Л. Леванов  
ОБОСНОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ  
НЕЙТРОННОГО КОНВЕРТЕРА НА ВСЕХ ЭТАПАХ  
ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА В РАМКАХ ПРОЕКТНО  
ОРИЕНТИРОВАННОГО ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ НГТУ ИМ.  
Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

*Ключевые слова:* нейтронный конвертер, биологическая защита, нейтронная физика, DOT-III, DOT-Activ, жизненный цикл установки, радиационная безопасность.

В данной статье обосновывается безопасность лабораторной установки «Нейтронный конвертер». Описана методика расчета программ DOT-III и DOT-Activ. На основании нормативной документации и результатов расчетов по программам DOT-III и DOT-Activ делается вывод о безопасности работы с установкой и ее утилизации по окончании срока эксплуатации.

В.Ю. Артамонов, Н.В. Дубов, М.А. Бобров  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОРРЕКТОРА  
КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ ВХОДНЫХ ДРОССЕЛЕЙ И ФИЛЬТРУЮЩИХ  
КОНДЕНСАТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОТРЕБЛЯЕМОЙ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ

*Ключевые слова:* коэффициент мощности, Виенна-выпрямитель, корректор коэффициента мощности, входная сеть, PSIM.

Приведены результаты моделирования режимов работы корректора коэффициента мощности. Выполнен расчет параметров схемы. Построены графики зависимостей коэффициента мощности от входных индуктивностей и фильтрующих емкостей.

Л.З. Гумерова  
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ СЕРВИСОВ  
В ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИНЫ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ»  
ДЛЯ ПЕДАГОГИЧЕСКИХ НАПРАВЛЕНИЙ ПОДГОТОВКИ  
*Ключевые слова:* Google Apps for Education, Google Classroom, Google Диск, Google форма.

В работе проанализированы основные сервисы Google Apps for Education и возможности их применения в процессе обучения студентов по дисциплине «Информационные технологии в профессиональной деятельности» педагогических направлений подготовки, предложен современный подход к организации лабораторных занятий.

В.Н. Дюпин  
МОДЕЛЬ ВИРТУАЛЬНОГО АДАПТАЦИОННОГО  
ПРОСТРАНСТВА

*Ключевые слова:* виртуальная реальность, дополненная реальность, виртуальное адаптационное пространство.

В работе содержится обзор систем виртуальной реальности. Представлена модель виртуального адаптационного пространства. Содержится описание коммуникатора виртуального пространства. Приведен пример погружения объектов в виртуальное пространство.

Т.И. Епанчинцев  
ОТКРЕПЛЕНИЕ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ОТ  
НЕВОЗБУДИМОГО ПРЕПЯТСТВИЯ В ДВУМЕРНОЙ  
МОДЕЛИ МИОКАРДА С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ  
СТИМУЛЯЦИИ

*Ключевые слова:* моделирование сердца, невозбудимые препятствия, спиральная волна, высокочастотная стимуляция. В работе представлено исследование открепления и вытеснения спиральной волны от невозбудимого препятствия в двумерной модели Алиева-Панфилова с помощью метода низковольтной высокочастотной стимуляции. Были использованы точечный и линейный электроды. Форма невозбудимого препятствия варьировалась.

V.V. Andreev, N.G. Andreev, K.G. Galstian, S.L. Levanov  
JUSTIFICATION OF RADIATION SAFETY OF A NUTRON  
CONVERTER FOR ALL STAGES OF THE LIFE CYCLE IN  
THE PROJECT-ORIENTED EDUCATION OF NNSTU N.A.  
R.E. ALEKSEEV STUDENTS

*Keywords:* neutron converter, biological protection, neutron physics, DOT-III, DOT-Activ, installation life cycle, radiation safety.

This article justifies the safety of the laboratory facility "Neutron Converter". The method of program calculation of DOT-III and DOT-Activ is described. Based on the regulatory documentation and the results of the DOT-III and DOT-Activ calculation programs, it concludes that the work with facility is safe and it can be disposed at the end of the life cycle.

