



# ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ

сборник научных трудов  
Международной научно-практической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых

30 сентября-04 октября  
2019

ТОМСК, РОССИЯ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

---

# **ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ**

## **ФТПНПМ-2019**

Сборник научных трудов  
Международной научно-практической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых

**30 сентября – 04 октября 2019 г.**

Томск 2019

УДК 53.05+62.001.5(063)  
ББК 22.3+30л0  
Ф50

**Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине**  
Ф50 (ФТПНПМ-2019) : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – 250 с.

ISBN 978-5-4387-0900-8

В сборнике представлены материалы по следующим направлениям исследований: физико-энергетические и электрофизические установки; инновационные материалы и технологии современной энергетики; математическое моделирование в фундаментальных и прикладных исследованиях, физико-химические и изотопные технологии в науке, промышленности и медицине; радиационные и пучково-плазменные технологии в науке, технике и медицине; актуальные вопросы ядерного нераспространения, безопасность и экология ядерной отрасли; информационные технологии, автоматизация и системы управления. Целью конференции ФТПНПМ-2019 является развитие кооперации российских и зарубежных молодых ученых и студентов в проведении научных исследований в области современной физики.

**УДК 53.05+62.001.5(063)**  
**ББК 22.3+30л0**

***Редакционная коллегия***

А. Г. Горюнов, доктор технических наук;  
А. С. Кантаев, кандидат технических наук;  
О. Л. Крицкий, кандидат физико-математических наук;  
А. Г. Наймушин, кандидат физико-математических наук;  
А. А. Орлов, доктор технических наук;  
Б. П. Степанов, кандидат технических наук;  
Ю. Н. Юрьев, кандидат технических наук.

*Редакционная коллегия предупреждает, что за содержание  
представленной информации  
ответственность несут авторы докладов*

***Мероприятие проведено при поддержке Российского фонда  
фундаментальных исследований, грант РФФИ № 19-48-701001 р\_г***

ISBN 978-5-4387-0900-8

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ 1. ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ</b> .....	14
<b>СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИРТ-Т</b>	
Е.А. Бондаренко, В.А. Варлачев, Е.Г. Емец .....	15
<b>РАСЧЁТ СПЕКТРОВ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ БН–1200</b>	
А.С. Киркало, В.Н. Нестеров .....	16
<b>НАКОПЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И СОЕДИНЕНИЙ В МИКРОКАПСУЛИРОВАННОМ ТОПЛИВЕ В СВЕРХДЛИННЫХ КАМПАНИЯХ</b>	
В.В. Кнышев, И.В. Шаманин, Д.В. Пасько, А.И. Зорькин .....	17
<b>РАСЧЁТ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1200</b> К.С. Костюченко .....	18
<b>ИЗМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНОВ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА ИРТ-Т ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ</b> А.С. Нурғалиев, М.Н. Аникин, А.Г. Наймушин	19
<b>ПОЛУЧЕНИЕ БОРИДА ВОЛЬФРМА В РЕЖИМЕ СВ-СИНТЕЗА</b>	
А.А. Пермикин, М.М. Балачков, М.С. Кузнецов .....	20
<b>АНАЛИЗ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОТ LOCKHEED MARTIN</b>	
С.С. Правосуд, К. А. Иванов .....	21
<b>ОПТИМИЗАЦИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАНАЛА РЕАКТОРА ИРТ-Т ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ</b>	
Н.В. Смольников, М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин .....	22
<b>РАСЧЕТ СПЕКТРА ПОТОКА НЕЙТРОНОВ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРАХ НА ПРИМЕРЕ ГТ-МГР</b> А.А. Соломатин .....	23
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА</b> К.С. Харитонкин .....	25
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ</b>	
А.А. Храпов .....	27
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ ПОЛИМЕРОВ</b> Цуй Цзян, Р.С. Лаптев, К.П. Арефьев .....	29
<b>CALCULATION COMPLETENCES OF COMBUSTION OF FUEL USING DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FLAME</b> I.R. Galiev, V.E. Epishkin .....	31
<b>THE STUDY OF THE PROBABILITY OF INCREASING THE OPERATING TIME OF THE NUCLEAR REACTOR KLT-40 S THROUGH THE USE OF PERSPECTIVE NUCLEAR FUEL CYCLES</b> V.S. Gontov, N.A. Anikin, L.V. Chernov .....	33
<b>NUMERICAL SIMULATION OF COOLANT FLOW IN THE IBR-2M PULSED REACTOR FUEL ASSEMBLY</b> D.B. Mukhambetalin, I.V. Burkov, Y.Y. Weber .....	35

<b>СЕКЦИЯ 2. ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b> .....	36
<b>ФТОРАММОНИЙНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА ИЗ ИЛЬМЕНИТА</b> Г.С. Багдасарян.....	37
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАТИНИРОВАННЫХ ТИТАНОВЫХ АНОДОВ В АЗОТНОКИСЛОМ РАСТВОРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЕМЫЕ ИОНЫ СЕРЕБРА (II) И ТВЕРДУЮ ДИСПЕРСНУЮ ФАЗУ</b> Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, А.В. Сиротина .....	38
<b>ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ И РЕЦИРКУЛЯЦИЯ СЕРЕБРА В АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРАХ</b> Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, В.А. Кравченко, А.В. Обедин .....	39
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ДИОКСИДА ПЛУТОНИЯ ОТ АМЕРИЦИЯ</b> Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, В.А. Кравченко, А.В. Обедин.....	40
<b>ЭКСТРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ УРАНА И ПЛУТОНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОЯТ</b> Н.А. Журавлев, И.В. Распутин, В.А. Карелин.....	41
<b>РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ ХАЛЬКОГЕНОВ ИЗ ИХ ИЗОТОПНО-ОБОГАЩЕННЫХ ГЕКСАФТОРИДОВ</b> А.С. Зайцева, Е.А. Исаева, Д.Р. Итыгина, Н.В. Гусев .....	42
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ЖИДКОФАЗНОГО СЫРЬЯ</b> В.А.Казанцова, Ю.В. Передерин, И.О.Усольцева .....	43
<b>ВЫДЕЛЕНИЕ ТИТАНОВОГО ПОРОШКА ИЗ КАТОДНОГО ОСАДКА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНА</b> Н.В. Карелина, А.В. Сазонов, В.А. Карелин .....	44
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ШВА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ АРГОНОДУГОВОЙ СВАРКЕ НА ВЕСУ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ</b> П.П. Красиков, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин .....	45
<b>ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ КОРНЕВОГО СЛОЯ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> П.П. Красиков, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин .....	47
<b>ПЕРЕРАБОТКА СЕРПЕНТИНИТСОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ</b> Д.В. Краснощекова, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева .....	49
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ АГО 2С ДЛЯ СИНТЕЗА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИИ НА ОСНОВЕ ТИТАНА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ - НАКОПИТЕЛЕЙ ВОДОРОДА</b> Н.Е. Курдюмов, В.Н. Кудияров .....	50
<b>ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ</b> Д.И. Леонов, С.П. Журавков.....	52
<b>ГИДРОФТОРИРОВАНИЕ ФОСФАТОВ РЕДОКЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> В.А. Лисица, А.С. Буйновский, А.В. Муслимова, Т.В. Смолкина .....	53
<b>ПОДБОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАДИОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА ОПТИЧЕСКИ-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА GD-PROFILER 2 ДЛЯ АНАЛИЗА ТОНКИХ ПЛЕНОК</b> А.Д. Ломыгин, Р.С. Лаптев .....	55

<b>ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ KBRF<sub>4</sub> С МЕТАЛЛАМИ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ</b> А.В. Малин, Р.В. Оствальд.....	56
<b>ПЕРЕРАБОТКА БЕРИЛЛОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОФТОРИДА АММОНИЯ</b> Л.Н. Малютин, А.Н. Дьяченко, А.Д. Киселев, Р.И. Крайденко .....	57
<b>СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ</b> Ю.Р. Мингазова, Е.П. Седанова .....	59
<b>ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ</b> Ю.А. Новиченко, Л.А. Леонова.....	60
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА МАГНИЯ ИЗ ХРОМСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ</b> Ю.Л. Орешкина, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева .....	61
<b>НАНОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ ЖЕЛЕЗА В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРОВ СИНТЕЗА УГЛЕВОДОРОДОВ</b> В.А. Пивовар, Е.В. Попок, С.П. Журавков .....	62
<b>ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ ФТОРИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ</b> И.И. Рудых, Ф.А. Ворошилов.....	63
<b>ОЧИСТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ ФТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНЕРАЛОВ</b> А.Ю. Рыбаченко, Ю.Р. Мухортова, Д.В. Мартемьянов, С. П. Журавков .	64
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СКЭФФОЛДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ</b> А. С. Сапожникова.....	65
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ</b> Н.С. Синько, Д.В. Мартемьянов, Ю.Р. Мухортова, С. П. Журавков.....	67
<b>ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТИТАНА ИЗ ЛЕЙКОКСЕНОVOГО КОНЦЕНТРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФТОРИДОА АММОНИЯ</b> А.А. Смороков, А.С. Кантаев .....	68
<b>РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЭС</b> И.Н. Топоев, В.В. Луфференко .....	69
<b>ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАНОПОРОШКОВЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> Т.В. Чайка, В.М. Гавриш, Г.А. Баранов .....	71
<b>СИНТЕЗ ПОКРЫТИЙ Si-Y НА nb ВО ФТОРИДНО-ХЛОРИДНЫХ РАСПЛАВАХ</b> А.А. Чернышев, А.В. Исаков, А.С. Шмыгалев, Ю.П. Зайков .....	72
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВ-СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЦ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ NI-AL И ZR-AL ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> М.Д. Юрченко, Е.А. Маренкова, А.А. Пермикин .....	73
<b>HIGH-ENTROPY FUNCTIONAL MATERIALS BASED ON OXIDES AND FLUORIDES OF RARE-EARTH ELEMENTS</b> V.O. Marchenko, I.V. Amelichkin.....	74
<b>СЕКЦИЯ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ</b> .....	75
<b>ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДЬБЫ ЧЕЛОВЕКА</b> А.В. Авилов, Н.В. Авилова, И.А. Кривцов .....	76

<b>ПОСТРОЕНИЕ БАЙЕСОВСКОЙ ГАММА-РЕГРЕССИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РИСК-ФАКТОРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДИАБЕТА</b> В.О. Алексеев .....	78
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ</b> Н.А. Аманжолова, С.В. Шидловский .....	79
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ В РЕЖИМЕ СВС</b> М.М. Балачков 80	
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ</b> О. Э. Безрукова, А. С. Мищенко, К. А. Мороз, М. М. Ханукаев .....	82
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ, ОСНОВАННОЙ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ПРОЦЕССА</b> В.В. Быкова, Н.С. Белинская.....	84
<b>ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ХАЛЛА-УАЙТА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКИ</b> Е.П. Егоров .....	86
<b>ОЦЕНКА ФИНАНСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА</b> В.А. Запригалова .....	87
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РЫНКА ЦЕННЫХ БУМАГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MARKOV CHAIN MONTE CARLO</b> В.К. Захаров.....	88
<b>ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФАРМАКОКИНЕТИКИ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ</b> В.В. Касьянова, И.Н. Бажукова.....	89
<b>ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗООБРАЗНОГО UF6 В КОЛЛЕКТОРЕ НА ДИНАМИКУ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКостей С ГЛАДКИМИ ВНУТРЕННИМИ СТЕНКАМИ ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF6</b> А.А. Котельникова, А.А Орлов .....	90
<b>ФАКТОРНЫЙ И РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ОЖИДАЕМУЮ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ</b> А.О. Курникова, М.Л. Шинкеев .....	91
<b>ПОСТРОЕНИЕ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОХОДНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПУЛА-ФУНКЦИЙ</b> М.В. Мытницкая .....	92
<b>ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДОРОЖНОГО ГРАФА</b> М.А. Степанов, М.Е. Семёнов 93	
<b>ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СООТНОШЕНИЯ CALL-PUT ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКИ И ПОСТРОЕНИЯ УЛЫБКИ ВОЛАТИЛЬНОСТИ</b> Д.В. Степанян .....	94
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ ЦЕНТРОВ ПОВЕРХНОСТИ АЛЮМОСИЛИКАТОВ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ТИТРОВАНИЯ</b> Е.А. Сютова, Л.А. Джигола, О.С. Садомцева, В.В. Шакирова .....	95
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА ЛОКАЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ</b> Р.Ф. Тазиева, С.С. Виноградова .....	96
<b>ФОРМИРОВАНИЕ ПОРТФЕЛЯ КРИПТОВАЛЮТ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ РИСКА</b> Е.К. Фокина, О.Л. Крицкий.....	97
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SOLIDWORKS</b> Р. С. Шурьгин .....	98

<b>A THREE-STEP NUMERICAL APPROXIMANT BASED ON BLOCK HYBRID BACKWARD DIFFERENTIATION FORMULA FOR STIFF SYSTEM OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS</b> U. Mohammed, B.G. Akintububo, M.E. Semenov .....	99
<b>A THREE-STEP EXTENDED BLOCK HYBRID BACKWARD DIFFERENTIATION FORMULA FOR STIFF SYSTEM OF SECOND ORDER ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS</b> K. T. Shiawoya, U. Mohammed and M.E. Semenov.....	100
<b>ABOUT CREATION OF ELECTRICALLY CONTROLLED FILTERS OF MICROWAVE, SUBTHZ AND THZ-BANDS ON THE BASE OF GRAPHENE-AND-DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE</b> I.A. Smirnov, E.A. Zhebrun, L.V. Cherckesova.....	101
<b>MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTRICALLY CONTROLLED FILTERS OF MICROWAVE, SUBTHZ AND THZ-BANDS ON THE BASE OF GRAPHENE AND DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE</b> I.A. Smirnov, E.A. Zhebrun, L.V. Cherckesova, D.V. Kleimenkin .....	103
<b>DERIVATION OF BLOCK NYSTRÖM TYPE METHOD WITH ONE-OFF-STEP POINT FOR THE SOLUTION OF TWO POINT BOUNDARY VALUE PROBLEMS WITH ROBIN BOUNDARY CONDITION</b> E.A. Unoko, U. Mohammed and M.E. Semenov .....	105
<b>СЕКЦИЯ 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ</b> .....	106
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАБЛЕТОК НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ДЛЯ СОРБЦИИ ВОДОРОДА</b> Д.Е. Адильханов, Р.Г. Бабаев, Е.А. Борецкий, Д.Г. Видяев.....	107
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Nd-Sm-Mg-O»</b> Д.В. Андреев, А.С. Пшеничников, Р.Г. Бабаев .....	108
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ИЗОТОПОВ С ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ</b> И.В. Банников, Д.М. Хорохорин.....	109
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Sm-Ce-Mg-O»</b> В.И. Басс, И.Ю. Загузин, И.Ю. Новоселов .....	111
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО ЭФФЕКТА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА</b> А.Р. Бережная, А.В. Прощенко.....	112
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Nd-Ce-Be-O»</b> К.И. Берестов, А.Е. Тихонов, А.А. Каренгин .....	114
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОБЛУЧЕННЫЙ ГРАФИТ</b> Е.В. Беспала, Д.О. Чубреев, Ю.Р. Беспала.....	115
<b>ДЕСУБЛИМАЦИЯ UF6 В ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОГРУЖНЫЕ ЕМКОСТИ С ГЛАДКИМИ ВНУТРЕННИМИ СТЕНКАМИ, ВЕРТИКАЛЬНЫМ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ</b> М.В. Верлинский, Р.В. Малюгин, А.А. Орлов.....	117
<b>ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНОГО Y2O3 В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕ ИЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> Н.И. Головков, И.Ю. Новоселов.....	118
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Nd-Sm-Be-O»</b> А.Ю. Дербин, В.И. Расторгуев, С.В. Беденко .....	119



<b>МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ АЛЬФА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ</b> М.А. Дзик, С.П. Журавков .....	120
<b>ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАБОТЫ КОЛОННЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ В ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ</b> В.В. Дмитриев, Д.Г. Видяев .....	122
<b>ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ В ТЕХНОЛОГИЮ ФОРМИРОВАНИЯ МОКС-ТОПЛИВА</b> Р.С. Еремеев, Д.М. Хорохорин, И.В. Банников.....	123
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ЦЕРИЯ И ИТТРИЯ</b> И.Ю. Загузин, А.С. Пшеничников, В.В. Сопыряев .....	125
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ из водно-органических нитратных растворов НЕОДИМА И МАГНИЯ</b> И.Ю. Загузин, А.С. Пшеничников, А.А. Котельникова .....	127
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Nd–Ce–Mg–O»</b> Е.Э. Зотов, В.В. Сопыряев, В.И. Шаманин .....	129
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ</b> В.В. Зубов, А.Г. Каренгин.....	130
<b>ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ «Sm–Ce–Be–O»</b> К.С. Иванов, Н.С. Хоцеловский, А.Д. Побережников.....	131
<b>МОДЕЛЬ РЕАКТОРА ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ</b> А.А. Каренгин, А.Г. Каренгин.....	132
<b>СИСТЕМА ДОСТАВКИ <math>iq-1</math> НА ОСНОВЕ <math>plga</math> МИКРОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ</b> И.М. Колесник, Э.В. Киблер, К.С. Станкевич, Е.Н. Больбасов.....	133
<b>ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ГАЗООБРАЗНОГО <math>UF_6</math> В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ</b> Котельникова А.А., Орлов А.А., Малюгин Р.В. ....	134
<b>ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПОВ МАГНИЯ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БАКТЕРИЙ <i>E. COLI</i></b> У.Г. Летута, Т.А. Тихонова .....	135
<b>ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ИЗОТОПОВ МАГНИЯ И ЦИНКА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ АТФ <i>IN VIVO</i></b> У.Г. Летута.....	136
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РЕЭКСТРАКТОВ ПЛАТИНОИДОВ ИЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> В.И. Ли.....	137
<b>МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ КОМПЛЕКС МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ НОВООБРАЗОВАНИЙ</b> Е.В. Обходская, А.В. Обходский, В.И. Сачков .....	138
<b>ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ</b> Ш.С. Оспанова, Л.А. Рахимжанова .....	139
<b>ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА</b> А.П. Павленко, Д.О. Чубреев, Е.В. Беспала .....	141
<b>ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ <math>CS137</math> ФЕРРОЦИАНИДНЫМИ СОРБЕНТАМИ ИЗ РАДИОАКТИВНЫХ РАСТВОРОВ</b> И.А. Пивоваров, И.И. Жерин .....	143

<b>ИОНООБМЕННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛАНТАНА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ КАТАЛИЗАТОРА КРЕКИНГА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ</b> М.А. Погодаева, А.О. Богданова, Л.Н. Адеева .	145
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ФЛОКУЛЯНТОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА</b> И.В. Распутин, Н.А. Журавлев, В.А. Карелин.....	146
<b>ПЕРЕСТРОЙКА ОДНОМОДОВОГО ЛАЗЕРА В ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СЕЛЕКЦИИ ИЗОТОПОВ</b> Л.А. Рахимжанова, Ш.С. Оспанова .....	148
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДИФфуЗИИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ КАК КРИТЕРИЯ РАЗВИТИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ В ТРУБОПРОВОДНОЙ СТАЛИ</b> И. Саквин, В.Н. Кудияров.....	150
<b>ПРОБЛЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ПРИ НАРАБОТКЕ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ</b> С.С. Салодкин, В.М. Головков.....	152
<b>ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ПРЯМОТОЧНОЙ УСТАНОВКИ ХЛОРИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ</b> Сулейменов Н.А., Котов В.М., Вурим А.Д., Бакланова Ю.Ю. ....	153
<b>БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ ПРИ ОЧИСТКЕ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ ХЛОРИРОВАНИЕМ</b> А.С. Сураев, Ю.Ю. Бакланова, А.Д. Вурим, В.М. Котов.....	154
<b>СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ПЛАЗМЕ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА</b> А.Е. Тихонов.....	155
<b>РЕКОНВЕРСИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В ВОЗДУШНО-ВОДОРОДНОЙ СРЕДЕ</b> Н.В. Тундешев, Каренгин А.Г. ....	157
<b>РАЗДЕЛЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ИЗОТОПНОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ КАСКАДА ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ</b> Ушаков А.А., Совач В.П., Орлов А.А.....	158
<b>ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ОТ РАДИОНУКЛИДОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЭЛОВ</b> Д.М. Хорохорин, М.С. Кузнецов, Р.С. Еремеев.....	159
<b>МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ</b> Д. Чумаков, В. Кабак, Му Юйчэнь, Г.Н. Дудкин .....	160
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИММОБИЛИЗАЦИИ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАССЕЙНОВ-ХРАНИЛИЩ ЖРО В УСЛОВИЯХ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ ВЧФ-РАЗРЯДА</b> Л.А. Шестакова	161
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ИЗ ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ</b> К.Т. Шикерун, А.В. Сычев .....	162
<b>CHANGE OF EXTERNAL FLOWS OF THE SEPARATION CASCADE TO REDUCE THE TRANSITION PROCESS DURATION</b> Ushakov A.A., Orlov A.A., Sovah V.P.....	163
<b>MATHEMATICAL MODELING OF FILLING GAS CENTRIFUGE CASCADE FOR NICKEL ISOTOPE SEPARATION BY VARIOUS FEED FLOW RATE</b> Ushakov A.A., Orlov A.A., Sovah V.P. ....	164
<b>СЕКЦИЯ 5. РАДИАЦИОННЫЕ И ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ</b> .....	165
<b>ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА ТИТАНА МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ</b> М.А. Андреева, Ю.Н. Юрьев .....	166

<b>ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ МИШЕНЕЙ ДЛЯ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ</b>	
А.А. Болат-оол, К.А. Просолов, М.А. Химич, О.А. Белявская .....	168
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛИМЕРНОГО КОЛЛИМАТОРА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПОСРЕДСТВОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИХ, НА РАССЕЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ</b>	
Е.А. Бушмина, Ю.А. Зубкова, А.А. Булавская.....	169
<b>ДИНАМИКА РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КЕРАМИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКАМИ ГАММА-КВАНТОВ И ЭЛЕКТРОНОВ</b>	
А.М. Владимиров, Л.Ф. Смекалин, А.А. Лукашук, Т.В. Смекалина.....	170
<b>ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИКОВОГО КОЛЛИМАТОРА С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b>	
А.А. Григорьева, С.В. Мельченко, А.А. Булавская .....	172
<b>СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiAlN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ</b>	
Л.Е. Гусс, Ю.Н. Юрьев .....	173
<b>ШАБЛОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N-ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ</b>	
А.А. Жук, А.М. Пилипенко, В.Н. Бирюков, П.С. Будяков .....	174
<b>ТОПОЛОГИЯ И ПАРАМЕТРЫ ТЕСТОВОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N ПЕРЕХОДОМ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИИ</b>	
А.А. Жук, Д.Г. Дроздов, П.С. Будяков, А.Е. Титов .....	176
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ КЛИНИЧЕСКОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ НА ГРАНИЦЕ ПЛАСТИКОВОГО БОЛЮСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ</b>	
Ю.А. Зубкова, Е.А. Бушмина, А.А. Булавская.....	177
<b>ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДОЗ ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С РАЗНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ МАТЕРИАЛОМ</b>	
В.С. Кондратьева, А.А. Булавская, И.А. Милойчикова.....	178
<b>СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ PVD И CVD МЕТОДАМИ ОСАЖДЕНИЯ</b>	
Д.В. Корженко, Ю.Н. Юрьев, Емлин Д.Р., Плотников С.А.....	179
<b>СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ АНТРОПОМОРФНОГО ФАНТОМА ГОЛОВЫ</b>	
С.В. Мельченко, А.А. Григорьева, А.А. Булавская .....	181
<b>ХРОМОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СПЛАВА Zr-1%Nb К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ</b>	
М. Р. Ромбаева, Д. В. Сиделёв .....	182
<b>ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОДУГОВЫХ СИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ</b>	
А.В. Угодчикова .....	184
<b>ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ</b>	
А.М. Шихада, В.М. Головкин .....	186
<b>РАСЧЁТ И НАНЕСЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОПТИКИ</b>	
О. А. Ярославцева .....	187

<b>СЕКЦИЯ 6. АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ, БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ОТРАСЛИ</b> .....	189
<b>УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b> К.Р. Абдуллина, Е.П. Седанова .....	190
<b>ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННОГО ФОНА, ОБУСЛОВЛЕННОГО ИЗОТОПОМ ЙОДА 131 И ДОЛГОЖИВУЩИМИ РАДИОНУКЛИДАМИ</b> В.С. Бугрина, Н.Ю. Истомина, М.Д. Носков, А.Д. Истомин .....	191
<b>ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА КОРЕЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ</b> И.В. Воробьев .....	192
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-КВАНТОВ ГЕРМАНИЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ</b> Е.А. Маренкова .....	194
<b>АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АЭС</b> Е.А. Селихова ..	195
<b>РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ</b> Ю.В. Фатеева, Б.П. Степанов .....	196
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВНУТРЕННЕГО НАРУШИТЕЛЯ</b> К.А. Хужажинова .....	197
<b>NATIONAL NUCLEAR AND RADIOACTIVE MATERIAL SECURITY REGIME IN GHANA</b> Paul Amoah, Michael Ansah .....	198
<b>THE CALCULATION OF THE STATIC STRENGTH OF THE FRAME CONNECTION OF THE COOLING TUBING IN THE MAIN CIRCULATING PIPELINE OF REACTOR VVER-1000</b> A.E. Ovsenev, K.S. Kostyuchenko, A.E. Ovsenev .....	199
<b>СЕКЦИЯ 7. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ</b> .....	200
<b>РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КАМЕРЫ ВИХРЕВОГО РАЗМОЛА</b> К.Р. Абдуллин, Р.Г. Ахмедов, Е.В. Ефремов .....	201
<b>АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ БЛОКОМ ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ СПВ</b> Н.Р. Адонин, А.В. Юров .....	203
<b>ВЫБОР НОМИНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВЫДАЧИ СИЛОВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ</b> М.А. Архипов .....	205
<b>РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БЛОКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ</b> Р.Г. Ахмедов, К.Р. Абдуллин, Е.В. Ефремов .....	206
<b>НОВАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ РАЗБРОСА ПАРАМЕТРОВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПАРЫ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N ПЕРЕХОДОМ</b> А.В. Бугакова, Я.Д. Галкин, О.В. Дворников, В.Л. Дятлов .....	208
<b>ТОКОВЫЙ ПОРОГОВЫЙ ЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ОБРАТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО СДВИГА</b> Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, Н.И. Чернов, В.Я. Югай .....	210
<b>СОЗДАНИЕ СТЕНДА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПЛАТФОРМЕ ПЛК «ОВЕН»</b> Д.А. Вебер, К.А. Иванов .....	212
<b>ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛОКА ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ</b> А.И. Гожимов, С.Н. Ливенцов .....	213

<b>РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИНИИ СПЕКАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК В СРЕДЕ КОД ТП</b> Е.Л. Григорьева, К.А. Козин .....	214
<b>СРЕДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ</b> М.Е. Губарь, А.И. Гожимов, А.О. Плетнёв, С.Н. Ливенцов .....	215
<b>МОДУЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ КТ-NIMFA</b> В.А. Данилкина, А.О. Плетнёв, А.И. Гожимов, С.Н. Ливенцов .....	216
<b>ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ УСТАВОК В СИСТЕМУ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ</b> А.А. Дериглазов, С.В. Федин, Д.Б. Зарва, Ю.Н. Голобоков .....	217
<b>СИНТЕЗ САУ МОДЕЛЬЮ КАМЕРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ</b> Е.И. Деркач, А.А. Полосин .....	218
<b>ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КАСКАДНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ</b> М.С. Ефремов .....	219
<b>РУКОВОДЯЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО СОЗДАНИЮ В СРЕДЕ LTSPICE МАКРОМОДЕЛЕЙ С1FET ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ</b> А.А. Жук, А.А. Игнашин, М.В. Ляшов, А.Е. Титов .....	220
<b>СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ В СРЕДЕ LTSPICE РАДИОЧАСТОТНЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МИКРОСХЕМ ЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ</b> А.А. Жук, М.В. Ляшов, А.А. Игнашин .....	222
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ С1FET ТРАНЗИСТОРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И РАДИАЦИИ</b> А.А. Жук, Е.М. Савченко, Д.Г. Дроздов, П.С. Будяков .....	224
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И МАГНИТНОГО ПОТОКА В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА КТМ</b> Д.А. Зольнов, В.М. Павлов .....	225
<b>ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА установки очистки облученного бериллия</b> С.А. Ильиных .....	226
<b>СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА ктм</b> С.В. Котов, Д.Б. Зарва, В.М. Павлов .....	228
<b>СИСТЕМА ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЕТИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ</b> А.М. Ли, Д.Б. Зарва, С.В. Котов, В.М. Павлов ...	229
<b>АЛГОРИТМ КОНФИГУРИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ</b> А.А. Липатникова, А.В. Обходский, А.С. Попов, Е.С. Усков .....	230
<b>ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ РАСХОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ</b> И.П. Лысенко, Г.В. Сумин, А.А. Денисевич .....	232
<b>СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ 1-ОЙ СТУПЕНЬЮ УЗЛА ДЕСУБЛИМАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА</b> А.В. Николаев, Н.С. Криницын, В.Ф. Дядик .....	233

<b>РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИМ МЕМБРАННЫМ МОДУЛЕМ</b> А.В. Платонова, И.С. Надеждин.....	234
<b>МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ</b> А.О. Плетнев, С.Н. Ливенцов.....	235
<b>РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ВЕКТОРОВ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ КТ-NIMFA</b> А.Й. Погар, А.О. Плетнев .....	236
<b>РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА</b> А.А. Полосин, С.Н. Ливенцов .....	237
<b>ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ</b> А.С. Попов, А.В. Обходский, А.А. Липатникова, Е.С. Усков .....	238
<b>РАСШИРЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ КТ-NIMFA ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С ОРС-СЕРВЕРОМ ПО СПЕЦИФИКАЦИИ ОРС DA 2.05A</b> М.М. Савинов, А.И. Гожимов, А.О. Плетнев, С.Н. Ливенцов .....	239
<b>РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОНЛАЙН-ЛАБОРАТОРИИ</b> Г.В. Сумин .....	240
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ТОРОИДАЛЬНЫХ ГАРМОНИК ДЛЯ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В ТОКАМАКЕ КТМ</b> А.Б. Торузбаева, А.М. Ли.....	241
<b>РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА</b> Р.Б. Шишкин, В.М. Павлов .....	242
<b>CIRCUIT METHOD FOR INCREASING THE HIGH-SPEED OF OPERATIONAL AMPLIFIERS AND ANALOGUE SENSOR INTERFACES BASED ON RADIATION-HARDENED SOI TECHNOLOGIES</b> А.V. Bugakova.....	243
<b>THE CURRENT THRESHOLD LOGIC ELEMENT OF DIRECT CYCLIC SHIFT</b> N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai.....	245
<b>THE PERSPECTIVE ARCHITECTURES OF ACTIVE LOW FREQUENCY RC FILTERS FOR LIMITING THE SIGNAL SPECTRUM AT THE DIFFERENTIAL INPUT OF ANALOG-DIGITAL SENSOR CONVERTERS</b> N.V. Butyrlagin, D.Yu. Denisenko, E.A. Zhebrun, D.V. Kleimenkin ..	246
<b>DECISION SUPPORT MODULE FOR HEMOSTASIS FUNCTIONAL STATE ESTIMATION</b> E.A. Chursina, A.V. Kudinov.....	247
<b>CIRCUIT METHOD OF IMPROVING DYNAMIC PARAMETERS OF CRYOGENIC BUFFER AMPLIFIER ON COMPLETE FIELD TRANSISTORS WITH CONTROLLING P-N TRANSITION</b> E.P. Nikitina, A.V. Bugakova.....	248

## СЕКЦИЯ 1

### ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

## СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАДИАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ИРТ-Т

Е.А. Бондаренко, В.А. Варлачев, Е.Г. Емец

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [eab17@tpu.ru](mailto:eab17@tpu.ru)

Все более высокие требования предъявляются к надежности и продолжительности функционирования компонентной базы электронных приборов, эксплуатирующихся в условиях повышенного радиационного фона на современных космических и военных установках. Поэтому постоянно существует необходимость в проведение испытаний таких приборов на радиационную стойкость и расширение экспериментальной базы для проведения радиационных испытаний.

Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т обладает набором технических средств, позволяющим создать на базе одного из горизонтальных экспериментальных каналов установку для проведения таких испытаний. В результате исследований был посчитан спектр нейтронов в ГЭК-6 реактора ИРТ-Т с помощью пакета MCU-PTR [1]. На рисунке 1 представлено сравнение спектров в ГЭК-6 полученных в результате расчетов и экспериментальных измерений специалистами ВНИИФТРИ.

Известно, что для радиационных испытаний особый интерес представляют нейтроны с энергией больше 0,1 МэВ. Поэтому для снижения влияния нейтронов с меньшей энергии, в точке облучения смоделирован кадмиевый фильтр в форме пенала длиной 10 см с засыпкой из карбида бора на дне толщиной 1 см. На рисунке 2 приведено влияние кадмиевого пенала на спектр, полученного в пакете MCU-PTR.

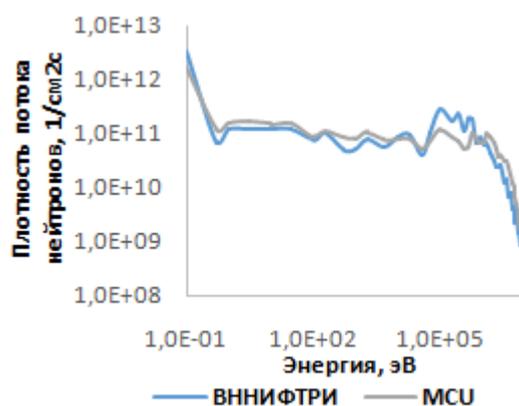


Рис. 1. Сравнение спектров в ГЭК-6 реактора ИРТ-Т

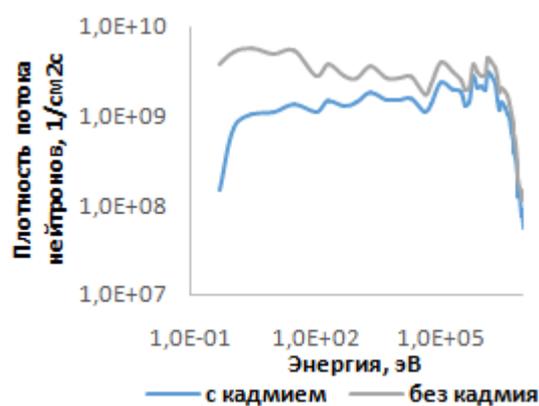


Рис. 2. Влияние кадмиевого фильтра

Значение потока нейтронов, вычисленное в пакете MCU-PTR, оказалась на 24 % выше экспериментального значения. Использование кадмиевого пенала данной геометрии позволило оптимизировать условия облучения, значительно снизив поток нейтронов в тепловой области. На созданной установке были проведены испытания компонентов электронных приборов в рамках коллаборации с НИИ ПП г. Томск.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шкаровский Д.А. Описание применения и инструкция для пользователей программ, собранных из модулей пакета MCU-5. – Москва: МИФИ. 2012 г. – 11 с.



## РАСЧЁТ СПЕКТРОВ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ БН–1200

А.С. Киркало, В.Н. Нестеров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ask123@tpu.ru](mailto:ask123@tpu.ru)

Развитие реакторов на быстрых нейтронах имеет большое значение в развитии атомной энергетики России в целом, так как данный тип реакторов обладает нейтронно-физическими параметрами, обеспечивающими возможность эффективного замыкания ядерного топливного цикла.

В рамках данной работы проводился 28-групповой расчёт спектра нейтронов в активной зоне реактора БН–1200 для более глубокого изучения и анализа его нейтронно-физических параметров. Полученные результаты, представлены на рисунке 1.

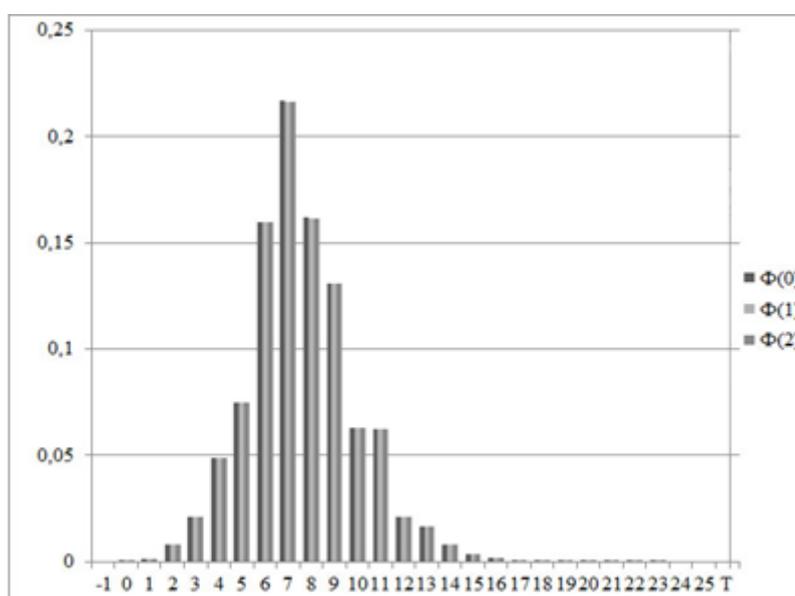


Рис. 1. Спектр потока нейтронов на нулевой ( $\Phi(0)$ ), первой ( $\Phi(1)$ ) и второй ( $\Phi(2)$ ) итерации

Спектры плотностей потока нейтронов в нулевой и первых двух итерациях сошлись в относительных единицах, поэтому сделан вывод, что итерационный процесс осуществлен правильно. Данный расчёт был осуществлён при учёте поправок для всех элементов топлива. Отклонения в нормальном поведении спектра (при наличии) обусловлены начальными данными при проведении расчётов [1, 2].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов С.Б. Результаты верификации программ расчёта нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора типа БН–1200 / С.Б. Белов, А.В. Киселёв, Е.В. Марова // Вопросы атомной науки и техники Серия: Физика ядерных реакторов. – 2014. – № 4. – С. 66-76.
2. Головацкий А.В. Организация итерационного процесса при численном восстановлении спектра нейтронов в размножающей системе с графитовым замедлителем / А.В. Головацкий, В.Н. Нестеров, И.В. Шаманин // Известия вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11. – С. 10–14.

**НАКОПЛЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И СОЕДИНЕНИЙ  
В МИКРОКАПСУЛИРОВАННОМ ТОПЛИВЕ В СВЕРХДЛИННЫХ КАМПАНИЯХ**

В.В. Кнышев, И.В. Шаманин, Д.В. Пасько, А.И. Зорькин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vyk28@tpu.ru](mailto:vyk28@tpu.ru)

В работах [1-2] проведены исследования микрокапсулированного топлива (МТ) диспергированного в графитовую матрицу в высокотемпературной газоохлаждаемой реакторной установке (ВГТРУ). В этих работах сообщается [1-2], что исследуемая активная зона ВГТРУ, в зависимости от конфигурации топливной таблетки и МТ, может проработать не менее 3000 эффективных суток на мощности 60 МВт. При таких режимах эксплуатации наблюдаются соответствующие технические проблемы, в частности значительное ухудшение теплофизических характеристик МТ.

Столь длительная работа и высокое значение выгорания топливного элемента повышает нагрузку на покрытия МТ, что в результате может привести к образованию дефектов и утечки продуктов деления [3-4], и ухудшению теплофизических свойств топлива. Основными факторами влияния на образование дефектов и увеличение нагрузки являются: нейтронное излучение; повышение температуры МТ при накоплении продуктов деления; рост внутреннего давления при увеличении концентрации газообразных продуктов деления и оксидных соединений [3].

В данной работе рассматривается образование газообразных продуктов деления и оксидных соединений в МТ диспергированного в графитовую матрицу [1-2] при сверхдлинных кампаниях топлива.

Предварительные расчеты показали, что при эксплуатации топлива при оптимальном содержании МТ (17 %), количество атомов кислорода, высвобождаемого, при делении  $(\text{Th,Pu})\text{O}_2$  [1-2], в одном МТ составляет  $3,6 \times 10^{17}$ . Из них всего 7,4 % взаимодействует с пироуглеродом с образованием оксидов углерода. Расчетное парциальное давление оксидов углерода составило 40 МПа, при условии равномерного распределения в пористом буферном слое пиролитического углерода при температуре в микротвэл 1500 °К.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90132.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Shamanin I.V., Chertkov Y.B., Bedenko S.V., Mendoza O., Knyshev V.V., Grachev V.M. Neutronic properties of high-temperature gas-cooled reactors with thorium fuel // *Annals of Nuclear Energy*. – 2018. – Vol. 113. – PP. 286-293.
2. Shamanin I., Bedenko S., Chertkov Y., Gubaydulin I. Gas-Cooled Thorium Reactor with Fuel Block of the Unified Design // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – PP. 1–8.
3. Калин Б.А., Платонов П.А., Чернов И.И., Штромбах Я.И. Физическое материаловедение. Том 6. Часть 2. Ядерные топливные материалы / под общ. ред. Б.А. Калина – М.: МИФИ, 2008, 604 с.
4. Ugajin M., Arai T., Shiba K. Variation of O/U Ratio and CO+CO<sub>2</sub> Pressure in Carbon-Coated UO<sub>2</sub>+x Particles // *Journal of nuclear science and technology*. – 1977. – Vol. 14. – No. 2. – P. 153-156.

## РАСЧЁТ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ ВВЭР-1200

К.С. Костюченко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ksk12@tpu.ru](mailto:ksk12@tpu.ru)

На сегодняшний день в ядерной энергетике в качестве ядерного топлива в большинстве ядерных реакторов используют двуокись урана ( $UO_2$ ). Одним из перспективных видов ядерного топлива, которое лишено данного недостатка, является дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ). ДЯТ состоит из двух фаз, первая – неактивная матрица, вторая – топливные частицы, диспергированные в матрицу. В качестве матриц предпочтительно использовать интерметаллиды на основе переходных металлов [1].

В рамках данной работы осуществлялся нейтронно-физический расчет реакторной установки ВВЭР-1200 с ДЯТ на основе интерметаллидной матрицы системы Zr-Al, получаемой в режиме СВ-синтеза.

Расчет осуществлялся в программе MCU. Полученный спектр плотности потока нейтронов в абсолютных единицах в зависимости от энергии нейтронов приведен на рисунке 1.

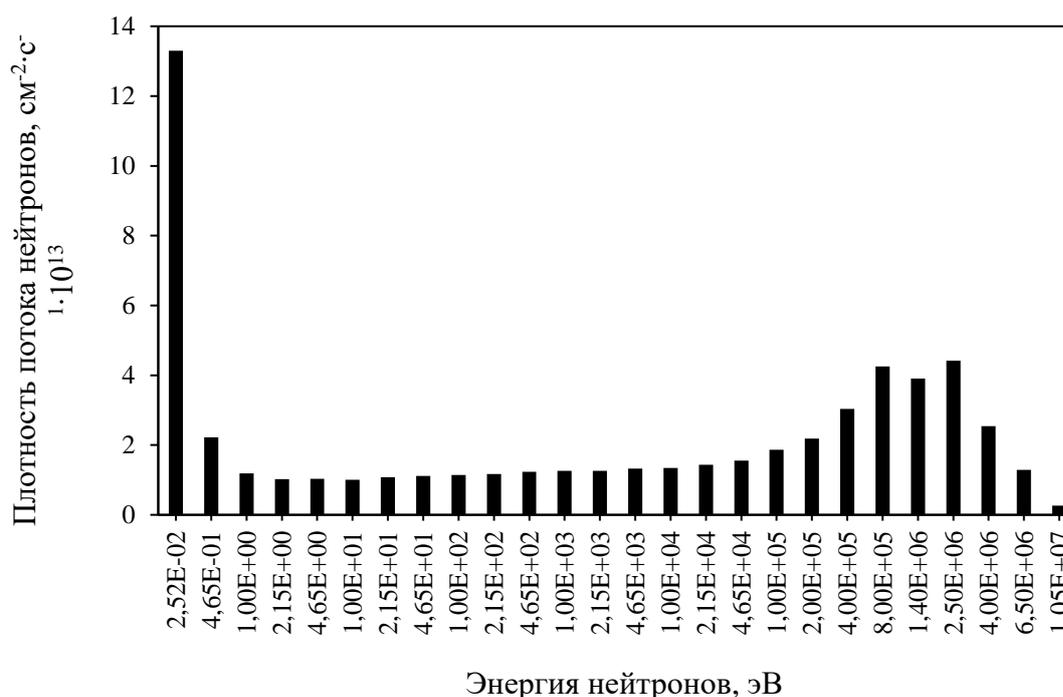


Рис. 1. Спектр плотности потока нейтронов

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанофазным упрочнением / Под научной редакцией Е.Н. Каблова и Ю.Р. Колобова. – М.: Издательский дом МИСиС, 2008. – 328 с.
2. Котельников Р.Б. Высокотемпературное ядерное топливо. / Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков, А.И. Каштанов, Т.С. Меньшикова – М.: Атомиздат, 1978. – 432 с.

**ИЗМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОРГАНОВ  
РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТОРА ИРТ-Т ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

А.С. Нургалиев, М.Н. Аникин, А.Г. Наймушин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [armanurgaliev@gmail.com](mailto:armanurgaliev@gmail.com)

ИРТ-Т – это реактор бассейнового типа, в котором в качестве теплоносителя, замедлителя и верхней биологической защиты используется дистиллированная вода. Тепловая мощность составляет 6 МВт [1, 2].

В активной зоне реактора ИРТ-Т в качестве рабочих органов СУЗ используются 9 стержней регулирования:

- один стержень автоматического регулирования;
- шесть компенсирующих стержней;
- два стержня аварийной защиты.

Стержни регулирования в реакторе были установлены в 1984 году и эксплуатируются до настоящего времени, за этот период они проработали 61925 часов. В связи с этим встал вопрос об изменении их характеристик и способности удовлетворять требованиям ядерной безопасности, так как в процессе эксплуатации происходит выгорание поглощающего материала. Это приводит к уменьшению физического веса, ухудшению регулирования реактора и аварийной защиты реактора, что снижает его безопасность [3].

В программном комплексе МСУ был произведен расчет выгорания стержней регулирования, были построены интегральная и дифференциальная характеристики стержней регулирования и определена их эффективность.