V.Y. Artamonov, N.V. Dubov, M.A. Bobrov  
SIMULATION OF POWER FACTOR CORRECTOR  
OPERATION MODES AND ESTIMATION OF THE  
INFLUENCE OF INPUT INDUCTANCES AND FILTER  
CAPACITORS PARAMETERS ON THE QUALITY OF  
CONSUMED POWER ENERGY IN 3-PHASE GRIDS.

*Keywords:* power factor, Vienna-rectifier, power factor corrector, input network, PSIM.

The results of simulation of the power factor corrector operation modes are given in the paper. The parameters of the scheme are calculated. The graphs of dependences of the power factor on the input inductances and filter capacitances are constructed.

L.Z. Gumerova  
EXPERIENCE OF USING CLOUD SERVICES IN  
TEACHING THE SUBJECT "INFORMATION  
TECHNOLOGIES IN PROFESSIONAL ACTIVITIES» FOR  
PEDAGOGICAL TRAINING AREAS

*Keywords:* Google Apps for Education, Google Classroom, Google Disk, Google form.

The paper analyzes the main services of Google Apps for Education and the possibility of their application in the process of teaching students the discipline "Information technology in professional activity" for pedagogical areas of training. The modern approach to the organization of laboratory classes is offered.

V.N. Dyupin  
MODEL OF VIRTUAL ADAPTATION SPACE  
*Keywords:* virtual reality, augmented reality, virtual adaptation space.

The paper provides an overview of virtual reality systems. A model of virtual adaptation space is presented. Contains a description of the virtual space communicator. An example of immersing objects in virtual space is given.

T.I. Epanchintsev  
SPIRAL WAVE UNPINNING FROM UNEXCITABLE  
OBSTACLE IN 2D CARDIAC MODEL USING HIGH-  
FREQUENCY STIMULATION

*Keywords:* heart simulation, unexcitable obstacles, spiral wave, high-frequency stimulation

The paper presents a study of spiral wave unpinning and superseding from an unexcitable obstacle in the two-dimensional Aliev-Panfilov cardiac tissue model using the low-voltage high-frequency stimulation. Point and line electrodes were used. The form of an excitable obstacle was varied.

Н.А. Мунасыпов  
ОБ ОДНОМ ПОДХОДЕ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕСУРСОВ В СИСТЕМЕ  
РАСПОЗНАВАНИЯ С АДДИТИВНЫМ КРИТЕРИЕМ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ

*Ключевые слова: система распознавания, распределение ресурсов, метод динамического программирования, оптимальное управление.*

*В работе рассмотрена задача распределения ограниченных ресурсов в системе распознавания и идентификации объектов, причём эффективность функционирования системы описывается аддитивным критерием. Сформулированная постановка задачи представляет собой задачу математического программирования, и в качестве метода решения предложен метод динамического программирования.*

В.В. Олоничев, Б.А. Староверов, М.А. Смирнов  
ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОГРАММНОЙ  
РЕАЛИЗАЦИИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА  
МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

*Ключевые слова: регулятор состояния, контур адаптации, параметрическая идентификация, одноплатные компьютеры, язык С.*

*Для практической реализации динамических регуляторов состояния необходим контур адаптации, для чего, в свою очередь, требуется параметрическая идентификация объектов управления в темпе с процессом. В статье представлены способы повышения производительности в несколько раз программной реализации вычислительных операций идентификации для процессоров ARM-CORTEX-A. Данные решения предназначены для систем с быстроизменяющимися параметрами объектов управления.*

Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова  
СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ  
ПОТОКАМИ В АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
МАРШРУТАХ НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

*Ключевые слова: технологическая подготовка производства, интеллектуальная система, многоагентная система, структурная модель.*

*В работе представлена многоуровневая структурная модель интеллектуальной системы управления информационными потоками в альтернативных технологических маршрутах на этапе технологической подготовки производства (ТПП) с применением многоагентной системы.*

Л.А. Симонова, В.В. Абрамова, Г.М. Капитонова  
АЛГОРИТМ РАБОТЫ МНОГОАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ В  
АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАРШРУТАХ  
НА ЭТАПЕ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

*Ключевые слова: агент, интеллектуальная система, многоагентная система, алгоритм работы многоагентной системы, управление подготовкой производства.*