Также были проверены некоторые способы увеличения физического веса стержней регулирования, а именно замена наиболее выгоревшей группы стержней на стержни АЗ и поворот группы стержней регулирования относительно горизонтальной оси.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Варлачев В.А., Гусаров О.Ф., Заболотнов С.А. Исследовательский ядерный реактор ИРТ-Т. – Томск: Издательство ТПУ, 2002. – 56 с.
2. Варлачев В.А. и др. Нейтронно-физические параметры исследовательского ядерного реактора ИРТ-Т // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – №. 11-2. – С. 39-44.
3. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1985. – 278 с.

## ПОЛУЧЕНИЕ БОРИДА ВОЛЬФРАМА В РЕЖИМЕ СВ-СИНТЕЗА

А.А. Пермикин, М.М. Балачков, М.С. Кузнецов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aap71@tpu.ru](mailto:aap71@tpu.ru)

Задача защиты от смешанного ионизирующего излучения является очень важной для атомной отрасли. Одним из перспективных защитных материалов является борид вольфрама (WB). Наличие в соединении вольфрама позволяет использовать данный материал для защиты от фотонного излучения, а бора – от нейтронного. К тому же, данное соединение обладает высокой плотностью, порядка 16 г/см<sup>3</sup>, что положительно сказывается на его защитных свойствах.

Бориды вольфрама получают прямым синтезом из элементов, карботермическим восстановлением оксидов металлов и бора, боротермическим восстановлением оксидов металлов [1]. Однако наиболее перспективной материаловедческой технологией для получения WB можно считать методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [2].

СВ-синтез – технология, основанная на способности ряда химических элементов и их соединений вступать в экзотермические реакции. Схема синтеза приведена на рисунке 1.

СВС включает в себя следующие этапы:

- к заготовке, состоящей из смеси порошков, точно подводится тепло;
- тонкий слой реагентов нагревается и вступает в экзотермическую реакцию;
- посредством теплопроводности соседний слой образца нагревается до температуры инициации синтеза и реагенты вступают в химическую экзотермическую реакцию;
- волна реакций распространяется по всему образцу.

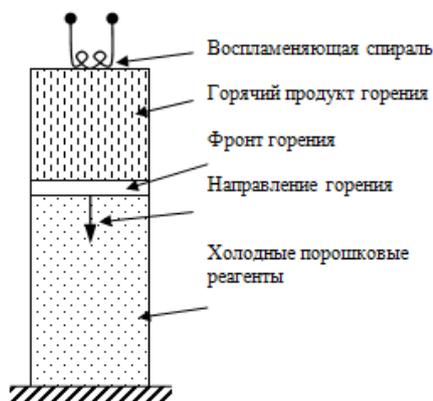


Рис. 1. Схема процесса СВС

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гурин В.Н. Методы синтеза тугоплавких соединений и перспективы их применения для создания новых материалов // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. – 1979. – №. 3. – С. 212-222.
2. Амосов А.П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: учебное пособие / А.П. Амосов, И.П. Боровинская, А.Г. Мержанов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 471 с.

## АНАЛИЗ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ОТ LOCKHEED MARTIN

С.С. Правосуд, К. А. Иванов

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ,

Россия, г. Северск Томской обл., пр. Коммунистический, 65, 636036

Е-mail: [sspravosud@gmail.com](mailto:sspravosud@gmail.com)

Проблемы энергообеспечения и энергетической безопасности являются одними из наиболее актуальных в современной мировой экономике и международных экономических отношениях. Запасы традиционных органических энергоносителей истощаются, обостряются противоречия между странами – экспортерами и странами - импортерами различных энергетических ресурсов.

Одним из ключевых направлений развития на рынке энергоресурсов является термоядерная энергетика. В феврале 2018 года компания Lockheed Martin получила патент на компактный термоядерный реактор, экспериментальный образец которого имеет размеры транспортного контейнера. Со слов разработчиков, эта установка сможет обеспечивать электроэнергией 80000 домов или авианосец класса Нимиц.

Результаты предварительных экспериментов свидетельствуют о том, что возможно создание компактного термоядерного реактора, работающего на слияние легких ядер, мощностью около 100 МВт. Компания утверждает, что компактные размеры позволят намного быстрее реализовать проект, так как каждая конструкция может быть изготовлена быстрее и значительно дешевле. Стоит отметить, что руководство обещает представить к 2022 году первую рабочую термоядерную электростанцию.

На сегодняшний день реактор выдает 0,9 эффективности; это означает, что затраты на разогрев и удержание плазмы практически полностью перекрываются. Следующий шаг – сборка образца который обладал бы эффективностью выше 1.

С точки зрения современной энергетики Lockheed Martin может предложить разработку для замены существующих энергоустановок, работающих на угле, газе и нефти, а также составить конкуренцию атомной энергетике.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/products/compact-fusion.html> – Электронный ресурс - Сайт проекта.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КАНАЛА РЕАКТОРА ИРТ-Т ДЛЯ НЕЙТРОН-ЗАХВАТНОЙ ТЕРАПИИ

Н.В. Смольников, М.Н. Аникин, И.И. Лебедев, А.Г. Наймушин  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [nvs38@tpu.ru](mailto:nvs38@tpu.ru)

В настоящее время количество людей в мире, больных онкологическими заболеваниями, составляет около 18 миллионов человек. При этом около 25 % заболеваний приходится на Европу и Россию.

На сегодняшний момент лучевая терапия является одним из самых используемых методов лечения, как по широте применения, так и по темпам развития. Процесс лечения осуществляется за счет получения опухоли достаточно высокой поглощенной дозы, по сравнению с нормальной тканью, что достигается точным геометрическим позиционированием и системой доставки энергетического пучка. Но использование классического метода лечения не позволяет вылечить все формы заболевания, поэтому продолжается поиск и разработка новых технологий.

Нейтрон-захватная терапия – наиболее перспективный вид лучевой терапии, который позволяет воздействовать непосредственно на опухоль. При облучении опухоли тепловыми нейтронами, содержащей препарат, в состав которого входят нуклиды  $^{10}\text{B}$ , возникает вторичное излучение в виде  $\alpha$ -частиц или Оже-электронов. Вторичное излучение оказывает губительное воздействие на клетки опухоли и не наносит вреда здоровым клеткам.

Исследовательский реактор ИРТ-Т – реактор бассейнового типа тепловой мощностью 6 МВт, который представляет собой монофункциональную установку для проведения большого числа исследований. Реактор имеет 10 горизонтальных и 14 вертикальных экспериментальных каналов.

Для определения возможности реализации НЗТ были проведены нейтронно-физические расчеты из которых было выявлено, что для целей НЗТ, благодаря наименьшей среди всех горизонтальных каналов дозе, приходящейся от нейтронов и гамма-квантов, подходит канал ГЭК-1. Однако для получения более подходящего спектра, позволяющего проводить предклинические и клинические испытания, необходима оптимизация данного канала.

В работе представлены результаты по оптимизации данного канала, включающие в себя: расчет влияния рассеивателя нейтронов, замену материального состава защитного шибера и расчет материального состава фильтров для формирования спектра нейтронов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

2. Злокачественные новообразования в России в 2015 году (заболеваемость и смертность) – М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, – 2017. – илл. – 250 с.
3. Пучки нейтронов для терапии: Обзор / Э.Л. Кушленников, А.Н. Довбня, Ю.Н. Телегин, В.А. Цымбал, С.С. Кандыбей. – Харьков: НИЦ ХФТИ, 2011. – 31 с
4. Sauerwein W. A. G., Moss R. L. Requirement for boron neutron capture therapy (BNCT) at a nuclear research reactor //The European BNCT Project, Belanda. – 2009.
5. Monshizadeh M. et al. MCNP design of thermal and epithermal neutron beam for BNCT at the Isfahan MNSR //Progress in Nuclear Energy. – 2015. – Т. 83. – С. 427-432.

## РАСЧЕТ СПЕКТРА ПОТОКА НЕЙТРОНОВ МЕТОДОМ ИТЕРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА В УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРАХ НА ПРИМЕРЕ ГТ-МГР

А.А. Соломатин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aas230@tpu.ru](mailto:aas230@tpu.ru)

С появлением все новых проектов ядерных энергетических установок появляются вопросы об устойчивости применяемых на сегодняшний день материалов в новых условиях. Топливо – главный элемент реактора, его специально разрабатывают для конкретного типа установок, когда как, к примеру, графит как замедлитель по своей форме и составу опирается на характеристики топливной композиции. Для оценки поведения тех или иных материалов в реакторе необходимо знать спектр потока нейтронов.

В основе модульного высокотемпературного гелиевого реактора с газовой турбиной (ГТ-МГР) лежит использование активной зоны с гелиевым теплоносителем, урановым или плутониевым топливом в виде компактов с микросферами, имеющих многослойные керамические покрытия, и графитовым замедлителем [1, 2]. Расчеты нейтронно-физических характеристик для данного реактора производились с помощью пакетов прикладных программ [3, 4], однако предлагается использовать итерационный процесс, так как он дает возможность анализировать полученные результаты, на основе которых можно формулировать и обосновывать различные технические варианты улучшения действующих в настоящий момент ядерных энергетических установок, а также совершенно новых реакторов.

Методика расчета предполагает решение многогрупповой (26 групп) системы уравнений диффузии для критического ядерного реактора (стационарная задача) [5]. На основе конструктивных характеристик ГТ-МГР [6] выполнен многогрупповой расчет одного типичного гомогенизированного топливного блока, результаты в относительных единицах которого представлены на рисунке 1.

Таким образом, проведен многогрупповой расчет спектра потока нейтронов методом организации итерационного процесса на примере реактора ГТ-МГР. Результаты расчета показывают, что в ходе трех итераций значения потока нейтронов практически полностью сошлись, что позволяет использовать данную методику для расчета нейтронно-физических параметров различных реакторов.

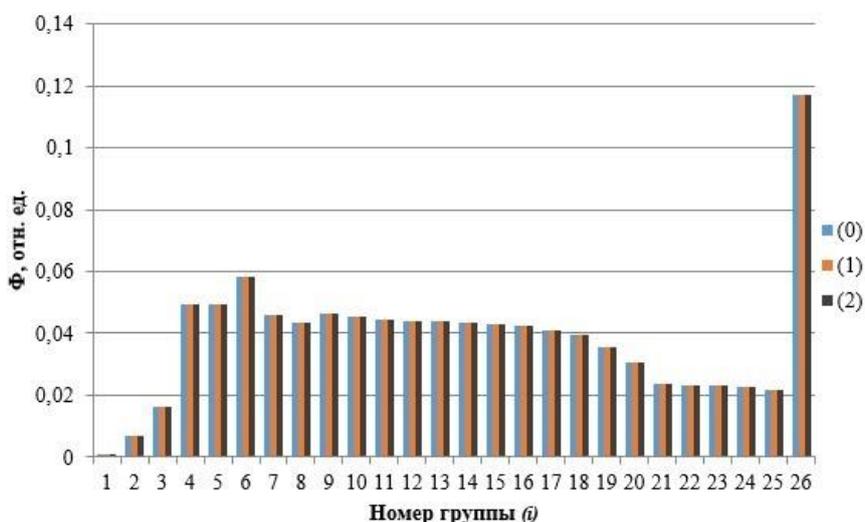


Рис. 1. Спектр потока нейтронов на нулевой (0), первой (1) и второй (2) итерациях



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гребенник В.Н. Модульный высокотемпературный гелиевый реактор // Энергия: экономика, техника, экология. – 2012. – №4. – С. 30а-36.
2. Kiryushin A.I. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine // Nuclear Engineering and design. – 1997. – V. 173. – №. 1-3. – P. 119-129.
3. Осипов С.Л. Результаты расчёта нейтронно-физических характеристик 3D модели реактора ГТ-МГР по коду MCU-HTR // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2013. – №. 2. – С. 15-24.
4. Глушков Е.С. Результаты верификации программы MCU-HTR на примере решения проектных нейтронно-физических задач ВТГР // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. – 2012. – №. 4. – С. 46-53.
5. Головацкий А. В. Организация итерационного процесса при численном восстановлении спектра нейтронов в размножающей системе с графитовым замедлителем // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 11. – С. 10-14.
6. Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: benchmark analysis related to the RBMR-400, RBMM, GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA critical facility [Электронный ресурс]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2013. – Режим доступа: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1694\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1694_web.pdf). – 02.04.19.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ТЕПЛООБМЕНА

К.С. Харитонкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kirill.haritonkin@yandex.ru](mailto:kirill.haritonkin@yandex.ru)

В последние несколько десятилетий интенсивно развивалось отдельное направление из области тепломассообмена, известное как контактный теплообмен [1]. Несмотря на большой объем экспериментальных и теоретических исследований в этой области, остается целый ряд вопросов, требующих отдельных исследований. Так, до настоящего времени отсутствуют научно обоснованные рекомендации по направленному повышению контактных термосопротивлений (КТС) при теплообмене через зоны раздела в контактных соединениях при введении в них малотеплопроводных заполнителей [2].

Перед началом опытов контактные поверхности образцов тщательно промывались ацетоном для удаления следов масла и других загрязнений. После размещения опытных образцов на установке их сжимали пять-шесть раз до наибольшего давления в данном опыте и выдерживали в течение 10-12 мин. Такое предварительное сжатие образцов обеспечивало хорошую воспроизводимость результатов и устраняло влияние отдельных микрошероховатостей [3].

Величину тепловых потоков определяли по градиенту температур в верхнем и нижнем образцах по формуле

$$q = \frac{\lambda_1 (t_n - t_{n-1})}{l},$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности материала верхнего образца, Вт/(м·град);

$t_n$  и  $t_{n-1}$  – температуры в смежных точках образца, где установлены термопары, град;

$l$  – расстояние между установленными термопарами, м.

Коэффициент теплопроводности материала относительно эталона (меди):

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{меди}} \frac{(t_n - t_{n-1}) l_2}{(t_m - t_{m-1}) l_1},$$

где  $t_m$  и  $t_{m-1}$  – температуры в смежных точках эталона, град;

$l_1$  – длина первого образца, м;

$l_2$  – длина второго образца, м.

В зоне контакта условия теплопередачи могут характеризоваться величиной контактного термического сопротивления  $RT$  или коэффициентом контактной теплопередачи (термическая проводимость)  $K$  [4].

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_k \cdot \tau},$$

где  $\Delta t_k$  – разница температур контактирующих поверхностей, град;

$F$  – величина нагрузки, Н;

$\tau$  – время, с.

После простых преобразований и группировки формул получаем следующую формулу, которой мы будем использовать в дальнейшем [5]:

$$R_T = \frac{1}{2,1 \cdot 10^4 \cdot \frac{p \cdot \lambda_m}{3 \sigma_B} + \frac{\lambda_c}{h_{cp}}},$$

где  $h_{cp}$  – средняя высота микрошероховатостей, м;

$\lambda_c$  – теплопроводность воздуха, (Вт/К);

$\lambda_m$  – теплопроводность материала, (Вт/К);

$\sigma_B$  – предел прочности материала, Па.

В ходе учебно-исследовательской работы были изучены установки по контактному теплообмену, каждая из установок обладала своими плюсами и своими минусами, но ни одна установка не была помещена в вакуум, поэтому было предложено поместить установку в вакуум для более точного и детального определения теплопроводности исследуемого материала, для которого в ходе вычислений получилась следующая формула:

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{меди}} \frac{(t_n - t_{n-1}) \cdot l_2}{(t_m - t_{m-1}) \cdot l_1}.$$

Таким образом, можно сказать, что контактный теплообмен практически не был изучен в вакууме, что дает нам обширные возможности для исследования этого явления. Однако был поставлен ряд экспериментов, по исследованию контактного теплообмена в вакууме и подобраны различные параметры для работы установок в нем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крючков А.Е. Контактный теплообмен через соединения с окисленными поверхностями: Автореф. дис. кан. тех. наук. – Воронеж: ВГЛА, 2009. – 18 с.
2. Шлыков Ю. П. и Ганин Е. А. Контактный теплообмен. М. – Л., Госэнергоиздат. 1963. 144 с. с черт.
3. Михайлова, Т.В. Контактный теплообмен при длительном нагружении [Текст] / Т.В. Михайлова, С.Ю. Меснянкин // Тр. 3-й Росс. нац. конфер. по теплообмену. – М.: МЭИ, 2002. – Т. 7. – С. 192-195.
4. Мадхусудана, К.В. Контактная теплопередача. Исследования последнего десятилетия [Текст] К.В. Мадхусудана, Л.С. Флетчер // Аэрокосмическая технология. – 1987. - №3. – С.103 – 120.
5. Горнилов Г.В.Ф. Исследование КТО. – М.: Мысль, 1990. – 524 с.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЁТА ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А.А. Храпов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aah41@tpu.ru](mailto:aah41@tpu.ru)

На сегодняшний день существует большое количество программ для проведения нейтронно-физического расчёта ядерных реакторов, однако все они производят расчёты на протяжении длительного промежутка времени. Из чего следует необходимость создания программы для проведения быстрых оценочных расчётов ядерных реакторов, которые позволяют определить их наиболее оптимальные конструкции.

Для этой цели был выбран метод расчёта приведённый в источнике [1]. Суть метода заключается в предварительном расчёте геометрических размеров реактора и скорости прокачки теплоносителя. После этого производится нейтронно-физический расчёт «холодного» ядерного реактора по формуле четырёх сомножителей, для определения коэффициентов этой формулы используются эмпирические зависимости. Далее производится оптимизации параметров ячейки по коэффициенту размножения нейтронов в бесконечной среде. Затем вводятся поправки, связанные с разогревом реактора до рабочей температуры, так же учитывается изменение температуры нейтронного газа.

Работоспособность программы была проверена с помощью гипотетического реактора. В качестве гипотетического был выбран водо-водяной реактор мощностью 1000 МВт, с топливом  $UO_2$ . Шаг расстановки твэлов 1,275 см, с внешним радиусом оболочки твэла 0,51 см и внутренним 0,45 см, а также внешним радиусом топливной таблетки 0,44 см. После проведённых расчётов  $k_{\infty} = 1,322$ ,  $k_{eff} = 1,295$ .

Для увеличения  $k_{eff}$  варьировался шаг расстановки твэлов, в результате расчётов был получен график, представленный на рисунке 1. Из рисунка видно, что наиболее оптимальные параметры лежат в диапазоне 1,6÷2,4 см, расчёты в более точных программах следует проводить именно в этом диапазоне.

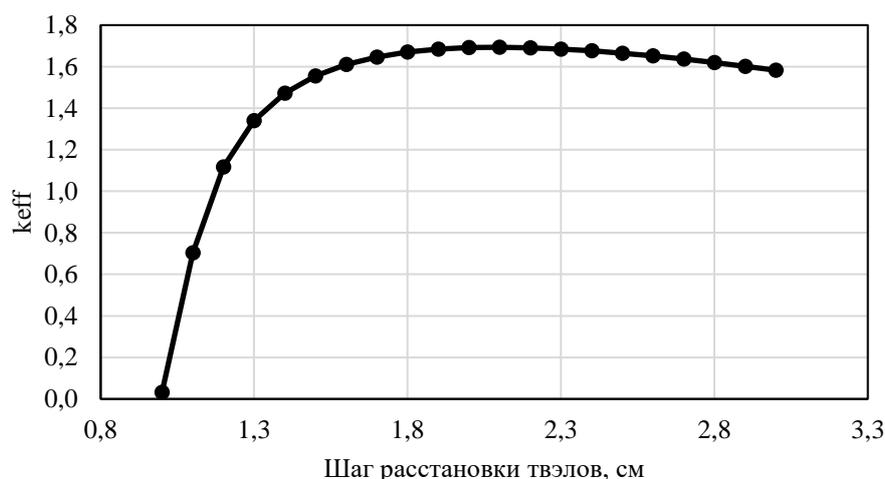


Рис. 1. Зависимость  $k_{eff}$  от шага расстановки твэлов

В результате проведённой работы было разработано программное обеспечение для расчёта параметров ядерных реакторов, которое позволяет проводить быстрые оценочные расчёты. Для проверки работоспособности были произведены расчёты гипотетического реактора, также был определен оптимальный диапазон шага решётки твэлов. В дальнейшем планируется доработать программу для расчёта горячего состояния, отравления и эффектов шлакования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко В.И. и др. Физический расчет ядерного реактора на тепловых нейтронах. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009 – 504с.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОЗИТРОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПРИРОДНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Цуй Цзян, Р.С. Лаптев, К.П. Арефьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [tszyan@mail.ru](mailto:tszyan@mail.ru)

**Введение.** Хвойные деревья в лесу подвержены влиянию множества факторов, вызывающих не только полезные изменения (годовой прирост), но и приводящие к порокам структуры и цельности тканей древесины. Многочисленные дефекты могут повлиять на жизнестойкость дерева, и оно может не выдержать разрушительного действия аномальных явлений природы (сели, лавины, ураганы). Взрослые деревья способны выдержать напор стихии, но при этом структура годовых колец претерпевает изменения, отслеживаемые в дендрохронологических характеристиках (плотность, ширина кольца и др.). В различных работах приводится обзор дефектоскопических методов по аномалиям отражённого или прошедшего через образец сигнала. В качестве порока древесины рассматриваются неоднородности, выделяющиеся на поверхности или в массиве древесины. Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) и компьютерная рентгеновская томография (КТ) представляют собой современные методы изучения структуры и дефектоскопии вещества. Рентгеновская томография используется достаточно широко, в частности для визуализации структуры образцов в исследованиях другими методами. Метод ПАС используется для изучения молекулярных характеристик полимеров и композитов на их основе, для изучения характеристик микрофибрилл целлюлозы, углеродного волокна и смол, для дендроклиматологических исследований в отличие от метода КТ ранее не применялся [1,2].

В настоящее время базы данных International Tree Ring Data пополнились новыми дендрохронологическими данными о структуре годовых колец. Цель экспериментальных исследований древесины высокотехнологическими методами – поиск структурных параметров древесины, содержащие отклики на изменения окружающей среды.

**Методы и результаты измерений.** В качестве объекта исследования был выбран спил столетнего сибирского кедра, с древесиной без видимых глазом дефектов. Дерево произрастало в кедровнике Томской области (56°25' с. ш. 84°57' в. д., д. Трубачево). Спил хранился в помещении несколько лет. Поэтому влажность образца составила 8-12% (древесина комнатно-сухой влажности, долгое время находившаяся в отапливаемом помещении). Часть спила в виде кубиков 2\*2 см<sup>3</sup>, вырезанных из образца древесины и датированная от коры с шагом в среднем 5 лет, исследовалась методом ПАС, образцы другого распила и один из кубиков (N8) – методом КТ.



Рис. 1. Образцы древесины

### КТ измерения

Метод компьютерной рентгеновской томографии – математическая реконструкция внутренней трехмерной структуры объекта исследования на основе измерений поглощения рентгеновского излучения при многократном облучении объекта в разных пересекающихся областях. Поглощение излучения в веществе зависит от его плотности. Для визуальной и количественной оценки рентгеновской плотности  $R$ , используется шкала в единицах Хаунсфилда (HU) показывающая степень ослабления излучения в материалах. Шкала показывает отношение ослабления излучения в воздухе и в дистиллированной воде, плотность рентгеновских лучей в средах соответственно равны 0 и 1000 HU, при стандартном давлении и температуре. Рентгеновская плотность определяется по уравнению (1):

$$R = 1000 \frac{\mu - \mu_{water}}{\mu_{water} - \mu_{air}},$$

$\mu$  являются линейными коэффициентами ослабления для материала, воды и воздуха в нормальных условиях. Отрицательные значения  $R$  указывают вещества с меньшей плотностью по сравнению к воде, и положительные значения  $R$  относятся к более высокой плотности. Плотность рентгеновского излучения древесины зависит как от типа древесины, так и от физического состояния образца с определенными значениями температуры и влажности. Чтобы определить физическую плотность образцов древесины на основе результатов ХСТ выполняется калибровка измерений с помощью томографического сканирования эталонного образца древесины с известной плотностью [3,4].

### Обсуждение результатов.

Ряд исследований позитронной аннигиляции в углеродосодержащих материалах показал существование короткоживущей компоненты со средним временем жизни от 350 до 400 пс. Интенсивность аннигиляции позитронов в углеродных волокнах (целлюлозе клеточных стенок древесины) и твердом растворе, пронизывающем волокно (лигнине) пропорциональна электронной плотности материала, в то время как прямая связь между временем жизни позитронов и размером пор позволяет оценить пористость вещества [5].

Заключение. Таким образом, ПАС является перспективным методом неразрушающего контроля структуры материалов, применяющимся в разных отраслях науки и техники.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Szimani R., McDonald K. Defect detection in lumber: state of the art // Forest Products Journal – 1981. – Vol.31. - No11. – pp.34-44
2. Задраускайте Н.О. Классификация пороков древесины как объектов для систем идентификации. Электронный научный журнал. 2015. № 3 (3). С. 53-58
3. В.И. Графутин, Е.П. Прокопьев. Применение позитронной аннигиляционной спектроскопии для изучения строения вещества.
4. Bondarenko, S. L., Batranin, A. V., Smirnov, S. V. & Stuchebrov, S. G., X-ray imaging and computed tomography of conifer tree rings for climatological purposes. 2018, В: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 211, 1, 012044
5. Биоиндикация стратосферного озона // Под общей ред. В. В. Зуева; Рос. акад. наук, Сиб. отд., Институт оптики атмосферы [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 228 с.

CALCULATION COMPLETENESS OF COMBUSTION OF FUEL USING  
DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF FLAME

I.R. Galiev, V.E. Epishkin

Tolyatti State University

Russia, Tolyatti, st. Beloruskay, 14, 445012

E-mail: [sbs777@yandex.ru](mailto:sbs777@yandex.ru)

Since the 2000s, new fuel hythane (a mixture of natural gas with hydrogen) has become very popular. Hythane successfully combines the advantages of natural gas (cheap fuel) and hydrogen (environmentally friendly and high heat of combustion). To create new engines and power plants using hythane, it is necessary to thoroughly study the process of combustion of composite fuel and its impact on energy, economic and environmental characteristics. Existing solutions for increasing the combustion efficiency are intuitive in nature, and models that predict its values have a high level of empiricism, low accuracy and work in a narrow range of engine operating modes, which makes it difficult to use them when designing energy-efficient combustion chambers. Objective work: to develop a method for calculating the completeness of combustion of composite fuel (hythane) using the characteristics of flame propagation. Studies were conducted on a single-cylinder engine with spark ignition.

The fuel was hythane, with a volume content of hydrogen 29, 47, and 58 %. The experimental procedure was in parallel with the signal recording ionization probes, spark ignition, crankshaft position sensor, air flow sensor and the recording waveform using a multi-channel analog-to-digital converter in the memory of a personal computer [1]. As a result of the research, the values of the maximum flame temperature, the width of the chemical reaction zone and the propagation velocity of the turbulent flame were obtained during the operation of the experimental setup with various hydrogen additions in hythane and air excess factors. To calculate the completeness of fuel combustion ( $\chi$ ), using the characteristics of flame propagation, the ideal gas equation was used taking into account the equality of pressures in the burned and unburned zone of the combustion chamber. As a result, the formula was obtained:

$$\chi = \frac{1}{\frac{R_b \cdot T_b}{R_f \cdot T_{bmin}} \cdot \frac{V_{ub}}{V_{\kappa c} - V_{ub}} + 1},$$

where  $R_b$  - gas constant of the combustion products, J/(mol ·K);  $R_f$  - gas constant of the fuel assembly, J/(mol K);

$T_{bmin}$  - flame extinction temperature, K;

$T_b$  - maximum flame temperature, K;  $V_b$  - volume of combustion products, m<sup>3</sup>;

$V_{ub}$  - volume of unburned fuel, m<sup>3</sup>.

Analyze calculation of  $\chi$  shows that, in spite change speed internal combustion engine and hydrogen concentration in fuel, maximum values for fuel combustion are observed at an air excess factor of  $\alpha = 1$ . Similar results were obtained when processing and analyzing experimental data of Italian and Brazilian scientists devoted to study effect fuel composition on the combustion rate of gasoline in ICE with direct fuel injection [2]. Also, the analysis of calculation of  $\chi$  using formula showed that with increase proportion hydrogen in fuel, completeness combustion fuel increases, which is explained by an increase rate of fuel combustion in wall layer and a decrease in width of the flame. Similar results were obtained when processing experimental data of British scientists from University



of Birmingham [3] and scientists from Yonsei University [4], who studied effect of hydrogen additives on full combustion of fuel in a gas piston engine with spark ignition. This indicates reliability obtained laws and their applicability for engines of different designs. Comparison combustion completeness calculated by proposed formula, with  $\chi$ , obtained on basis analysis experimental indicator diagram using first law of thermodynamics, equation state and two-zone combustion model, showed convergence between data of more than 85 %.

This work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part program for the appointment of a scholarship President of the Russian Federation for young scientists.

#### REFERENCES

1. Shaikin A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Bobrovskij I.N. Use of Ionization Sensors to Study Combustion Characteristics in Variable Volume Chamber // IEEE. – 2018. - № 978-1-5386-7386-7.
2. Martinez S. Flame Front Propagation in an Optical GDI Engine under Stoichiometric and Lean Burn Conditions // Energies. – 2017. - № 10. – P. 1314-1337.
3. Chang A.N. Improved method of investigation of combustion parameters in a natural gas fuelled SI engine with EGR and H<sub>2</sub> as additives / Doctoral thesis. Birmingham, 2002. - 196 p.
4. Park J. A numerical study of a methane-fueled gas engine generator with addition of hydrogen using cycle simulation and DOE method // International Journal of Hydrogen Energy. – 2011. - № 8. – P. 5153-5162.

## THE STUDY OF THE PROBABILITY OF INCREASING THE OPERATING TIME OF THE NUCLEAR REACTOR KLT-40 S THROUGH THE USE OF PERSPECTIVE NUCLEAR FUEL CYCLES

V.S. Gontov, N.A. Anikin, L.V. Chernov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Lenin Avenue, 30, 634050

E-mail: [vladislav.gontov@gmail.com](mailto:vladislav.gontov@gmail.com)

The low-power reactor KLT-40 S is one of the most promising projects of nuclear power generation industry in the Russian Federation. Mobility and perspectivity of energy supply for isolated [northern areas](#) define the need to study probability of increasing the operating time to improve the economic feasibility of the nuclear reactor [1].

The purpose of the research is to determine the best nuclear fuel used in the core of the reactor KLT-40 S to enhance self-sufficiency of the nuclear reactor.

The fuel for KLT-40 S is uranium dioxide particles in the matrix made of aluminum-silicon alloy. In the study, this alloy consists of 90 % of aluminum and 10 % of silicon [2].

The density of fuel pellets is constant during the research. The following types of fuel are:  $(U^{238}-U^{235})O_2$ ,  $(Th^{232}-U^{235})O_2$ ,  $(U^{238}-Pu^{239})O_2$  and  $(Th^{232}-U^{233})O_2$ . For all types of fuel, the percentage of fissionable nuclide is 18.6 %.

To determine the neutron flux and to calculate a value of the effective neutron multiplication factor, the iterative process of calculating the system of the neutron diffusion equations in a 26-group approximation was completed [3].

The calculation of the change of the nuclide composition in the reactor core was conducted using the finite difference method for solving differential equations with a step of 50 effective full power days. The software was developed to make calculations, which allows determining the dynamics of changes in the nuclide composition, the neutron flux, the effective neutron multiplication factor and other parameters in the reactor core.

The dependences of the changes of the effective neutron multiplication factor in the core of the reactor KLT-40 S on the operating time for different fuels are given in fig.1.

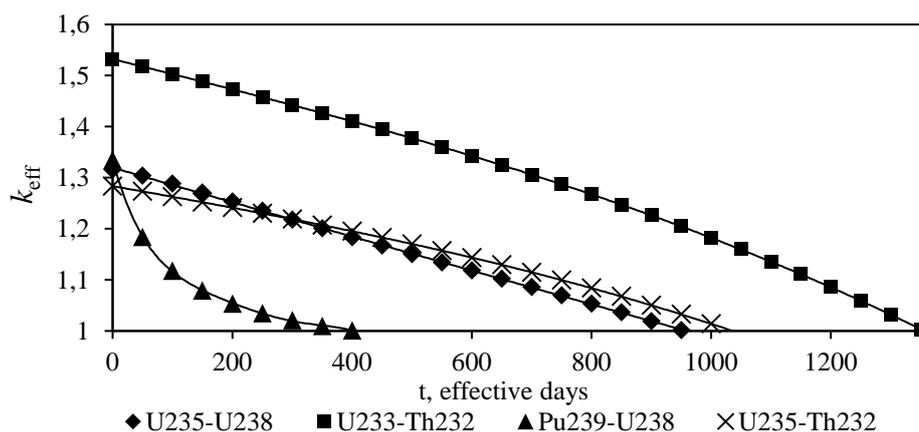


Fig. 1. Dependences of the effective neutron multiplication factor in the core of the reactor KLT-40 S on the operating time without refueling

Accordingly, the thorium-uranium nuclear fuel cycle can increase the operating time of the reactor KLT-40 S by 400 effective days in comparison with the conventional fuel load if the fuel composition  $(Th^{232}-U^{233})O_2$  is used.

REFERENCES

1. I.R. Stepanov. Nuclear heating in the North Areas. – L.: Science, 1984. — 174 p.
2. D.F. Bajbakov, A.V. Godovyh, I.S. Martynov, V.N. Nesterov. The effect of the nuclide composition of the fuel load on the breeding and reproducing properties of the core of the KLT-40S// *Izvesti vuzov. Yadernaya Energetika.* -2016. -№2. – 103 p.
3. A.V. Golovackij, V.N. Nesterov, I.V. Shamanin. The organization of an iterative process for the numerical reconstruction of the neutron spectrum in a neutron system consisted of a graphite moderator// *Journal of the Russian Universities: Physics.* –2004. –№1.

NUMERICAL SIMULATION OF COOLANT FLOW IN THE IBR-2M PULSED  
REACTOR FUEL ASSEMBLY

D.B. Mukhambetalin, I.V. Burkov, Y.Y. Weber

Joint Institute for Nuclear Research,

Russia, Dubna, 6 Joliot-Curie St., 141980

E-mail: [dan\\_1196@mail.ru](mailto:dan_1196@mail.ru)

The purpose of this work is to carry out numerical simulation of the coolant flow in the IBR-2M fast-pulsed reactor fuel assembly. The research included following problems: familiarization with the ANSYS [1] software package; determination of assumptions and approximations for the calculation model; calculation model development; simulation of the normal operation conditions; performing additional evaluation calculations for validation of the principles and approaches, used in the calculation model creation; analysis of the obtained results.

As a result of this work, the ANSYS [1] software package was mastered, with the help of which, a calculation thermal-hydraulic model of the IBR-2M reactor fuel assembly was developed. In addition, the evaluative calculations of the thermal-hydraulic characteristics of the fuel assembly were carried out, the results of which were used for comparison with the calculations of numerical simulation. In addition, conservative evaluations of the thermal-hydraulic characteristics of the system, using a three-dimensional mathematical model, are obtained. Also, the paper include the evaluations of pressure distribution, temperature field and velocity field in fuel assembly (figure 1), obtained by numerical simulation of the developed calculation model using the finite-difference method.

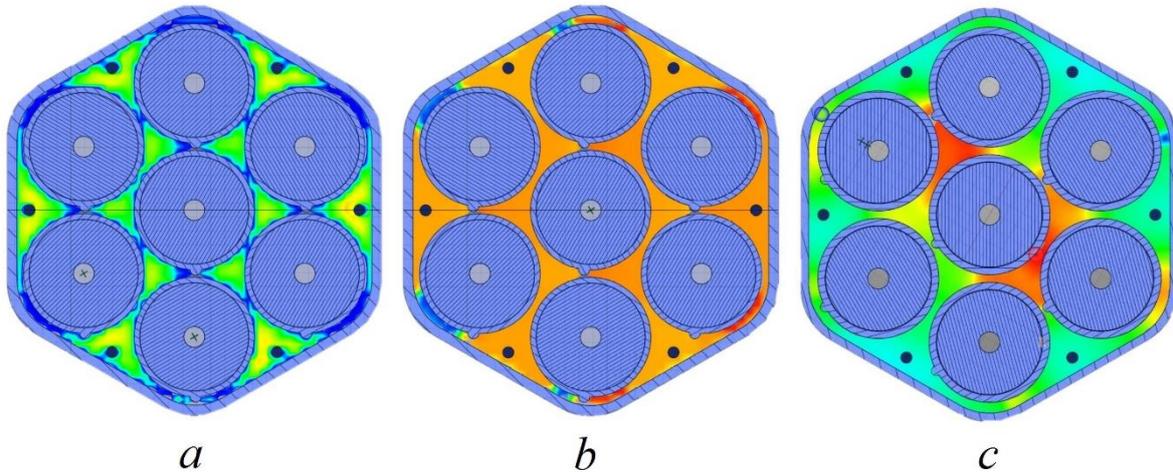


Fig. 1. Results of numerical simulation in the cross-section:

a – velocity field; b – pressure distribution; c – temperature field

It is shown that the scheme with the use of three-dimensional numerical simulation for the evaluation of thermal-hydraulic characteristics, proposed in this paper, allows to obtain a better and informative understanding of the coolant flow process, which is not achievable using standard methods and approaches. The main result of the work is the calculation model of the IBR-2M fuel assembly, which recommended to use for further research.

REFERENCES

1. ANSYS Discovery Live [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.ansys.com>. – 22.07.19.

## СЕКЦИЯ 2

### ИННОВАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ СОВРЕМЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

## ФТОРАММОНИЙНЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА ТИТАНА ИЗ ИЛЬМЕНИТА

Г.С. Багдасарян

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [bagdasaryan@tambo.ru](mailto:bagdasaryan@tambo.ru)

Диоксид титана ( $TiO_2$ ) является важнейшим соединением, используемым в промышленности и быту. Производство лакокрасочных материалов является основным потребителем  $TiO_2$ , а также пластмассы, бумага, продукты питания и косметические товары [1]. Для его получения используются:  $NH_4F$  (фторид аммония, ФА),  $NH_4HF_2$  (гидрофторид аммония, ГДФА) и  $NH_4OH$ ; в качестве сырья – ильменитовый концентрат Иршанского горно-обогатительного комбината:

Таблица 1. Состав ильменита Иршанского ГОКа

Оксид	$FeTiO_3$	$TiO_2$	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$MnO_2$	$Al_2O_3$	Прочее
m, %	79,04	14,33	1,59	0,64	0,67	0,62	0,35	2,76

Фтораммонийный процесс состоит из трёх основных частей: гидрофторирование, сублимация и гидрометаллургия, которая включает в себя растворение титановой части, осаждение и фильтрацию, сушку и прокалику.

На первой стадии ильменит ( $FeTiO_3$ ) реагирует с ГДФА при температуре 240 °С в течение 4 часов, в результате образуются фтораммонийные комплексы Ti, Si, Fe и пр.

При сублимации происходит частичное разложение этих комплексов и отделение Si в виде гексафторосиликата аммония (ГФСА) при температуре 400 °С в течение 4 часов.

Далее обескремненный продукт растворяют в 20 % растворе ФА, для перевода фтораммонийных комплексов в раствор. После этого фильтрат подщелачивают до  $pH = 7,2$  добавлением раствора аммиака, при этом осаждаются примеси в виде гидроксидов. После этого титановую часть осаждают при  $pH = 8,2$  добавлением  $NH_4OH$ . Полученный продукт прокаливается для удаления кристаллизационной воды и проходит сушку. В результате, был получен осадок белого цвета массой 15,33 г, теоретически рассчитанное значение составляет 55,93 г. Таким образом, выход продукта составляет 27,4 % от теоретического.

Низкий выход продукта может быть обусловлен потерями при переносе веществ из одной посуды в другую, недостаточной степенью реагирования и растворения в воде комплексных соединений.

Для увеличения выхода целевого продукта можно увеличить объём жидкой фазы на стадии растворения или увеличить время стадий выщелачивания и сублимации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяченко А.Н. Диоксид титана / А.Н. Дьяченко, Р.И. Крайденко – М.: Изд-во Томский политехнический университет, 2017. – 121 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАТИНИРОВАННЫХ  
ТИТАНОВЫХ АНОДОВ В АЗОТНОКИСЛОМ РАСТВОРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ  
ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЕМЫЕ ИОНЫ СЕРЕБРА (II) И ТВЕРДУЮ ДИСПЕРСНУЮ ФАЗУ

Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, А.В. Сиротина

ФГУП «Горно-химический комбинат»,

Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 58а, 662970

E-mail: [AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su)

На ФГУП «ГХК» в производстве МОКС-топлива для растворения диоксида плутония, а также скрапа, который представляет собой остатки бракованных таблеток МОКС-топлива (смесь  $PuO_2$  и  $UO_2$ ), измельченные и подверженные высокотемпературной обработке, используются платинированные титановые аноды. Практика их эксплуатации показала, что платиновый слой на аноде практически полностью разрушается в течение 2 лет. Анализ причин разрушения свидетельствует о том, что это происходит вследствие воздействия твердой фазы (высокопрокаленного скрапа), находящейся в азотнокислом растворе, содержащем электрогенерируемые ионы серебра (II). Таким образом, представляется целесообразным проведение лабораторных исследований, направленных на улучшение свойств платинового покрытия и увеличение срока службы платинированных титановых анодов (ПТА).

Целью данного исследования является оценка стойкости анода в азотнокислом растворе, содержащем электрогенерируемые ионы серебра (II) и твердую дисперсную фазу.

Метод изготовления ПТА включал предварительную подготовку титанового электрода (обезжиривание, травление в смеси  $H_2SO_4+HCl$ ), электроосаждение платины из щелочного электролита и термическую обработку изделия в инертной атмосфере при температуре  $700^\circ C$  в течение часа.

Исследование электрохимического поведения неотожженных ПТА в азотнокислом растворе, содержащем электрогенерируемые ионы серебра (II) и твердую дисперсную фазу ( $TiO_2$  в качестве модельного материала) в соотношении т/ж=1:27, показало, что при плотности тока  $2 A/дм^2$  скорость разрушения анода, не подверженного отжигу, составила  $0,208 г/м^2 \cdot ч$ . При этом, несмотря на практически полное разрушение платинового слоя, ПТА не потерял своей работоспособности в течение более 200 часов непрерывной работы.

Изучение стойкости отожженных ПТА в тех же условиях показало, что скорость коррозии отожженного ПТА составила  $0,028 г/м^2 \cdot ч$ , т.е. в 7 раз ниже по сравнению с неотожженным. Начало разрушения платинового слоя визуально было отмечено через 168 часов работы отожженного ПТА при плотности тока  $6 A/дм^2$  (общая продолжительность работы электрода составила более 500 часов).

Таким образом, для эффективной работы ПТА в азотнокислом растворе, содержащем электрогенерируемые ионы  $Ag(II)$  и дисперсную твердую фазу, необходимо включить в технологическую цепочку изготовления ПТА стадию отжига в инертной атмосфере при температуре  $700^\circ C$ . В случае использования отожженного ПТА в диапазоне  $2-6 A/дм^2$  наблюдается прямая зависимость скорости разрушения анода от плотности тока. Поэтому оптимальная плотность тока для эффективной работы ПТА составляет  $2 A/дм^2$ . Данный метод можно считать экспрессным для исследования процесса разрушения ПТА в азотнокислом растворе, содержащем электрогенерируемые ионы  $Ag(II)$  и твердую дисперсную фазу.

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ И РЕЦИРКУЛЯЦИЯ СЕРЕБРА  
В АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРАХ**

Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, В.А. Кравченко, А.В. Обедин

ФГУП «Горно-химический комбинат»,

Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 58а, 662970

E-mail: [AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su)

Применение растворов азотной кислоты с электрогенерируемым двухвалентными ионами серебра для растворения диоксида плутония имеет ряд преимуществ перед другими способами растворения.

Проблема извлечения и рециркуляции серебра из растворов азотной кислоты является особо острой в технологии растворения диоксида плутония. Среди способов извлечения серебра из растворов азотной кислоты, загрязненных веществами с альфа-излучением известны:

- процесс восстановления и осаждения  $\text{Ag(I)}$  в виде  $\text{Ag(0)}$  с помощью аскорбиновой кислоты. В таких процессах необходимо введение соединений (нитрата гидразина, гидроксиламина), предотвращающих автокаталитическую реакцию растворения осажденного серебра избытком  $\text{HNO}_3$ .

- способ восстановления  $\text{Ag(I)}$  до  $\text{Ag(0)}$ , осуществляемый в электролизной установке с отдельной камерой.

Цель проведенных исследований является изучение процесса электролиза в азотнокислом растворе, содержащем ионы серебра, в мембранном электролизере.

Эксперименты проводили в U-образном электролизере, имеющем в качестве разделительной перегородки керамическую мембрану. В качестве растворов применяли 6М  $\text{HNO}_3$  и 6М  $\text{HNO}_3$ , содержащем нитрат серебра

Получены следующие результаты исследований:

При электрохимической поляризации электродов наблюдали увеличение концентрации серебра в катодном пространстве с 0 до 250 мг/л. Определено, что данная концентрация является неизменной при плотности тока 3 А/дм<sup>2</sup> и уменьшается при повышении плотности тока.

Определено, что в результате поляризации на катоде из азотнокислого раствора, содержащего серебро, наблюдается процесс восстановления  $\text{Ag(I)}$  до  $\text{Ag(0)}$ . Скорость выделения серебра составила 40 мг/ч.

Экспериментами показано, что низкий выход по току  $\text{Ag(0)}$  обусловлен образованием анионных комплексов серебра с нитрат ионами. Увеличение концентрации ионов  $\text{Pu(IV)}$  повышает выход по току.



ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ  
ДИОКСИДА ПЛУТОНИЯ ОТ АМЕРИЦИЯ

Е.О. Григорьева, И.Г. Ефремов, В.А. Кравченко, А.В. Обедин

ФГУП «Горно-химический комбинат»,

Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, 58а, 662970

E-mail: [AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su](mailto:AVObedin@mcc.krasnoyarsk.su)

Технологический процесс технологии очистки плутония от америция можно разделить на четыре основных этапа: растворение диоксида плутония, подготовка растворов плутония, сорбция или экстракция растворов, переработка америцийсодержащих растворов. На каждом этапе технологии используется определенный тип оборудования.

Целью данной работы являлось совершенствование электрохимической технологии растворения диоксида плутония в присутствии двухвалентного серебра.

После электрохимического растворения диоксида плутония, одной из основных задач является рециркуляция серебра, т.е. его выделение и повторное использование на этапе растворения.

В числе способов извлечения серебра из растворов азотной кислоты, с одной стороны, известен процесс восстановления и осаждения  $\text{Ag(I)}$  в виде  $\text{Ag(0)}$  с помощью аскорбиновой кислоты, сопровождаемый обычно с введением соединений, предотвращающих автокаталитическую реакцию растворения осажденного серебра посредством  $\text{HNO}_3$ : нитрата гидразина, гидроксилamina, и, с другой стороны, способ восстановления  $\text{Ag(I)}$  до  $\text{Ag(0)}$ , осуществляемый в электролизной установке с отдельной камерой.