*В работе представлен алгоритм работы многоагентной системы управления информационными потоками в альтернативных технологических маршрутах на примере решения задачи подтверждения обеспеченности комплектующими изделиями для конкретного производственного заказа.*

А.Б. Сорокин, Е.В. Бражникова, В.И. Тихвинский  
СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ  
РЕШЕНИЙ

*Ключевые слова: большая система, сложная система, полиструктурность, полифункциональность, деятельность. Рассматриваются вопросы проектирования ситуационных*

N.A. Munasyrov  
ON ONE APPROACH TO SOLVING THE PROBLEM OF  
RESOURCE DISTRIBUTION IN THE RECOGNITION  
SYSTEM WITH ADDITIVE CRITERION OF EFFICIENCY  
*Keywords: recognition system, resource allocation, dynamic programming method, optimal control.*

*The paper considers the problem of the allocation of limited resources in the system of recognition and identification of objects, and the efficiency of the functioning of the system is described by an additive criterion. The formulated problem statement is a mathematical programming problem, and a dynamic programming method is proposed as a solution method.*

V.V. Olonichev, B.A. Staroverov, M.A. Smirnov  
SOFTWARE PRODUCTIVITY INCREASING FOR  
MICROCONTROLLER BASED ADAPTIVE CONTROL  
SYSTEM

*Keywords: state variables control, adaptive control, parametrical identification, single board computers, programming language C.*

*For the practical implementation of dynamic state variables controllers, an adaptation unit is needed, which, in turn, requires parametrical identification of control objects with the pace of the process. The article presents the ways of increasing of its productivity by several times by the software implementation of the computational operations of identification for ARM processors CORTEX-A. These solutions are designed for systems with rapidly changing parameters of control objects.*

L.A. Simonova, V.V. Abramova, G.M. Kapitonova  
STRUCTURAL MODEL OF INFORMATION FLOWS  
MANAGEMENT SYSTEM IN ALTERNATIVE  
TECHNOLOGICAL ROUTES AT THE STAGE OF  
PRODUCTION PREPARATION USING MULTI-AGENT  
SYSTEM

*Keywords: technological preparation of production, intellectual system, multi-agent system, structural model.*

*The paper presents a multi-level structural model intelligent information management system of flow in alternative technological routes at the stage of technological preparation of production (TPP) using a multi-agent system.*

L.A. Simonova, V.V. Abramova, G.M. Kapitonova  
ALGORITHM OF WORK OF MULTI-AGENT  
INFORMATION FLOWS MANAGEMENT SYSTEM IN  
ALTERNATIVE TECHNOLOGICAL ROUTES AT THE  
STAGE OF PRODUCTION PREPARATION

*Keywords: agent, intelligent system, multi-agent system, multi-agent system operation algorithm, production preparation management.*

*The paper presents an algorithm for the operation of a multi-agent information management system in alternative technological routes by the example of solving the problem of confirming the availability of components for a specific production order. A multi-agent system is built on intelligent agents interacting with each other: agents with a knowledge-based behavior type and based on a quick reaction to events.*

A.B. Sorokin, E.V. Brazhnikova, V.I. Tihvinskij  
SYSTEM STUDIES FOR THE DESIGN OF THE  
SITUATIONAL CENTERS, DECISION SUPPORT

*Keywords: great system, complex system, polystructural character, multi-functionality, activity.*

*Discusses the design situation centers of decision support in terms of systemic research. The analysis of the definitions of*

центров поддержки принятия решений с позиции системного исследования. Анализ дефиниций понятия «система» помогает определить не только конструктивные особенности ситуационных комплексов – полиструктурность и полифункциональность, но также системообразующий фактор – деятельность.

Л.А. Феоктистова, Т.В. Рзаева

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОФОРМЛЕНИЯ  
КОНСТРУКТОРСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ В СИСТЕМЕ ANSI

*Ключевые слова: Международная система мер (СИ), конструкторская документация, простановка размеров на чертежах, размерные числа, виды штриховки.*

*Авторами в статье рассматривается специфика в оформлении конструкторской документации, принятой в США. Показаны некоторые значительные, по мнению авторов, отличия в оформлении конструкторской документации принятых в США и России.*

Д.Ю. Чернышов, В.И. Марчук, С.В. Маков, А.Ю. Минаев  
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАНАЛА СВЯЗИ В  
УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ

*Ключевые слова: система связи, модель канала, MIMO, многопутевое распространения сигнала.*

*В работе рассматривается механизм распространения сигнала в условиях городской местности, который характеризуются многопутным распространением радиоволн и явлением многократного переотражения волны. Представлена разработанная модель многопутного MIMO (Multiple Input Multiple Output) канала.*

*the concept "system" helps to determine not only the design features of situational complexes – polystructure and polyfunctionality, but also the system – forming factor-activity.*

L.A. Feoktistova, T.V. Rzaeva

SOME PECULIARITIES OF DRAWING DESIGN  
DOCUMENTATION IN ANSI SYSTEM

*Keywords and phrases: International system of measures (SI), design documentation, dimensioning on drawings, dimensional numbers, types of hatching.*

*The authors of the article consider the specifics in the design of design documentation adopted in the United States. Showing some significant, according to the authors, differences in the design of design documentation adopted in the United States and Russia.*

D.Y. Chernyshov, V.I. Marchuk, S.V. Makov, A.Y. Minaev  
RESEARCH SOLUTIONS SELF-DIFFUSION OF  
ELECTROLYTES IN NONAQUEOUS NANOCARBON  
DISPERSION MATRICES

*Keywords: communication system, channel model, MIMO, multipath propagation.*

*The paper discusses the mechanism of signal propagation in urban areas, which are characterized by multipath propagation of radio waves and the phenomenon of multiple wave reflections. A developed model of multi-channel MIMO (Multiple Input Multiple Output) channel is presented.*

## **Публичный лицензионный договор-оферта о правах на статью**

Редакция журнала «Научно-технический вестник Поволжья» предлагает Вам присылать свои статьи для публикации на страницах журнала, а также на сайте Научной электронной библиотеки (НЭБ). Предоставление Автором своего произведения является полным и безоговорочным акцептом, т.е. данный договор считается заключенным с соблюдением письменной формы. Присылая для публикации произведение, Автор также предоставляет Редакции журнала права на использование произведения и гарантирует, что он обладает достаточным объемом прав на передаваемое произведение. Также Автор предоставляет редакции журнала право переуступить на договорных условиях частично или полностью полученные по настоящему Договору права третьим лицам без выплаты Автору вознаграждения. Все авторские права регулируются в соответствии с действующим законодательством России.

## **Договор публичной оферты по обработке персональных данных**

В процессе осуществления выпуска журнала "Научно-технический вестник Поволжья", ООО "Научно-технический вестник Поволжья" и ООО "Рашин Сайнс" осуществляется обработка персональных данных, предоставленных авторами статей в рамках сообщения своих регистрационных данных для осуществления публикации в журнале (имя, фамилия, отчество, адрес автора, контактный телефон и e-mail приводятся в регистрационной форме, заполняемой авторами при отправке статьи в журнал). Обработка осуществляется редакцией журнала для целей надлежащей отправки журнала автору и возможности связи с автором лиц, заинтересованных в результатах труда автора статьи. Под обработкой персональных данных в контексте настоящего согласия понимаются действия редакции по сбору, систематизации, накоплению, хранению, использованию, распространению, уничтожению персональных данных, а также действия по их дальнейшей обработке с помощью автоматизированных систем управления базами данных, и иных программных средств, используемых редакцией журнала. Настоящее согласие автора на обработку персональных данных является бессрочным и может быть отозвано в любой момент путем отказа автора от получения журнала и дальнейшей обработки его персональных данных.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК  
ПОВОЛЖЬЯ

№3 2019

**Направления:**

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

**02.00.00 — ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ**

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

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

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

**[www.ntvp.ru](http://www.ntvp.ru)**

Свидетельство № ПИ № ФС77-41672 от 13 августа 2010г.

Подписано в печать 22.03.2019    Формат 60 x 84 1/8. Печать цифровая.

9,2 усл.печ.л. 10,7 уч.изд.л. Тираж 900 экз. Заказ 1870.

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»