Для данного процесса предлагается совместить следующие операции:

- наработка двухвалентного серебра в анодном пространстве вследствие электрохимической диффузии его нитратных комплексов через керамическую мембрану из катодного пространства;
- растворение диоксида плутония в анодном пространстве в присутствии электрогенерируемого двухвалентного серебра  $\text{Ag(II)}$ .
- электрохимическое восстановление шестивалентного плутония и выделения  $\text{Ag(0)}$  на катоде.
- повторное растворение серебра в азотной кислоте в анодном пространстве.

Данное решение позволит снизить количество используемого серебра в процессе растворения.

## ЭКСТРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ РАЗДЕЛЕНИЯ УРАНА И ПЛУТОНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОЯТ

Н.А. Журавлев, И.В. Распутин, В.А. Карелин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [nikolay\\_shuravlev@mail.ru](mailto:nikolay_shuravlev@mail.ru)

Разделение U и Pu и очистка их от продуктов деления – один из основных процессов переработки ОЯТ, основанный на различии свойств этих элементов в разных валентных состояниях. Разделение основано на различной экстрагируемости  $UO_2^{2+}$ ,  $PuO_2^{2+}$  и  $Pu^{4+}$  в 30 %-ном растворе трибутилфосфата (ТБФ) в углеводородном разбавителе (изопаре-М, РЭД-1, 2 и др.). При 50-70 %-ном насыщении органической фазы этими металлами и соотношении U:Pu от 1:25 до 1:50 проводят восстановительную реэкстракцию  $PuO_2^{2+}$  ураном (4+). Изучена полнота процессов восстановления и реэкстракции Pu из органической фазы в водный раствор (рис. 1). Исследовано влияние восстановителей ( $NaNO_2$ ,  $Fe(NH_2SO_3)_2$ ,  $Fe(NO_3)_2$ ,  $U(NO_3)_4$ ). При определении влияния концентрации  $U^{4+}$  на кинетику восстановления показано, что с уменьшением концентрации  $HNO_3$  с 7 до 2 М падает время восстановления с 16 до 4 мин (в 4 раза). При этом коэффициент распределения Pu уменьшается с  $5 \cdot 10^{-2}$  до  $3 \cdot 10^{-4}$ . Чем выше концентрация  $U^{4+}$  в восстанавливающем растворе, тем эффективнее протекает процесс восстановления. Константа скорости восстановления в водной фазе, достаточна для обеспечения ( $T_{1/2} \sim 0,3$  мин) восстановления  $PuO_2^{2+}$  ураном (4+) в колонных аппаратах, где время нахождения растворов в смесительной зоне составляет 3-4 мин. Обоснована необходимость применения  $U(NO_3)_4$  для проведения реэкстракции  $PuO_2^{2+}$ .

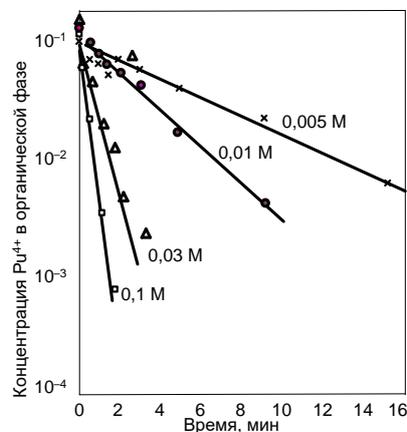


Рис. 1. Влияние концентрации урана (4+) (цифры у кривых) на кинетику восстановления плутония

Таким образом, режим восстановительной реэкстракции должен быть таким, чтобы в зоне вывода плутония поддерживалась высокая концентрация урана (4+), а в зону подпитки подавалось количество ТБФ, обеспечивающее эффективное проведение процесса экстракции образующегося  $UO_2^{2+}$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А. Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. – М.: ЗАО «Издательство Атомэнергоиздат», 2006. – 576 с.
2. Мефодьева М.П., Крот Н.Н. Соединения трансплутониевых элементов. – М.: Наука, 1987. – 302 с.

РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ПОЛУЧЕНИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ  
ХАЛЬКОГЕНОВ ИЗ ИХ ИЗОТОПНО-ОБОГАЩЕННЫХ ГЕКСАФТОРИДОВ

А.С. Зайцева, Е.А. Исаева, Д.Р. Итыгина, Н.В. Гусев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dri4@tpu.ru](mailto:dri4@tpu.ru)

В отделении ядерного топливного цикла инженерной школы ядерных технологий Томского политехнического университета на протяжении более 25 лет проводятся работы по усовершенствованию способов получения стабильных изотопов в виде различных веществ из изотопно-обогащенных центрифужным методом фторидов или металлоорганических соединений.

Для разделения изотопов серы, селена и теллура используются их газообразные фториды. Данные изотопно-обогащенные стабильные изотопы применяются в основном в элементном виде. Поэтому необходимо в качестве конечной формы химического передела получать такие вещества, которые имеют простую технологию получения, являются химически устойчивыми в обычных условиях, а также способны быть формами для получения других аллотропных модификаций и более сложных соединений. Предъявляемым требованиям в полной мере соответствуют гексагональные модификации селена ( $\gamma$ -Se) и теллура ( $\alpha$ -Te), а также орторомбическая модификация серы ( $\alpha$ -S).

Для конверсии  $SF_6$  в S возможно, использовать физические методы (микроволновое и плазмохимическое разложение), а также реакции восстановления металлами или их соединениями. Недостатком физических методов является сложность аппаратного оформления. При использовании для восстановления оксидов (CaO, MgO, PЗЭ<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или гидридов (CaH<sub>2</sub>) в процессе реакции образуются различные газообразные серо-содержащие продукты, для улавливания которых требуется дополнительные стадии их улавливания. Это приводит к увеличению количества стадий в технологической схеме и не позволяет исключить потери изотопно-обогащенной S.

В качестве восстановителя гексафторида серы нами был использован металлический литий. Основным преимуществом использования лития в качестве восстановителя является его относительно низкое давление паров и низкая растворимость образующегося в процессе реакции фторида лития в водных растворах. Для получения селена и теллура из их гексафторидов можно использовать реакцию восстановления их различными металлами. Недостатком известных способов является необходимость ведения процесса при высоких температурах, что усложняет аппаратное оформление, приводит к загрязнению восстановленных Se и Te металлом-восстановителем и продуктами коррозии материала реактора.

В наших работах для получения элементных Se и Te использовали реакцию восстановления  $SeF_6$  и  $TeF_6$  гидразин гидратом, которая характеризуется высокой скоростью образования и удовлетворительным выходом конечных продуктов.

Для финальной очистки от примесей, полученных по реакциям восстановления элементных S, Se и Te используется их дистилляция в вакууме. Полученные халькогены имеют химическую чистоту выше 99,9 %, а их выход составляет от 95 до 97 %.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ ИЗ ЖИДКОФАЗНОГО СЫРЬЯ

В.А.Казанцова, Ю.В. Передерин, И.О.Усольцева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vak74@tpu.ru](mailto:vak74@tpu.ru)

В настоящее время диоксид кремния применяется для изготовления стекла, керамики, бетонных изделий, в качестве наполнителя в производстве резин и кремнезёмистых огнеупоров [1]. В качестве источника оксида кремния может выступать переработанное жидкофазное сырьё (жидкое стекло), которое в больших количествах скапливается, как отход ряда промышленных предприятий, а, следовательно, значительными будут для развития экономики исследования различных методов переработки вышеупомянутого сырья [2]. Таким образом, была поставлена цель исследовать процесс переработки кремнийсодержащего жидкофазного сырья с целью получения диоксида кремния. Исследование проводилось методом осаждения, в качестве осадителя использовалась серная кислота (ГОСТ 2184-2013):



Осуществлялось перемешивание механической мешалкой с электроприводом сырья с добавлением серной кислоты. Проводилось измерение pH для контроля момента окончания процесса. Далее была проведена фильтрация. Твёрдая фаза после фильтрации была просушена при температуре 180 °С. Конечным продуктом является диоксид кремния (рис.1) с выходом 99,1 %. Методом РФА определили, что остаточной примесью является сульфат натрия.



Рис.1. Оксид кремния после сушки

Следующим этапом исследования является разработка способов управления процессом получения высококачественного диоксида кремния с развитой удельной поверхностью (более 200 м<sup>2</sup>/г).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по неорганическому синтезу: В 6-ти томах / Под ред. Г. Брауэр, Б.С. Захарова– М.: Мир, 1985. – 392 с.
2. Растворимое и жидкое стекло / Под ред. В. И. Корнеев, В. В. Данилов – Санкт-Петербург: Стройиздат – СПб., 1996. – 216 с.

## ВЫДЕЛЕНИЕ ТИТАНОВОГО ПОРОШКА ИЗ КАТОДНОГО ОСАДКА ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТИТАНА

Н.В. Карелина, А.В. Сазонов, В.А. Карелин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [nvkarelina@yandex.ru](mailto:nvkarelina@yandex.ru)

В процессе электролитического получения титана в расплаве фторидных солей образуется катодный осадок. Чтобы получить чистый титановый порошок его необходимо отделить от примесей катодного осадка. Для этого предложены два способа отмывки: растворение измельченного катодного осадка в неорганических кислотах с последующей фильтрацией, сушкой и упаковкой «кислотная отмывка»; отмывка катодного осадка безводным HF с последующей его регенерацией.

При проведении «кислотной отмывки» порошков титана от электролита установлено, что образующиеся суспензии практически не фильтруются, а при центрифугировании увеличивается трудоемкость отделения осадка от раствора и значительная часть осадка при его снятии с поверхности пробирки, в которой происходит центрифугирование, теряется. Поэтому, в основном, порошок и раствор разделяли методом декантации (отстаивания). В процессе отмывки катодного осадка безводным HF проведены исследования изменения массы катодного осадка в зависимости от температуры (рис. 1). Полученные результаты показывают, что при  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  уменьшение массы катодного осадка происходит за минимальное время – 20-22 мин. При увеличении температуры отмывки резко возрастает количество HF, находящегося в газовой фазе, и процесс отмывки становится неэффективным.

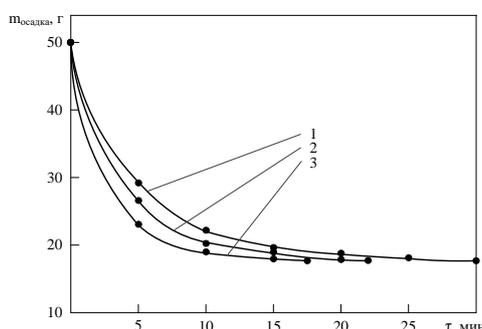


Рис. 1. Влияние температуры отмывки на изменение массы катодного осадка.

Температура процесса отмывки: 1 –  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Предлагаемая технология отмывки титанового порошка от катодного осадка с использованием безводного HF практически полностью исключает выбросы твердых, жидких и газообразных химически вредных веществ в окружающую среду. Основной реагент (безводный HF) может быть использован многократно за счет его рецикла в процессе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Karelin V.A., Strashko A.N., Sazonov A.V. Application of the Electrolysis for the Purposes of Receiving Titanium-based Powders from Fluoride Fusions // Procedia Chemistry. – 2014. – Vol. 11. P. 49-55.
2. Cardarelli F. “Materials Handbook. A Concise Desktop Reference.” 2nd edition. Springer, New York. – 2008. – P. 288-296.

**ФОРМИРОВАНИЕ ШВА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ АРГОДУГОВОЙ  
СВАРКЕ НА ВЕСУ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ**

П.П. Красиков, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин

Волгоградский Государственный Технический Университет,

Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, 400005

E-mail: [vkpp@yandex.ru](mailto:vkpp@yandex.ru)

Форма шва, выполненного с полным проплавлением кромок в соответствии со схемой статического равновесия, принятой в работах [1 – 3], определяется условием равновесия сил, действующих одновременно на ванну расплавленного металла (силы тяжести, давления дуги, и поверхностного натяжения). Изменение объема сварочной ванны, давления дуги, коэффициентов поверхностного натяжения [3] или радиусов кривизны свободных поверхностей расплавленного металла сварочной ванны, которое может быть вызвано самыми различными причинами, должно приводить к изменению основных размеров шва и, в частности, его провисанию (усилению или ослаблению) как со стороны дуги, так и со стороны корня.

В данной работе изучали влияние основных параметров режима автоматической аргодуговой сварки неплавящимся электродом на процесс формирования корневого шва на весу. Исследование проводили на пластинах из стали Ст3пс толщиной 3 мм. Параметры режима сварки: сварочный ток 150 – 220 А, скорость сварки 16 м/ч, длина дуги 2,0 мм. Применяли вольфрамовый электрод диаметром 4 мм с углом заточки 45°. Так же в цепь был подключен цифровой мультиметр OWON B35+, который снимал показания напряжения на дуге при различных сварочных токах.

Полученные данные показали, что зависимость ширины шва со стороны дуги от сварочного тока в основном довольно точно описывается уравнением распространения тепла описываемую с помощью линейного источника тепла, перемещающегося со скоростью по неограниченной пластине определенной толщины [4].

При сварке с флюс пастой наблюдается уменьшения ширины шва со стороны дуги В1 относительно сварки без нее во всем диапазоне токов примерно на 5 – 10%. Это, по-видимому, связано с изменением энергетических характеристик дуги (табл. 1) в частности ее длины за счет провисания расплавленной сварочной ванны под действием силы тяжести и веса ванны. Другая ситуация происходит со стороны обратного валика. Так при сварке без флюса пасты изменение ширины шва В2 обратного валика происходит более интенсивно, чем изменение ширины верхней поверхности. Характер же изменения ширины В2 с применением флюс пасты, говорит о том, что физико-химические процессы, происходящие при формировании обратного валика, идут с меньшей скоростью (более стабильно) тем самым гарантируя стабильность формирования обратного валика. Уменьшение ширины шва В2 обратного валика изменяется при силе тока 150А на 1,0 мм, а уже при силе тока в 200А на 3,0 мм при использовании флюс пасты на основе  $Y_2O_3$ . По ГОСТ 14771-76 при сварке без разделки одна из нормируемых величин это высота обратного валика  $g$  и она должна варьироваться в достаточно узком диапазоне от 0 до 1,0 мм. Так при сварке без флюса пасты максимальный ток, который позволяет, высоте обратного валика  $g$  быть в этом узком диапазоне составляет 160А, а с помощью флюс пасты на основе  $Y_2O_3$  эта величина составляет 210 – 220А.

Таб.1. Энергетические параметры дуги при сварке с флюс пастой и без нее

	Уд, В			q, Вт		
	150	180	200	150	180	200
Сила тока, А	150	180	200	150	180	200
Без флюс пасты	11,92	12,3	13,5	894	1107	1330
Флюс паста на основе Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,0	11,5	11,66	825	1035	1166

Из этого всего следует, что применение флюс пасты наносимую на обратную сторону стыка до сварки, позволяет увеличить диапазон регулирования сварочных токов для формирования качественного и стабильного обратного валика в 1,3-1,4 раза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тюльков М.Д. Влияние поверхностного натяжения на формирование корня стыковых швов при электродуговой сварке в защитных газах. – В сб. «Вопросы дуговой сварки в защитных газах». – М., ЦП НТО МАШПРОМ, 1957
2. Акулов А.И., Гусаков Г.Н. О формировании шва при автоматической аргонодуговой сварке на весу неплавящимся электродом. – М.: Сварочное производство, 1974, №3, с. 16 – 18.
3. Ерохин А.А., Ищенко Ю.С. О расчете размеров и веса ванны при сварке со сквозным проплавлением // Автоматическая сварка. – 1967. – № 2  
\*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-3502.2019.1)
4. Рыкалин Н.Н. Расчет тепловых процессов при сварке. – М.: Машиностроение. – 1968.  
\*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-3502.2019.1)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ КОРНЕВОГО СЛОЯ СВАРНЫХ ШВОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ТОЛСТОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

П.П. Красиков, А.В. Савинов, О.А. Полесский, А.А. Чудин

Волгоградский Государственный Технический Университет,

Россия, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, 400005

E-mail: [vkpp@yandex.ru](mailto:vkpp@yandex.ru)

Для многих конструкций по экономическим и эксплуатационным характеристикам наиболее выгодным, и, иногда, единственно возможным, является применение односторонней сварки соединений со свободным формированием корневого слоя шва (на весу). Такие соединения являются наименее трудоемкими и позволяют выполнять сварку односторонних сварных соединений большой толщины. Исследование причин дефектности таких соединений показывает, что основными проблемами являются поры, недопустимое отклонение размеров корневого слоя шва и, наиболее часто, непровар корня [1]. Установлено, что при сварке корневого слоя на его формирование существенное влияние оказывает силовое воздействие дуги, а при односторонней сварке корневых швов на весу данный параметр имеет определяющее значение. Так, чрезмерное силовое воздействие дуги может являться основной причиной образования прожогов, в то время как недостаточная его величина приводит к непроварам корня шва. Решение проблемы чрезмерного силового воздействия может основываться на двух подходах: применение конструкций неплавящихся электродов, обеспечивающих режим горения дуги с диффузионным катодным пятном и применение в качестве защитного газа гелия и его смесей с аргоном.

Сварку производили на образцах из стали 10ХСНД толщиной 10 мм с V – образной разделкой кромок. Зазор в стыке принимался постоянным и составлял 1,5 мм, а притупление кромок варьировалось в пределах 1,5 – 3 мм. Для обеспечения режима горения дуги с диффузным катодным пятном и близкого к равномерному распределению давления дуги применяли неплавящийся электрод с обратноконической заточкой рабочего участка диаметром 2 мм.

Результаты экспериментов свидетельствуют, что применение в качестве защитного газа гелия способствует улучшению формирования корневого слоя, снижая склонность к образованию прожогов. Однако исключить или свести к допустимому минимуму вероятность образования дефектов такая мера не позволяет. Анализ макроструктур получаемых сварных соединений показывает, что нормализовать формирование корневого слоя шва позволяет применение импульсно-дуговой сварки в гелии с применением электродов, обеспечивающих режим горения дуги с диффузным катодным пятном. Так при базовом значении тока  $I_b = 34$  А и токе в импульсе  $I_{имп} = 170$  А наблюдается полное проплавление притупления кромок равного 1,5 мм при удовлетворительном формировании обратной стороны шва. При этом площадь проплавления составила 41,4 мм<sup>2</sup>, высота обратного валика 1,5 мм. Кроме того, использование гелия в качестве защитного газа обуславливает качественное формирование лицевой стороны корневого слоя шва. Увеличение притупления кромок при неизменных параметрах режима сварки приводит к уменьшению высоты обратного валика. При этом его формирование не нарушается (шов имеет гладкую форму, отсутствуют подрезы на кромках разделки). Высота корневого слоя составила при притуплении 2 мм – 4,5 мм, а при притуплении 3 мм – 5,7 мм. Поддув аргона приводит к образованию чешуйчатости обратного валика и снижению его высоты. Кроме того, высотой обратного валика можно управлять за счет изменения скорости сварки и параметров импульсов тока.



Анализ полученных результатов показал, что применение аргона в качестве защитного газа приводит к существенным изменениям формирования корневого слоя сварного шва. Так при величине притупления 1,5 мм существенно осложняется обеспечение необходимого коэффициента наплавки при гарантированном проваре корня шва. При этом отмечается рост количества непроваров, а увеличение проплавляющей способности дуги за счет повышения тока не приводит к желаемому результату вследствие увеличения объема сварочной ванны и подтекания расплавленного металла под дугу. Применение в данном случае импульсных режимов сварки менее эффективно, чем при сварке в гелии и не приводит к существенным изменениям формирования сварного соединения.

Результаты экспериментов свидетельствуют, повышение стабильности и качества формирования корневых слоев сварных швов возможно путем применения конструкций неплавящихся электродов, обеспечивающих режим горения дуги с диффузионным катодным пятном, позволяющих увеличить глубину проплавления и производить сварку на повышенных значениях скорости и тока. Применение в качестве защитного газа гелия и его смесей с аргоном и использование импульсно-дуговой сварки дает возможность применять разделки кромок с большим притуплением и зазором, что, в свою очередь, увеличивает объем наплавленного металла и глубину проплавления с качественным формированием обратной стороны корневого слоя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов И. В. Формирование корневого слоя шва при односторонней сварке стальных конструкций. Дисс. канд. тех. наук. Тольятти, 2005. – 192 с.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках “Совета по грантам Президента РФ” (СП-3502.2019.1)

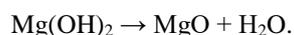
ПЕРЕРАБОТКА СЕРПЕНТИНИТСОДЕРЖАЩЕГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ:  
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Д.В. Краснощекова, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [whakaata666@ru](mailto:whakaata666@ru)

Серпентинит представляет собой горную породу, включающую в себя серпентин  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$  в качестве базового компонента, составляющего не менее 50 % от общего объема породы, а так же тальк  $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$ , пирротин FeS, энстатит  $MgSiO_3$ , фаялит  $(Fe_{0,94}Mg_{0,06})_2SiO_4$ , минералы с общей химической формулой  $Fe_xO_y$ , как правило, это магнетит  $Fe_3O_4$ , реже – гематит  $Fe_2O_3$  [1]. Серпентинит является дешевым сырьем для получения такого важного соединения, как оксид магния, который, в свою очередь, находит свое применение во многих отраслях, таких как производство огнеупорных материалов для стекольной, цементной, металлургической промышленности; для производства трансформаторных сталей, в нефте- и газодобывающей промышленности в качестве добавки в буровые растворы и во многих других отраслях [2].

Существует множество методов и технологий переработки серпентинита с целью выделения из него оксида магния. Представлены кислотные методы переработки, такие как серноокислый, азотноокислый и солянокислый методы, которые заключаются в кислотном выщелачивании сырья путем обработки кислотой, с последующей многостадийной обработкой образовавшегося раствора с целью осаждения из него гидроксида магния, который затем прокаливается до оксида:



Были рассмотрены менее известные методы, такие как спекание с сульфатом аммония и переработка солевых отходов. Суть метода спекания с сульфатом заключается в следующем: серпентинит сплавляют с сульфатом аммония, продукт сплавления выщелачивают водой, после чего из полученного раствора сульфата магния удаляют примеси, осадок отделяют фильтрацией, а из фильтрата осаждают гидроксид магния и карбонат магния для дальнейшего их прокаливания до оксида.

Был проведен эксперимент по переработке серпентинита серноокислым способом для получения оксида магния, включающий следующие этапы:

- механоактивация с уменьшением максимального размера частиц руды до 0,5 мм;
- сульфатизация;
- выделение  $MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2$  из продуктов сульфатизации методом дробного осаждения;
- прокаливание полученного осадка до оксида магния.

Был получен продукт с чистотой более 98 %. Чистота определена с помощью рентгенофазового анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Н.А. Серпентинит [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kaz2.docdat.com/docs/index-160070.html> – 2.09.19.
2. Пат. 2011638 РФ. МПК С 01 F 5/06. Способ получения оксида магния из серпентинита / Т.В. Кузнецова. Заявлено 08.06.1990; Оpubл. 30.04.1994, Бюл. №22. – 6 с.

**ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ АГО 2С ДЛЯ СИНТЕЗА  
ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИИ НА ОСНОВЕ ТИТАНА  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ - НАКОПИТЕЛЕЙ ВОДОРОДА**

Н.Е. Курдюмов, В.Н. Кудияров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [nek6@tpu.ru](mailto:nek6@tpu.ru)

В настоящее время проблемы водородной энергетики получили большую актуальность по причине глобального ухудшения экологического состояния планеты, а также истощения сырья и ресурсов. Многие развитые страны начинают использовать водород как основное направление энергетики будущего, т.к. водород является возобновляемым источником энергии и при его горении единственными продуктами оказываются тепло и вода.

На данный момент времени к методам хранения водорода относятся помещение его в газобаллонные системы, данный вид хранения имеет большие недостатки такие как малая плотность водорода при его хранении в газобаллонных системах что создает такие проблемы как: большой удельный вес и повышенное давление (до 30МПа) [1]. В жидком состоянии хранение водорода требует определенных условия такие как: применение эффективной теплоизоляции или термостабилизирование данного объема водорода. Третий способ хранения водорода — это его хранение в связанном состоянии в виде гидридов металлов, интерметаллических соединений (ИМС) или сплавов на их основе. Единое название таких материалов – сплав-накопитель водорода (СНВ).

Применение чистых металлов в качестве материалов-накопителей водорода непригодно по различным причинам. Например, ванадий, магний и титан, могут образовать с водородом гидриды, которые начинают диссоциировать только при высоких температурах, что является непригодным для применения на практике. Ванадий может поглощать и выделять водород при невысоких температурах, но его стоимость очень высока и его чаще используют для выборочной замены основных компонентов интерметаллического соединения [2-5]. Отличными свойствами для хранения водорода является большинство интерметаллических соединений на основе титана для которых характерна невысокая стоимость, так как в их составе содержатся относительно дешевые и распространенные металлы, такие как Fe, Co, Cr и др., что также является их большим преимуществом.

Большое внимание привлекают к себе сплавы на основе TiFe в работе [6] было показано, что при комнатной температуре ИМС может поглощать водород до 1,83 масс. %. Таким образом, основным преимуществом TiFe является мягкое условие взаимодействия с водородом, но его недостатком является трудная активация. Частичным замещением титана или железа другими элементами (V, Mn, Zr) и образованием нанокристаллических структур получается увеличивать сорбционные свойства сплавов. Однако, сорбционная емкость СНВ на основе TiFe все еще не высока и не превышает 2 масс. % [7-11].

В настоящей работе рассмотрено влияние параметров получения интерметаллических соединений на основе титана с помощью планетарной мельницы АГО-2С на их структуру и свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang F. et al. The survey of key technologies in hydrogen energy storage // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2016. – Т. 41. – №. 33. – С. 14535- 14552.
2. Schlapbach L., Züttel A. Hydrogen-storage materials for mobile applications // *Nature*. – 2001. – Vol. 414. – P. 353-358.
3. Yang J., Sudik A. et al. High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials discovery // *Chemical Society Reviews*. – 2010. – Is. 2. – P. 656-675.
4. Колачев Б. А., Шалин Р. Е., Ильин А. А. Сплавы-накопители водорода. Справочник. М.: Металлургия, 1995. – 384 с.
5. Карпов Д.А., Литуновский В.Н. Водородная энергетика: Хранение водорода в связанном состоянии. СПб. АО “НИИЭФА”, 2016. – 94 с.
6. Reilly J.J., Wiswall Jr R.H. Formation and properties of iron titanium hydride // *Inorganic Chemistry*. – 1974. – Vol. 13, № 1. – P. 218-222
7. Nagai H., Kitagaki K., Shoji K. Hydrogen storage characteristics of FeTi containing zirconium // *Transactions of the Japan Institute of Metals*. – 1988. – Vol. 29, № 6. – P. 494-501.
8. Guéguen A., Latroche M. Influence of the addition of vanadium on the hydrogenation properties of the compounds  $TiFe_{0.9}V_x$  and  $TiFe_{0.8}Mn_{0.1}V_x$  ( $x = 0, 0.05$  and  $0.1$ ) // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2011. – Vol. 509. – P. 5562-5566.
9. Hotta H., Abe M. et al. Synthesis of Ti–Fe alloys by mechanical alloying // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2007. – Vol. 439. – P. 221-226.
10. Abe M., Kuji T. Hydrogen absorption of TiFe alloy synthesized by ball milling and post-annealing // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2007. – Vol. 446-447. – P. 200-203.
11. Задорожный М.Ю., Калашкин С.Д. и др. Механохимический синтез нанокристаллического интерметаллического соединения TiFe и механическое легирование его третьим компонентом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2012. – № 9. – С. 30-35.

ПЕРЕРАБОТКА ОТХОДОВ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ

Д.И. Леонов, С.П. Журавков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Е-mail: [dil7@tpu.ru](mailto:dil7@tpu.ru)

За основной метод переработки отходов металлического алюминия был взят метод электроискрового диспергирования, который позволяет провести процесс создания композитных структур при участии атомов, образующихся в результате разложения молекул жидкости, в которой производится разряд, что приводит к образованию смеси металлической фазы алюминия, и оксидно-гидроксидных фаз [1,2]. Для электроискрового диспергирования гранул алюминия была использована экспериментальная установка, состоящая из источника импульсного напряжения и реактора с диэлектрическим корпусом, со встроенными алюминиевыми электродами. Амплитуда напряжения составляла 220 В, частота импульсов 50 имп/с. В качестве исходного сырья были взяты остатки жил алюминиевых электрических проводов с диаметром жилы 2–2,5 мм. Алюминиевые жилы были нарезаны на гранулы длиной 7–10 мм. В качестве рабочей непроводящей жидкости в ходе эксперимента использовали воду, очищенную осмосом. Для проведения эксперимента в реакторе стальные электроды были заменены на алюминиевые электроды. На начальной стадии дисперсная загрузка подверглась электроискровому диспергированию в реакторе, состоящем из керамического стакана и двух алюминиевых электродов. Продолжительность каждого эксперимента составляла 13 минут. После каждого диспергирования суспензию рабочей жидкости сливали в сосуд объемом 5 л, затем в реактор заливали следующую порцию рабочей жидкости для повторения процесса. В ходе процесса электроискрового диспергирования было получено 5 л суспензии, содержащей тонкодисперсный алюминий. Полученная в ходе эксперимента суспензия была отфильтрована на вакуумном фильтре. Для фильтрации были использованы бумажные фильтры «синяя лента», для того чтобы не допустить прохождение тонкодисперсных частиц оксидно-гидроксидных фаз алюминия через поры фильтра. Полученную в ходе фильтрации пульпу сушили в сушильном шкафу при температуре 120 °С в течение 30 минут. Были получены крупные куски (агломераты) оксидно-гидроксидных фаз алюминия. Полученные агломераты были измельчены в ступке до состояния порошка. Из данного порошка были взяты образцы для прокаливания при 400, 800, 1250 °С. При этом (согласно данным рентгенофазового анализа) были получены 3 модификации оксида алюминия:  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которые были исследованы методом БЭТ с целью определения величины удельной поверхности. Из полученных осадков путем термической обработки при определенной температуре получили соответствующие оксиды алюминия, которые могут быть востребованы как сорбенты и носители для катализаторов ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Al(OH)<sub>3</sub>), технический корунд ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), который может быть использован для абразивной обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яворовский Н.А. Модифицирование полимерных мембран нановолокнами оксигидроксида алюминия / Яворовский Н.А., Шиян Л.Н., Савельев Г.Г., Галанов А.И. // Нанотехника. –2008. – №3(15). – С.40-45.
2. Фоминский Л.П. Некоторые аспекты электроэрозионного способа получения окиси алюминия // Электронная обработка материалов. 1980. –№1. – С.46-49.

## ГИДРОФТОРИРОВАНИЕ ФОСФАТОВ РЕДОКЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.А. Лисица, А.С. Буйновский, А.В. Муслимова, Т.В. Смолкина

Северский технологический институт - филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

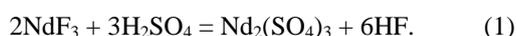
Россия, г. Северск, пр. Коммунистический, д.65, 636036

E-mail: [43number@gmail.com](mailto:43number@gmail.com)

Монацит – минерал, относящийся к классу фосфатов лантаноидов, может содержать более 50 % редкоземельных элементов (РЗЭ) в расчёте на оксиды, до 10 % ThO<sub>2</sub>, до 1 % U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>, из-за содержания тория и урана радиоактивен. Исходя из этого монацит может рассматриваться как ценный источник тория и РЗЭ. Существует два основных способа переработки монацита, щелочной и сернокислотный. Суть щелочного заключается во взаимодействии монацита с растворами гидроксида натрия получением гидроксидов РЗЭ и тория в виде осадка и раствора натрий-фосфата. Сернокислотный способ заключается во взаимодействии фосфатов РЗЭ с серной кислотой с образованием растворимых сульфатов РЗЭ. Данные способы имеют ряд недостатков, таких как большой расход реагентов и большой объём водных отходов. Поэтому было предложено использование фторирующих агентов для удаления кремний-составляющей концентрата, снижения расхода реагентов, уменьшения объёма радиоактивных отходов.

Использование непосредственно фтора и фтороводорода связано с экологической опасностью, а также трудностью их регенерации, поэтому в последнее время рекомендуют их заменять фторирующими агентами такими, как фторид аммония, бифторид аммония (БФА) и фторсодержащие соли. Например, в источнике [1] рассмотрено разложение различного сырья фторидом аммония в жидком фтороводороде при мольном соотношении NH<sub>4</sub>F: HF, равном 1:(1-5), при 150 °С. При этом время реагирования составляет всего от 5 секунд до 5 минут. Сказано, что минералы циркония образуют фтораммонийные комплексы состава (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>ZrF<sub>7</sub>, тантала – (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>TaF<sub>7</sub>, титана – (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub>. Данные комплексы разрушаются при температуре более 300 °С с образованием соответствующих фторидов. При этом так же происходит возгонка образовавшегося (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. Процесс проводят в ротационной трёхзонной печи.

В соответствии с термодинамическими расчётами (таблица 1), гидрофторирование фосфатных компонентов монацита наиболее вероятно с образованием фосфата аммония и ортофосфорной кислоты, либо ортофосфорной кислоты и фторида аммония, а выделение фтороводорода маловероятно. Перевод фторидов в сульфаты для реакции (1) становится возможным при температурах более 85-155 °С:



Из-за многокомпонентности состава монацитового концентрата выявление особенностей его гидрофторирования затруднено, поэтому первоначально исследование было решено провести на примере синтезированных фосфатов РЗЭ лёгкой группы.

При использовании в качестве исходных реагентов оксидов РЗЭ возникают ряд проблем, связанных с усреднением шихты, что при спекании отрицательно сказывается на выходе фосфатов РЗЭ. Наиболее явно это проявляется при использовании оксида неодима вследствие его неудовлетворительной текучести. В этой связи синтез удобнее вести с использованием соответствующих солей РЗЭ, чаще всего нитратов или хлоридов. В качестве второго компонента шихты рекомендуют использовать ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> [2], реже NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> [3]. Наиболее известные методы синтеза - это твердофазное спекание [4] и золь-гель методы

[5,6]. В последнее время значительное внимание уделяют применению механоактивации [2,7], позволяющей повысить выход продукта и снизить температуру синтеза.

Таб.1. Результаты термодинамических расчётов взаимодействия фосфатов РЗЭ с БФА

№	Реакция	$\Delta H_{298}^0$ , кДж	$\Delta G_{298}^0$ , кДж	$\Delta G_{373}$ , кДж
1	$\text{NdPO}_4 + 3\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF} = \text{NdF}_3 + (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 + 3\text{HF}$	129,6	38,8	36,6
2	$2\text{NdPO}_4 + 3\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF} = 2\text{NdF}_3 + (\text{NH}_4)_3\text{PO}_4 + \text{H}_3\text{PO}_4$	-113,6	-85,8	-79,1
3	$\text{NdPO}_4 + 3\text{NH}_4\text{F} \cdot \text{HF} = \text{NdF}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + 3\text{NH}_4\text{F}$	-57,1	-54,9	-56,6

На основании этих данных были проведены исследования по синтезу фосфатов лантана и неодима моноклинной сингонии по методике, включающей и механоактивацию, и спекание. На рисунке 1 приведена рентгенограмма полученного образца фосфата неодима, а также продукта его взаимодействия с бифторидом аммония при 220 °С. Видно, что основными продуктами реакции являются фторид неодима и дифторфосфат аммония.

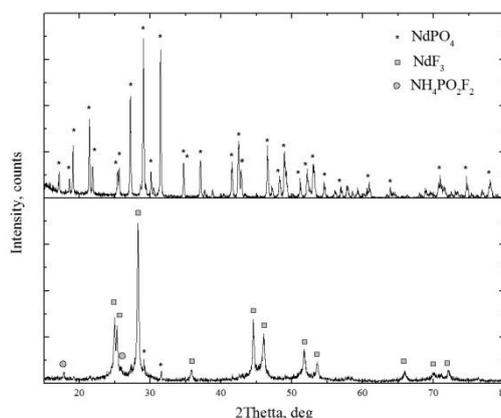


Рис. 1. Дифрактограмма синтезированного неодима и продукта его реакции с БФА

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. З.И. 2012127212 РФ. МПК С22В 3/10. Способ обработки минералов / В.Л. Ретиф. Заявлено 09.09.2010; Опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.
2. Onoda H., et al. Mechanochemical effects on synthesis of Rhabdophane-type neodymium and cerium phosphates. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2002. – Т.78. – С. 400–404.
3. Савостьянов А.Н. Разработка и исследование пленочного литиевого аккумулятора: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2014. – 135 с.
4. Брауэр Г. Руководство по неорганическому синтезу. – М.: Мир, 1985. Т.4 – 1203-1204 с.
5. Скогарева Л.С. и др. Синтез ортофосфатов церия со структурой монацита и рабдофана из фосфорнокислых растворов в присутствии пероксида водорода. // *Журнал неорганической химии*. – 2016. – Т.61. – №10. – С. 1276–1281.
6. Скогарева Л.С. и др. Селективное осаждение ортофосфатов редкоземельных элементов пероксидом водорода из фосфорнокислых растворов. // *Журнал неорганической химии*. – 2017. – Т.62. – №9. – С. 1145–1151.
7. Sadykov V.A., et al. Synthesis of high-surface-area complex zirconium phosphates via mechanochemical activation route. // *Mat Res Innovat*. – 1999. – №2. – С. 328–337.

ПОДБОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАДИОЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА  
ОПТИЧЕСКИ-ЭМИССИОННОГО СПЕКТРОМЕТРА ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА  
GD-PROFILER 2

ДЛЯ АНАЛИЗА ТОНКИХ ПЛЕНОК

А.Д. Ломыгин, Р.С. Лаптев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [lomyginanton141@gmail.com](mailto:lomyginanton141@gmail.com)

В современном мире тонкие пленки и покрытия хорошо зарекомендовали себя в таких областях техники как микроэлектроника, оптика, защитные покрытия от различных воздействий на материалы. Физические свойства тонких покрытий зависят от таких характеристик как, химический состав и структура. Контролируя один из выше перечисленных характеристик, можно наблюдать за состоянием конструкционного материала. Один из методов позволяющий контролировать химический состав тонких пленок, конструкционных материалов является оптическая эмиссионная спектрометрия тлеющего разряда (ОЭС-ТР). Данный метод очень чувствителен к множеству химических элементов, а также есть возможность как качественного, так и количественного анализа химического состава материала. Для исследования влияния режимов распыления ОЭС-ТР использовались две системы нанокompозитных покрытий TiSiC и Zr/Nb, с толщиной индивидуальных слоев 15 и 25 нм, соответственно. В работе использовался оптически-эмиссионный спектрометр GD-Profiler 2 [1].

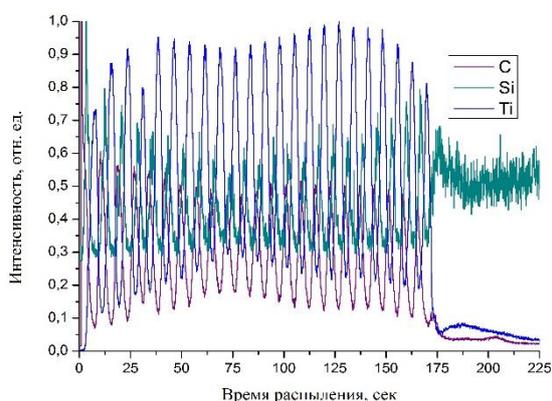


Рис. 1. Зависимость интенсивности сечения элементов от глубины распыления для наноразмерных 15 нм слоев Ti, Si и C на кремниевой подложке.

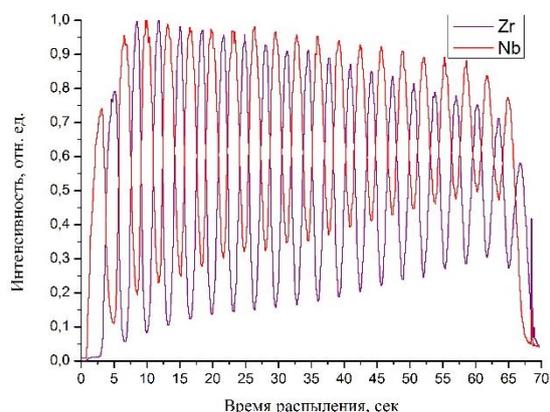


Рис. 2. Зависимость интенсивности сечения элементов от глубины распыления для наноразмерных металлических 25 нм слоев Zr и Nb на стеклянной подложке

В результате проделанной работы была разработана методика импульсного режима работы ОЭС-ТР, которая позволяет распылять как токопроводящие, так и не токопроводящие материалы с различной скоростью эрозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нехин М., Кузнецов А., Шапон П. Спектрометр тлеющего разряда PROFILER-2-мощный аналитический инструмент послойного анализа материалов //Аналитика. – 2012. – Т. 5. – №. 4. – С. 34-43.



## ИЗУЧЕНИЕ РЕАКЦИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ KBrF<sub>4</sub> С МЕТАЛЛАМИ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

А.В. Малин, Р.В. Оствальд

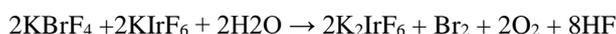
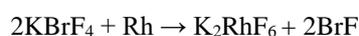
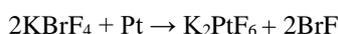
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [avmalin.work@gmail.com](mailto:avmalin.work@gmail.com)

Одной из перспективных технологий переработки техногенных отходов является применение галогенфторидов, и тетрафтороброматов щелочных металлов как их производные [1]–[3]. Целью работы является описание взаимодействия KBrF<sub>4</sub> с платиновыми металлами и гидролиза полученных продуктов.

Реакции проводились в герметичных никелевых ампулах в инертной атмосфере с нагревом ампул до 400 °С. Предварительно ампулы прошли процесс пассивации в потоке смеси фтора с аргоном, для того чтобы предупредить влияние материала ампулы на реакции с платиновыми металлами. Реакции взаимодействия тетрафторобромата калия с платиновыми металлами можно описать следующими реакциями:



Полученные продукты были проверены с помощью рентгенофазового анализа. При фторировании рутения была получена смесь фторплатинатов калия в различных степенях окисления. Для рутения массовое соотношение состава смеси было определено, как K<sub>2</sub>RuF<sub>6</sub>: KRuF<sub>6</sub>: KBrF<sub>4</sub> = 65.7(7):21.1(9):13.2(6).

В случае фторирования палладия, рентгено-фазовый анализ показал структуру отличную от опубликованной ранее [4]. Решение кристаллической структуры подтвердило синтез нами дополнительной модификации β-K<sub>2</sub>PdF<sub>6</sub>. Подобный результат был получен и Хоуппом и Клеммом, однако они не исследовали кристаллическую структуру соединения [5]. К тому же, Бартлетт указывает о наличии двух форм K<sub>2</sub>PdF<sub>6</sub> после испарения безводного HF из растворов содержащих K<sub>2</sub>PdF<sub>6</sub> и O<sub>2</sub>AsF<sub>6</sub> [6]. Однако авторы также не изучали кристаллическую структуру гексафторпалладата калия (IV). Очевидно о существовании нескольких модификаций K<sub>2</sub>PdF<sub>6</sub>, мы впервые сообщаем о гексагональной структуре вещества.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. N. Mitkin, S. B. Zayakina, V. G. Tsimbalist, и A. A. Galizky, «Application of potassium tetrafluorobromate to the rapid decomposition and determination of noble metals in chromites and related materials», Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc., т. 58, сс. 297–310, 2003.
2. S. Ivlev, P. Woidy, F. Kraus, I. Gerin, и R. Ostvald, «Tetrafluorobromates for Urban Mining of Noble Metals: A Case Study on Iridium Metal», Eur. J. Inorg. Chem., 2013.
3. V. N. Mit'kin, «Fluorine Oxidants in the Analytical Chemistry of Noble Metals», т. 56, с. 23, 2001.
4. N. Bartlett и J. W. Quail, The preparation of palladium difluoride and complex fluorides of palladium in selenium tetrafluoride, J. Chem. Soc. Resumed, с. 3728, 1961.
5. Hoppe Über Fluorokomplexe des Palladiums und des Goldes - Электронный ресурс: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/zaac.19522680415>. [Просмотрено: 01.09.2019].
6. G. M. Lucier, C. Shen, S. H. Elder, и N. Bartlett, Facile Routes to NiF<sub>6</sub><sup>2-</sup>, AgF<sub>4</sub><sup>-</sup>, AuF<sub>6</sub><sup>-</sup>, and PtF<sub>6</sub><sup>-</sup> Salts Using O<sub>2</sub><sup>+</sup> as a Source of O<sub>2</sub>F in Anhydrous HF, Inorg. Chem., т. 37, сс. 3829–3834, 1998.

ПЕРЕРАБОТКА БЕРИЛЛОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГИДРОФТОРИДА АММОНИЯ

Л.Н. Малютин, А.Н. Дьяченко, А.Д. Киселев, Р.И. Крайденко

ООО «Институт Легких Материалов и Технологий»,

Россия, г. Москва, Ленинский пр., 6, ст. 21, 119049

E-mail: [lev.malyutin@rusal.com](mailto:lev.malyutin@rusal.com)

На сегодняшний день основным направлением применения бериллия является получение специальных сплавов на основе меди и алюминия, массовая доля бериллия в которых колеблется от десятых долей процента до десятков процентов. Данные материалы применяют преимущественно в атомной и оборонной промышленности, в авиа- и ракетостроении. Исторически основным минералом, используемым в промышленности для производства бериллия и его соединения, является берилл ( $Al_2[Be_3(Si_6O_{18})]$ ). В настоящее время на территории РФ полностью остановлены работы по добыче берилловой руды и производству берилловых концентратов. Перспективным сырьем для производства бериллиевой продукции является концентрат, поставляемый из Африки (Руанда) (таблица 1).

Таб.1. Химический состав бериллового концентрата (Руанда), % масс.

BeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>	ZnO
12,00	67,05	15,49	2,91	1,40	0,86	0,23	0,02	0,02	0,02

Для получения соединений бериллия из указанного концентрата на данный момент мировой промышленностью эксплуатируется единственный метод гидрометаллургической переработки – сернокислотный способ. По указанному методу берилловый концентрат подвергают сульфатизации концентрированной серной кислотой при 280-300 °С. Существенным недостатком данного способа является необходимость термической (1700 °С) и химической (при добавлении CaCO<sub>3</sub> или Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) активации концентрата для осуществления возможности дальнейшего сернокислотного вскрытия упорного минерала берилла. Помимо этого, введение щелочных агентов на стадии активации приводит к повышению расхода серной кислоты для их нейтрализации [1]. Единственным продуктом переработки бериллового концентрата по классической сернокислотной схеме является гидроксид бериллия. Основная составляющая концентрата – кремнезем, полностью вместе с остальными примесями направляется на шламохранилище. Кроме того, сернокислотный способ переработки не предполагает регенерации выщелачивающего реагента, безвозвратно расходуемого на взаимодействие как непосредственно с бериллием, так и со всеми металлическими примесями [2].

Альтернативным методом переработки бериллового концентрата является фтороаммонийный способ, заключающийся во взаимодействии компонентов концентрата с гидрофторидом аммония (NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub>), находящегося в расплавленном состоянии (t<sub>пл</sub> = 126 °С). Реализация процесса гидрофторирования в расплаве NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub> позволяет исключить энергоемкую стадию предварительной термической и химической активации концентрата перед гидрометаллургической переработкой. Процесс осуществляют при 180-210 °С, взаимодействие фторирующего агента с основными компонентами концентрата описывается следующими уравнениями реакций:





Фторированный продукт направляют на стадию сублимационной очистки от кремния при 320-350 °С [3]. Кремний в виде гексафторосиликата аммония ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) возгоняется и направляется в специальные колонные водоохлаждаемые аппараты для десублимации при 40-50 °С. Десублимированное соединение представляет собой товарный продукт, применяемый для дезинфекции, в изготовлении и травлении стекол, металлургии, гальваностегии, защитной пропитки древесины, в лабораторной практике и сельском хозяйстве.

Остаток после сублимационной очистки представляет собой смесь фтороаммонийных комплексов металлов, которую направляют на стадию водного выщелачивания при 20-25 °С. В пульпу во время выщелачивания добавляют NH<sub>4</sub>HF<sub>2</sub> до установления мольного соотношения Be:F = 1:(4,5-4,7). Также в пульпу добавляют соду до установления соотношения 0,10 моль соды на 1 моль бериллия. Добавление соды и гидрофторида аммония необходимо для подавления растворимости фторсодержащих комплексных солей примесных металлов. В раствор полностью переходит лишь хорошо растворимая соль бериллия – тетрафторобериллат аммония ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>) (растворимость составляет – 323 г/л воды) [4]. Пульпу после выщелачивания фильтруют, осветленный фильтрат направляют на дополнительную стадию очистки. Нерастворимый остаток, состоящий из смеси комплексных фторсодержащих соединений алюминия, кальция и натрия, представляет интерес как потенциальный источник фтора и может быть использован для сернокислотного получения фторида водорода.

Фильтрат направляют на дополнительную сорбционную очистку на активированном угле. Очищенный раствор тетрафторобериллата аммония далее упаривают, кристаллы (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub>, в свою очередь, направляют на термическую диссоциацию для получения фторида бериллия (BeF<sub>2</sub>) – основного соединения для получения металлического бериллия и алюмобериллиевых сплавов. В результате термической диссоциации (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub> образуются фторид водорода и аммиак, которые улавливают в скрубберах для получения раствора фторида аммония. В результате упаривания данного раствора получают технический гидрофторид аммония, который направляют в начало процесса для гидрофторирования бериллового концентрата.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химия и технология редких и рассеянных элементов, ч.1.: учебное пособие для вузов. Изд.2-е, перераб. и доп./ под ред. К.А.Большакова. – М.: «Высшая школа», 1976. – С. 192-221.
2. Бериллий. Наука и технология/ Пер. с англ. под ред. А.И. Тихинского и И.И. Папинова – М.: Металлургия, 1984. – С. 240–245.
3. Борисов В.А., Дьяченко А.Н., Кантаев А.С. Определение оптимальных параметров сублимационной очистки гексафторосиликата аммония от примесей // Известия Томского политехнического университета. Химия. – 2010. – Т. 317. – № 3. – С. 73-76.
4. Dyachenko A.N., Kraydenko R.I., Malyutin L.N., Petlin I.V. The Research of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>BeF<sub>4</sub> Solution Purification Effectiveness // Procedia Engineering. – 2016. – V. 152 – P. 51-58.

**СИНТЕЗ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ  
МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ**

Ю.Р. Мингазова, Е.П. Седанова

Национальный исследовательский Томский Политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [yula.mingazova@mail.ru](mailto:yula.mingazova@mail.ru)

Обеспечение безопасной эксплуатации ядерных энергетических установок является приоритетной задачей атомной отрасли. В значительной степени безопасность установки в ходе эксплуатации определяет поведение материалов, из которых она изготовлена. Установки и конструкции на объектах атомной отрасли работают при высокой температуре в поле нейтронов,  $\gamma$ -квантов и осколков деления. Поиск современных материалов, отвечающим требованиям атомной отрасли является актуальной задачей, решение которой приведет к дальнейшему развитию атомной отрасли.

Материалам на основе карбида кремния посвящен ряд исследований, рассматривающих их свойства с целью дальнейшего применения данных материалов в различных областях промышленности. Карбид кремния обладает рядом свойств, позволяющих обеспечивать стабильную работу выполненного из него оборудования в условиях агрессивных сред, высоких температур, механических нагрузок и радиации [1]. Применение данного материала в атомной отрасли позволит обеспечить безопасную эксплуатацию ядерных установок.

Целью данной работы являлось синтезирование керамических композитов на основе карбида кремния путем искрового плазменного спекания (ИПС) исходного материала в среде вакуума. В качестве исходного материала была использована прекерамическая бумага – композиционный материал, представляющий собой матрицу из органических волокон целлюлозы и неорганического порошкового наполнителя, в качестве которого выступает порошок карбида кремния [2].

Образцы керамики, спеченные при температуре 2100°C и давлении 40 МПа и 50 МПа в течение 10 минут, были исследованы методом электронной микроскопии, проанализировано влияние давления спекания на фазовый и элементный составы, плотность материалов.

Результаты исследований демонстрируют, что при спекании прекерамических бумаг методом ИПС возможно получение плотных керамических материалов за короткий промежуток времени. Продолжение исследований в данном направлении позволит в дальнейшем синтезировать керамические материалы, свойства которых будут отвечать требованиям атомной отрасли. Предполагается, что применение прекерамических бумаг в качестве исходного материала позволит получать материалы заданных форм и геометрии, а их состав и свойства будут определять тип и концентрация наполнителя.

\*Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-19-00192).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Модин С.Ю. Керамический материал на основе карбида кремния, модифицированный бором/ С.Ю.Модин [и др.]// Успехи в химии и химической технологии. – 2017. – Т. 16, №3. – С. 72-74.
2. Travitzky N. // Preceramic Paper-Derived Ceramics. J. Am. Cer. Soc. The American Ceramic Society. 2008. 91[11]. pp 3477-3492.

## ИННОВАЦИОННЫЙ МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Ю.А. Новиченко, Л.А. Леонова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30,634050

E-mail: [novichenko\\_98@mail.ru](mailto:novichenko_98@mail.ru)

Создатели современных инновационных материалов ставят перед собой главную цель, заключающуюся в рациональном использовании ресурсов природы с возможностью удовлетворения требуемых потребностей человека.

Таким материалом является биогенный источник кальция – гидроксипатит. ГА –  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  представляет собой кристаллохимический аналог минерального компонента костной ткани, наличие которого способствует естественному метаболизму кальция в организме [1].

Гидроксипатит в сравнении с другими ортофосфатами кальция обладает биосовместимостью, наибольшей устойчивостью и наименьшей растворимостью. В процессе создания функциональных материалов ГА может являться базой для размещения на его поверхности наночастиц металлов и полупроводников. Встраивание серебра в структуру гидроксипатита повышает его антибактериальные свойства. Стронций-замещенный гидроксипатит, имплантированный в кость, приводит к полному замещению костного дефекта, ускоряет темпы образования тканевых элементов кости. Также гидроксипатит может использоваться в качестве неорганического сорбента для извлечения или связывания радионуклидов. [2].

Сегодня в качестве сырья для получения гидроксипатита используются: кораллы, кости животных и минералы. Со временем коралловые полипы и горные породы иссякают, поэтому альтернативным источником для создания новых материалов является яичная скорлупа, так как это пищевые отходы. Целью работы является поиск оптимального соотношения компонентов при синтезе гидроксипатита с использованием биогенного источника кальция – скорлупы домашней птицы.

Порошки гидроксипатита с молярным отношением кальция к фосфору 1,67 получены из яичной скорлупы и ортофосфорной кислоты [3].

Методами инфракрасной спектроскопии с Фурье-преобразованием, рентгено-флюоресцентного, атомно-эмиссионного анализов происходит идентификация полученных порошков. Дальнейшая работа сфокусирована на совершенствовании технологии: частичной замене структурных компонентов гидроксипатита – Са на другие элементы, такие как серебро или стронций, для придания материалу особых свойств.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsumoto T., Tamine K., et al. // J. Ceramic Society of Japan. 2006. № 114. P.760-762.
2. Хрестенко Р.В., Рудин В.Н., Калмыков С.Н., Мелихов И.В. Взаимодействие наногидроксипатита кальция с уранил-ионом // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2008. – № 5. – С. 52–57.
3. Vikramjit S., Neeraj M.// International Journal of Science and Engineering Investigations.2012. Т.1. №3. С.92-94.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ОКСИДА МАГНИЯ  
ИЗ ХРОМСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

Ю.Л. Орешкина, Ю.В. Передерин, И.О. Усольцева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ylo1@tpu.ru](mailto:ylo1@tpu.ru)

Исследован процесс получения оксида магния из хромсодержащего сырья одного из месторождений Казахстана.

В данном исследовании была проведена переработка сырья: размер частиц исходной руды был взят до 20 мм, после проведения механоактивации размер частиц изменился до 0,5 мм. Далее руда подвергалась «мокрой» магнитной сепарации. Следующей стадией является выщелачивание серной кислотой (ГОСТ 2184-2013) при разных концентрациях немагнитной фракции с нагревом и без. Стадия проводилась при интенсивном механическом перемешивании (5 об/сек) [1]. Проводилась первичная фильтрация, наблюдалось выпадение пульпы. В твердом осадке находится соединение хрома. В процессе проведения дробного осаждения был получен целевой продукт с чистотой 99,5%.

В процессе получения оксида магния наблюдались различные осадки по физическим свойствам, которые представлены на рисунке 1.

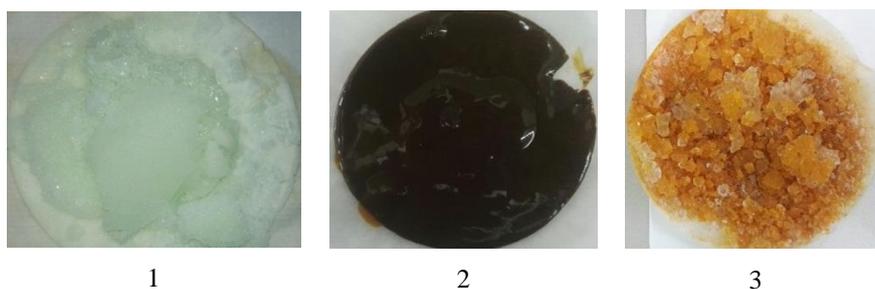


Рис. 1. Осадки после фильтрации:

1 – порошкообразный осадок после первой фильтрации; 2 – гелеобразный осадок после второй фильтрации; 3 – кристаллический осадок после третьей фильтрации

Оставшийся раствор смешивали с содой (ГОСТ 5100-85) до полного осаждения. Реакционную массу фильтровали, осадок сушили при температуре 180 °С. В ходе химических превращений и технологических операций был получен оксид магния с чистотой 98,2 %. Чистоту определяли методом рентгенофазового анализа.

Дальнейшим направлением исследований является получение высокочистого (>99,0 %) оксида магния и концентрата соединения хрома после первичной фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стрелец Х.Л. Электролитическое получение магния / Х.Л. Стрелец. – М.: Металлургия, 2001. – 336 с.

## НАНОДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ ЖЕЛЕЗА В КАЧЕСТВЕ КАТАЛИЗАТОРОВ СИНТЕЗА УГЛЕВОДОРОДОВ

В.А. Пивовар, Е.В. Попок, С.П. Журавков

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,

634050, Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30,

E-mail: [pivovarv@tobolsk.sibur.ru](mailto:pivovarv@tobolsk.sibur.ru)

Известно, что внедрение нанотехнологий и использование технических продуктов, полученных с их помощью в полезных практических применениях относятся в России к числу приоритетных направлений развития технологий, техники и науки.

В настоящее время актуальность использования синтеза Фишера-Тропша (СФТ) в промышленности в России, прежде всего, обусловлена утилизацией попутных нефтяных газов месторождений, находящихся на удалении от газоперерабатывающих заводов. Сжигание попутного газа на факелах приводит не только к значительным выбросам углекислого газа в атмосферу, но и потерям ценного углеводородного сырья.

В данной работе исследуется влияние параметров синтеза на активность железного катализатора СФТ, полученного методом электрического взрыва проводника в среде окиси углерода, зарядное напряжение менялось в интервале 18-32 кВ, индуктивность разрядного контура составляла 0,75 мкГн. Использовался железный проводник диаметром 0,35 мм [1]. Данная технология позволяет синтезировать нанодисперсные частицы с большой удельной поверхностью и заданного фазового состава.

Образцы катализатора подвергались исследованиям на каталитической установке, работающей при повышенном давлении [2]. Катализатор не подвергался предварительному восстановлению, изначально реактор с загруженным в него образцом прогревался в токе азота до температуры реакции, после чего в реакционную зону подавалась смесь СО и Н<sub>2</sub>. Для проведения эксперимента были выбраны соотношение реагентов СО:Н<sub>2</sub>=1:2; 1:1,5; 1:1. Расходы СО и Н<sub>2</sub> для эксперимента составлял 150 мл/мин.

Результаты проведенных исследования показывают достаточно высокую каталитическую активность данных катализаторов в процессе синтеза жидких углеводородов по методу ФТ, однако для достижения высоких степеней конверсии СО необходимо увеличение температуры и соотношения реагентов. Полученные жидкие продукты содержат значительное количество ароматических и парафиновых углеводородов, что делает их пригодными для дальнейшей переработки с целью получения высококачественных моторных топлив.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрический взрыв железных проводников в атмосфере воздуха, Ar, СО и СО<sub>2</sub>/ А.В. Пустовалов, С.П. Журавков // Современные техника и технологии. Тр. XVII междунар. научно-практ. конф. студентов и молодых ученых. – Россия. – Томск. – 18-22 апреля 2011. – Т.3. – С. 433-434.
2. Popok E.V., Levashova A.I., Burlutsky N.P., Khudyakov D.V., Zhuravkov S.P. Ultradispersed electro-explosive iron powders as catalysts for synthesis of liquid hydrocarbons of CO and H<sub>2</sub> // Procedia Chemistry. – 2015 – Vol. 15. – p. 225–230.

## ПОЛУЧЕНИЕ ОСОБО ЧИСТЫХ ФТОРИДОВ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

И.И. Рудых, Ф.А. Ворошилов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [iir4@tpu.ru](mailto:iir4@tpu.ru)

В настоящее время возрастает интерес к получению особо чистых кристаллов фтористых соединений, используемых в качестве оптических сред. Данные среды находят применение в создании оптических приборов с качественно новыми характеристиками. Фториды редкоземельных элементов с минимальным содержанием кислорода пригодны для изготовления оптических деталей, работающих в инфракрасном диапазоне, а также в качестве элементной базы проходной и волоконной оптики [1].

Исходным материалом для получения бескислородных фторидов являются оксиды соответствующих металлов, полученные термическим разложением карбонатов, гидроксидов и оксалатов. Преобразование можно осуществлять двумя способами: прямым фторированием элементарным фтором, газообразным фтороводородом, фторидом и бифторидом аммония, либо обработкой раствором плавиковой кислоты. Вне зависимости от способа в конечном продукте всегда присутствуют остаточные оксиды и оксофториды, количество которых зависит от условий процесса. Их наличие в значительной степени уменьшает качество кристаллов. Поэтому весьма остро встает вопрос снижения количества кислорода. Допустимое содержание кислорода в кристаллах, пригодных для волоконной оптики, не должно превышать 100 ppm.

### Выполнение работы.

В данной работе рассмотрен метод очистки фторида тербия с помощью различных фторирующих агентов. Для проведения экспериментов был использован TbF<sub>3</sub> квалификации «осч», где содержание кислорода составило – 312 ppm. Была спроектирована и изготовлена 4-х зонная печь нагрева периодического действия с загрузкой и выгрузкой продукта в «сухой бокс». Для создания реакторного пространства использовалась никелевая труба. В качестве фторирующего агента были выбраны газообразный фтор и безводный фтористый водород. Для оценки влияния фтора на снижение количества кислорода был выбран температурный диапазон от 300 до 500 °С, а для газообразного HF – от 600 до 1000 °С. Длительность опытов составляла от 2 до 8 часов. В реактор с контролируемой атмосферой в тиглях-лодочках, изготовленных из ядерно-чистого графита, загружалось фторсодержащее сырье. После чего был осуществлен нагрев сырья до заданной температуры в потоке фторирующего агента и его выдержка. По окончании опыта продукт был проанализирован на содержание кислорода. Проведенные эксперименты показали, что в среде фтористого водорода очистка идет лучше, чем в атмосфере элементарного фтора.

При проведении опытов приобретены практические навыки, позволяющие обрабатывать по данному способу фториды других редкоземельных металлов. Например, при очистке фторида церия удалось достичь минимального содержания кислорода 18 ppm. Все это послужит основой для проектирования лабораторной установки, работающей в непрерывном режиме.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Максаков Б.И. Исследования в области выращивания оптических кристаллов фтористых соединений // Известия академии наук СССР. – 1967. – Т. XXXI. – № 5. – С. 864-865.



## ОЧИСТКА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ ФТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНЕРАЛОВ

А.Ю. Рыбаченко, Ю.Р. Мухортова, Д.В. Мартемьянов, С. П. Журавков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

[anjela-ya2013@yandex.ru](mailto:anjela-ya2013@yandex.ru)

Загрязнение водной оболочки Земли в настоящее время приобрело угрожающие масштабы. Химические примеси считаются самыми опасными видами загрязнителей воды, и фтор среди них стоит особняком. Фтор жизненно необходим для организма человека, однако при повышенных концентрациях он опасен для здоровья, поэтому следует очищать питьевую воду от фторид-ионов до уровня ПДК [1]. Сорбция, как метод очистки воды от химических загрязнителей имеет ряд преимуществ [2]. Для извлечения вредных примесей из воды в современной водоочистке широко используются различные минералы. В данной работе объектами исследования являются следующие минералы: пирит ( $\text{FeS}_2$ ) Калатинского месторождения; магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) месторождения Куржункуль; цеолит (гидратированный алюмосиликат щелочных элементов) Хотынецкого месторождения; полыгорскит ( $\text{MgAl}_2[\text{Si}_4\text{O}_{11}][\text{OH}]_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) Палыгорского месторождения; аргиллит (в своем составе содержит примеси глины, песка, кварца) Ново-Сухоложского месторождения. Исследования выполнялись на образцах минералов с размером частиц не более 0,1 мм. У выбранных образцов измеряли величины удельной поверхности и удельного объема пор при помощи метода БЭТ. Кроме того, проводились сорбционные исследования по извлечению ионов фтора из модельного раствора, который готовился на водопроводной воде с применением  $\text{NaF}$ . Начальная концентрация фторид-ионов в растворе была 4,88 мг/дм<sup>3</sup>. Использовали следующее соотношение: 0,8 г образца на 80 см<sup>3</sup> модельного раствора. Сорбция проводилась в условиях постоянного перемешивания фторсодержащего раствора на магнитной мешалке. Затем сорбент отделялся от фильтрата с помощью центрифуги. Анализ фильтратов на содержание в них ионов фтора проводилось с помощью рН-метра-иономера «Эксперт-001».

Таб. 1. Определение эффективности сорбции ионов фтора из водного раствора

Образец	Начальная концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Конечная концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	Степень сорбции, %
Пирит	4,88	3,82	21,6
Магнетит		4,52	7,2
Цеолит		4,76	2,3
Полыгорскит		4,61	5,4
Аргиллит		4,69	3,8

Как видно из данных таблицы, наибольшей сорбционной эффективностью по удалению ионов фтора из водной среды среди исследуемых образцов обладает минерал пирит, а наименьшей – цеолит.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боев В.М. Антропогенное загрязнение окружающей среды и состояние здоровья населения Восточного Оренбуржья / Боев В.М., Воляник М.Н. – Оренбург: УрО РАН, 1995. – 127 с.
2. Мартемьянов Д. В., Галанов А. И., Юрмазова Т. А. // Фундаментальные исследования. 2013 год. Часть 3. № 8. С. 666-670.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНТИБАКТЕРИАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СКЭФФОЛДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В МЕДИЦИНЕ

А. С. Сапожникова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ass108@tpu.ru](mailto:ass108@tpu.ru)

С помощью технологий современной тканевой инженерии в настоящее время появилась возможность выращивать искусственные ткани и органы и заменять ими повреждённые или утраченные. Однако, после имплантации таких искусственных конструкций в организм существует риск возникновения воспалительных процессов в результате микробной контаминации. Чтобы избежать заражения, в состав материалов включают различные вещества с противомикробным действием, что приводит к увеличению стоимости конечного продукта и изменению его свойств.

Существуют данные, что такое свойство некоторых полимеров, как способность к пьезоэлектричеству, позволяет им проявлять антибактериальный эффект. Эксперименты, доказывающие эту гипотезу, уже были проведены с керамикой и материалами на основе полимолочной кислоты [1, 2]. Однако, их результаты были весьма относительны.

На данный момент влияние пьезоэлектричества на рост бактерий является слабо изученным. Исследования воздействия пьезоэлектрических полимеров на микроорганизмы ранее не проводились.

Целью данной работы являлось изучение воздействия пьезоэлектричества полимеров на бактериальную культуру.

Для проведения эксперимента методом электроформования были получены образцы нетканых скэффолдов из непьезоэлектрика - поликапролактона (ПКЛ) и пьезоэлектрика - полигидроксибутирата (ПГБ). Оба полимера являются биоразлагаемыми и биосовместимыми и показывают хорошие результаты в качестве платформы для восстановления повреждённых тканей и органов человека.

Исследование антибактериальной активности скэффолдов проводилось методом посева на плотную питательную среду. Для проведения эксперимента готовились 3 пробирки: в первую помещали образец скэффолда из ПКЛ, во вторую – из ПГБ и третья пробирка была «контролем» без образцов. В каждую пробирку вносили объём физиологического раствора и бактериальную суспензию суточной культуры *E. coli*.

Для активации пьезоэффекта пробирки подвергали воздействию ультразвуком. Через серию разведений производили посев суспензии на плотную питательную среду (ППС). После чего чашки Петри с посевами помещали в термостат, где поддерживалась температура 37°C. Подсчёт колоний проводили через 18 часов термостатирования.

Анализ полученных результатов показал, что разница между «контролем» и пробой с образцом из полигидроксибутирата после 30 минут воздействия ультразвуком составляет порядка 200 тысяч КОЕ при пересчёте на первоначальный объём среды в пробирках. Данное явление позволяет сделать вывод, что генерируемое полимерами пьезоэлектричество подавляет рост микроорганизмов.

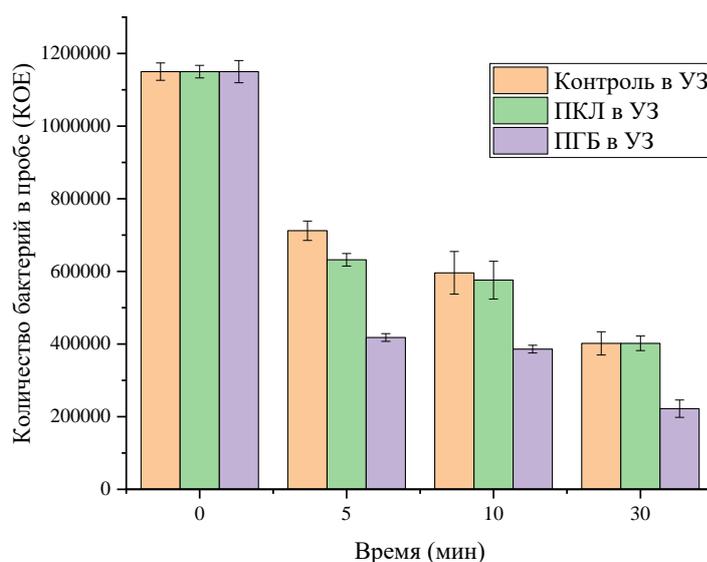


Рис. 1. Количество бактерий в анализируемых пробах с образцами

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ando M. et al. Piezoelectric antibacterial fabric comprised of poly (lactic acid) yarn //Japanese Journal of Applied Physics. – 2017. – Т. 56. – №. 10S. – С. 10PG01.
2. Feng J. et al. Significant Improvement and Mechanism of Ultrasonic Inactivation to Escherichia coli with Piezoelectric Effect of Hydrothermally Synthesized t-BaTiO<sub>3</sub> //ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2018. – Т. 6. – №. 5. – С. 6032-6041.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ОТ ИОНОВ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Н.С. Синько, Д.В. Мартемьянов, Ю.Р. Мухортова, С. П. Журавков  
 Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [natalisee@list.ru](mailto:natalisee@list.ru)

Химические загрязнения являются самыми опасными видами примесей, находящихся в водных средах, в частности тяжелые металлы, которые при попадании вместе с водой в организм человека вызывают отравление. В нынешнем мире для очистки воды используют разнообразные методы для удаления ионов тяжёлых металлов из воды. Сорбционный метод - один из самых результативных способов очистки воды от этих металлов.

В рамках реализации данной разработки проводились исследования сорбционной активности таких материалов как: берёзовый активированный уголь марки БАУ-А, керамический фильтрующий материал КФГМ-7 и сорбент на основе газобетона и гематита, модифицированных оксигидроксидом железа [1]. Также проводились сорбционные исследования на извлечение из модельного раствора ионов Рb(II). Величина удельной поверхности и удельный объём пор сорбционных материалов представлены в таблице.

Таб. 1. Удельная поверхность и удельный объём пор

Образец	Размер фракции, мм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Удельный объём пор, см <sup>3</sup> /г
БАУ-А	1,5-2,5	378,86	0,162
КФГМ-7	1,5-2,5	13,23	0,006
Сорбент	1,5-2,5	188,31	0,082

Из таблицы видно, что наибольшие определяемые значения у активированного угля, более низкие у сорбента на основе газобетона и гематита. Сорбционные характеристики представлены на рисунке.

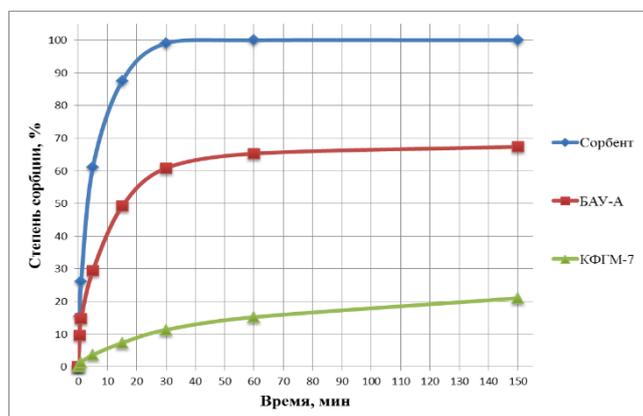


Рис. 1. Определение степени извлечения ионов Рb(II) из модельного раствора

Из рисунка видно, что высокие сорбционные свойства проявляет сорбент из газобетона и гематита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2610612 РФ. МПК51 В01J 20/06, 20/32. Сорбент для очистки водных сред от мышьяка / Д.В. Мартемьянов, А. И. Галанов, С. П. Журавков, Д.Н. Мухортов, М. Б. Хаскельберг, Т.А. Юрмазова, Н.А. Яворовский. Заявлено 23.12.2014; Оpubл. 14.02.2017, Бюл. №5 – 11 с.

## ИЗВЛЕЧЕНИЕ ТИТАНА ИЗ ЛЕЙКОКСЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФТОРИДОА АММОНИЯ

А.А. Смороков, А.С. Кантаев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

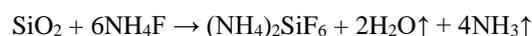
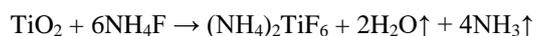
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [wolfraum@yandex.ru](mailto:wolfraum@yandex.ru)

Диоксид титана является наиболее коммерчески востребованным титансодержащим продуктом на рынке. Ильменитовый и рутиловый концентраты являются основными природными видами сырья для производства  $TiO_2$ . В промышленности по всему миру используются два способа производства диоксида титана. Первый метод заключается в использовании серной кислоты, а второй - в использовании хлора. Оба метода имеют перечень требований.

Самое большое месторождение титана в России находится на Коми республика (Ярегское месторождение). Титан встречается в форме лейкоксена. Лейкоксен является мелкозернистым продуктом изменения ильменита с постепенным окислением железа и его выводом из кристаллической решетки. Параллельно с этим, в решетку могут внедряться другие элементы, как например кремний. В случае Ярегского рудного района, данные геологические изменения привели к образованию минерального композита, состоящего в своей основе из диоксида титана (рутил и анатаза) и диоксида кремния (кварц) [1]. Титансодержащий концентрат может быть получен после процесса флотационного обогащения. Данный продукт содержит приблизительно 40-45%  $TiO_2$  и 40-45%  $SiO_2$ . Такой тип материала не подходит для упомянутых ранее технологических методов производства диоксида титана. Наличие такого количества  $SiO_2$  снижает уровень выщелачивания титана в серной кислоте. Извлечение титана с помощью хлора невыгодно. Одно из основных требований хлорного метода заключается в том, что концентрация  $TiO_2$  в сырье должна быть более 80 % [2].

Использование расплавленного фторида аммония представляет перспективным методом для переработки данного типа сырья. Фторид аммония представляет собой соль, которая взаимодействует с  $TiO_2$  и  $SiO_2$  при 190-210 °C:



Получаем смесь комплексных фтораммонийных соединений в качестве продукта. Этот процесс реализуется на практике в барабанной вращающейся печи [3]. Для разделения  $(NH_4)_2SiF_6$  и  $(NH_4)_2TiF_6$  используется сублимация  $(NH_4)_2SiF_6$ .  $(NH_4)_2TiF_6$  выщелачивают и осаждают в форме  $Ti(OH)_4$ , что позволяет получить чистый  $TiO_2$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е.А. Киселёв. Государственный отчет о состоянии и использовании минеральных ресурсов Российской Федерации в 2015 году. 2016, 344.
2. Разработка нанодисперсной технологии  $TiO_2$  из растворов  $TiCl_4$ . Тихонов В.А., 126.
3. Смороков А.А., Кантаев А.С., Передерин Ю.В. Патент № 2681328 Россия, 2019.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ОБОРУДОВАНИЯ  
ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ГЭС**

И.Н. Топоев, В.В. Луференко

Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета

Россия, г. Саяногорск, рабочий поселок Черемушки, д.46, 655619

E-mail: <mailto:igortopoev97@mail.ru>

В России объектам гидроэнергетики предъявляются высокие требования к безопасности основного оборудования. В связи с этим принят стандарт «СТО 17330282.27.140.010-2008. Автоматизированные системы управления технологическими процессами ГЭС и ГАЭС. Условия создания. Нормы и требования», основным требованием которого является оснащение непрерывным вибрационным контролем гидроагрегата [1].

При этом вспомогательное оборудование технических и общестанционных систем обеспечивают нормальную работу основного оборудования ГЭС. Данная работа посвящена возможным причинам появления вибрации в технологических трубопроводах системы технического водоснабжения ГЭС, методам их устранения и рассматривается возможность применения устройств вибрационного мониторинга и диагностики.

Прежде всего, нужно отметить, что система технического водоснабжения предназначена для охлаждения статора гидрогенератора, подпятника и подшипников гидроагрегата технической водой. Вода доставляется в охлаждающие устройства трубопроводами [2].

Основным источником вибрации трубопроводов служит пульсирующий поток транспортируемого по трубопроводу технической воды. При работе циркуляционных насосов в трубопроводах возникают колебания давления. Также к появлению вибрации служит ослабление крепежных элементов опорных конструкций трубопроводов, совпадение частоты возмущающей силы с частотой собственных колебаний узлов конструкции, которые оказывают воздействия на прочность трубопроводов, опор и связанного технологического оборудования [3].

Для устранения вибрации применяют методы уменьшения возмущающих сил, методы виброизоляции и амортизации трубопроводов от источников вибрации, методы динамического гашения вибраций с помощью динамических гасителей колебаний, методы демпфирования колебаний силами трения, методы, предусматривающие изменения параметров трубопроводов с целью отстройки собственных частот колебаний и от частот возмущающих сил [3].

Для проведения вибрационного мониторинга и диагностики состояния трубопроводов технического водоснабжения возможно применение устройств:

для измерения общего уровня вибрации «виброметры предназначены для оценки технического состояния оборудования»;

для периодического мониторинга и диагностики оборудования «виброанализаторы предназначены для вибрационного мониторинга»;

программное обеспечение вибрационного мониторинга и диагностики «для автоматизации измерений хранения и анализа данных мониторинга».

Для выявления проблем, связанных повышенной вибрацией трубопроводов применение систем неразрушающего вибрационного мониторинга и контроля позволяют на начальных этапах выявить причины вибрации и их устранения. Таким образом, оснащение устройствами вибрационного контроля становится необходимым условием для надежной работы оборудования вспомогательных систем ГЭС.

Выводы: перечислены возможные причины появления вибрации в технологических трубопроводах и основных методах устранения вибраций в трубопроводах, а также использование устройств, для вибрационного мониторинга и диагностики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Л.Г. Богдашкина, К.В. Шалахина. Наблюдение и контроль за состоянием основного оборудования. Мониторинг вибрационного состояния гидроагрегата // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. – Саяногорск; Черемушки, 2019. – С. 173–177.
2. Дудченко Л.Н. Вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 107 с.
3. Бегаева Ж.П. Методы снижения вибрации трубопроводов // Современная наука: Актуальные проблемы и пути их решения. – 2014. – Т.1. – № 11. – С. 19 – 22.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ НАНОПОРОШКОВЫХ ДОБАВОК НА ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т.В. Чайка, В.М. Гавриш, Г.А. Баранов

Научно-образовательный центр «Перспективные технологии и материалы»,

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, 299053,

E-mail: [yvgavrish@sevsu.ru](mailto:yvgavrish@sevsu.ru)

На сегодняшний день требования к уровню надежности и долговечности машин и различных механизмов постоянно растут, что обуславливают необходимость регулирования и улучшения смазочных материалов. Одним из способов повышения их качества – введение в них определенных функциональных твердых добавок, наиболее перспективным является применение наномодификаторов (наноалмаз, сиалон, фуллерен и др.) [1].

В данной работе рассмотрена возможность улучшения эксплуатационных свойств смазочной композиции на основе литиевой пластичной смазки Литол 24, за счет добавления наномодификаторов, полученных по уникальной технологии производства нанопорошков из твердосплавных отходов [2].

В качестве модифицирующих агентов рассмотрены ультрадисперсные порошки молибдена, вольфрама и карбида вольфрама. Представлены результаты исследования элементного и гранулометрического анализа предложенных наномодификаторов.

Путем исследования влияния каждой добавки на износ выявлен оптимальный наномодификатор смазочной композиции – нанопорошок молибдена. Определена оптимальная концентрация модификатора и выявлено влияние его на реологические свойства смазочной композиции.

Экспериментальные исследования показали, что предложенная смазочная композиция, модифицированной нанопорошком молибдена, по ряду характеристик, значительно превышает исходную композицию и может быть конкурентоспособным товаром на рынке смазочных материалов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Докшанин С.Г., Трошин С.И. Определение влияния концентрации добавки ультрадисперсного алмазографита на свойства пластичных смазочных материалов // Надежность изделий и материалов.– 2012.–Т.14.– № 1(2).–С. 547 – 549.
2. Pat/ EP 3138932 A1, ЕС. МПК C01G41/02, C22B3/02, C22B3/18, C22B34/36, C22B7/001 Method and device for obtaining a powder from particles of tungsten or tungsten compounds with a size in the nano-, micron- or submicron range / A. Galuga, G. Baranov, V. Gavrish, S.Smirnov, A. Losenkov, S.Vostrogutov. Заявл. 01.09.2015 опубл. 08.30.2017 Бюл. 2017/10.



## СИНТЕЗ ПОКРЫТИЙ Si-Y НА nb ВО ФТОРИДНО-ХЛОРИДНЫХ РАСПЛАВАХ

А.А. Чернышев, А.В. Исаков, А.С. Шмыгалев, Ю.П. Зайков

Уральский федеральный университет, Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, 620002

E-mail: [aac-vp@yandex.ru](mailto:aac-vp@yandex.ru)

Синтез новых многокомпонентных покрытий является актуальным направлением развития авиакосмического материаловедения. При этом тугоплавкие металлы имеют высокие прочностные характеристики, но подвержены газовой коррозии в окислительных средах. Диффузионные покрытия на основе Si и Y могут предотвратить развитие газовой коррозии. Такие покрытия могут быть получены в расплавах солей без использования электрического тока за счет энергии сплавообразования. Авторами [1] показано, что Si-Y покрытия формируют в окислительной среде пленки силиката иттрия, которые защищают металлы от окисления. Целью работы было теоретическое обоснование и демонстрация возможности формирования диффузионных покрытий, содержащих Si и Y, на поверхности металлического ниобия в расплавах солей. Si-Y покрытия синтезировали путем последовательного нанесения Si и Y на Nb подложку. Условия синтеза представлены в таблице 1. Шлифы поперечного сечения полученных образцов подвергали исследованию методами SEM и EDS. Результаты исследований представлены на рисунке 1.

Таб.1. Условия синтеза покрытий

№ стадии	Расплав, (мас. %)	Температура процесса, °С	Время, ч.	Толщина покрытия, мкм
1	NaF(23,1)-NaCl(61,9)-Na <sub>2</sub> SiF <sub>6</sub> (10)+5%Si	900	10	30
2	NaCl(50,4)-KCl(39,6)-YF <sub>3</sub> (5)+5%Y	875	5	30

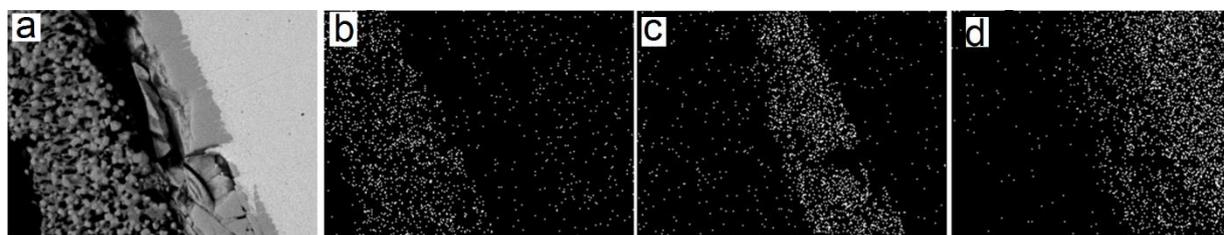


Рис. 1. Распределение элементов в образцах: а – SEM; б – Y; в – Si ; д – Nb.

Результаты исследований показывали, что покрытие имело химический состав, мас. %: Y – 26,68; Nb – 62,56; Si – 10,75. При этом на первой стадии протекает обменный процесс с образованием силицида ниобия, а на второй – с образованием сложного сплава YSiNb. В связи с тем, что иттрий не образует сплавов с ниобием, его вводили в покрытие на второй стадии за счет частичной замены атомов кремния. Испытания на жаростойкость при температуре 1200 оС в течение 2 часов показали потерю массы не более 0,005 г. Таким образом, показана принципиальная возможность получения покрытий Si-Y на Nb.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедева Ю.Е., Попович Н.В., Орлова Л.А. Чайникова А.С. Синтез и перспективное применение материалов в системе Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 6. – С. 59–66.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СВ-СИНТЕЗА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЦ  
НА ОСНОВЕ СИСТЕМ Ni-AL И Zr-AL ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

М.Д. Юрченко, Е.А. Маренкова, А.А. Пермикин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mdy2@tpu.ru](mailto:mdy2@tpu.ru)

Современная ядерная энергетика – это обширная отрасль промышленности, закрепившая свое существование на энергетическом рынке. В России АЭС играют немаловажную роль в обеспечении населенных пунктов электроэнергией и отоплением в зимнее время. В последнее время актуальной проблемой является повышение КПД реакторных установок. Этот вопрос неразрывно связан с модернизацией топливных композиций.

Используемое в большинстве реакторов топливо из диоксида урана характеризуется низкой теплопроводностью, вследствие чего при эксплуатации АЭС в топливной таблетке возникают сильные термические напряжения, приводящие к её растрескиванию. Данный факт накладывает существенные ограничения на возможно осуществимые температурные режимы внутри активной зоны реактора, что влияет на максимально достижимый КПД. Кроме того, растрескивание топлива приводит к выходу продуктов деления за пределы таблеток, снижая эффективность обеспечения ядерной и радиационной безопасности на АЭС.

Данная работа посвящена разработке перспективной замены керамического ядерного топлива – дисперсионному ядерному топливу (ДЯТ), представляющем собой делящиеся соединения, диспергированные в инертную матрицу, свойства которой стабилизируют недостатки топливных частиц на необходимом уровне.

Многообещающим материалом для матрицы являются интерметаллидные соединения, зачастую обладающие хорошими теплофизическими показателями, а также характеризующиеся высокой радиационной стойкостью. Одними из таких соединений являются ZrAl и NiAl.

Данные соединения можно получать перспективным методом – самораспространяющимся высокотемпературным синтезом (СВС). Метод основан на использовании экзотермических реакций между рядом химических элементов, в ходе которых энергия, произведенная при химическом взаимодействии, расходуется на инициацию реакции в близлежащих слоях реагирующих веществ [1].

В данной работе отработан синтез систем Ni-Al и Zr-Al методом СВ-синтеза и достигнуто высокое содержание целевых фаз в образцах, показана возможность синтеза вышеупомянутых соединений при изначальном разбавлении шихты до 60 % инертной добавки без дополнительных механоактивационных затрат, исследован температурный режим синтеза при различном разбавлении, и установлено, что увеличение содержания инертной добавки приводит к снижению пиковой температуры синтеза, а также произведена оценка нейтронно-физических характеристик данных соединений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мержанов А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез: Двадцать лет поисков и находок. Черноголовка: ИСМАН, 1989, 91 с.

## HIGH-ENTROPY FUNCTIONAL MATERIALS BASED ON OXIDES AND FLUORIDES OF RARE-EARTH ELEMENTS

V.O. Marchenko<sup>1</sup>, I.V. Amelichkin<sup>2</sup>

Scientific supervisor: Ph.D. A.S. Sachkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30, 634050

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University,

Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 36, 634050

E-mail: [vicmarch2503@gmail.com](mailto:vicmarch2503@gmail.com)

Improving the methods of obtaining high-entropy functional materials (HEFM) is a priority in modern investigation in the field of creating constructional materials of a new generation. These materials can be used for manufacturing of constructional and catalytic materials, multiferroics and acousto-optic systems.

In this paper HEFM based on oxides and fluorides of rare-earth elements (REE) were synthesized. The phase composition, structure, and surface morphology of the obtained powders were established by scanning electron microscopy and X-ray phase analysis methods.

The stabilization of structure in such systems can be obtained by high mixing entropy, which provides high thermal resistance of phase composition [1]. Due to the fact that fluorides and oxides of REE have low solubility in water, it means that they can be synthesized by the precipitation method from water solutions of certain salts.

The synthesis can be conditionally divided into six stages: mixing of water solutions of REE nitrates, precipitation, rinsing, filtration, drying and annealing.

An important requirement for powders is their single phase. According to X-ray phase analysis data of a sample with a nominal composition  $(La_{0,4}Ce_{0,4}Gd_{0,4}Sc_{0,4}Er_{0,4})F_{3\pm\delta}$  as an example, it was found that this material contains one orthorhombic crystalline phase – ErF<sub>3</sub> type (Fig.1).

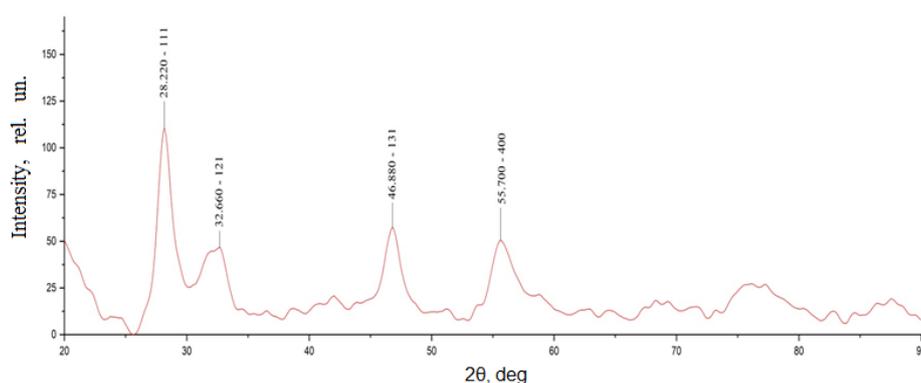


Fig. 1. XDA-spectrum of HEFS  $((La_{0,4}Ce_{0,4}Gd_{0,4}Sc_{0,4}Er_{0,4})F_{3\pm\delta})$

In summary, the main steps of the synthesis and prospective applications of materials are shown in the article; the more homogeneous systems were obtained, then in previous research. Obtained systems will be investigated for applicability in laser technology.

### REFERENCES

1. Christina M., Sachet E., Borman T., Diskey E.C. et al. // Nature Communication, 2015. P. 1–8.

## СЕКЦИЯ 3

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХОДЬБЫ ЧЕЛОВЕКА

А.В. Авилов, Н.В. Авилова, И.А. Кривцов

Донской государственный технический университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, 344000

E-mail: [av170556@rambler.ru](mailto:av170556@rambler.ru)

Моделирование локомоций при ходьбе человека позволяет анализировать динамику движений: скорости, ускорения, энергетические затраты, суставные моменты, силы в суставах в различных фазах периодического движения нижней конечности, что позволяет получить исходные данные для разработки технического задания при проектировании шагающих роботов, протезов и ортезов, имплантов. Моделирование локомоций является актуальным не только в протезостроении и робототехнике, но и в спортивной биомеханике, медицине и разработке экзоскелетов, космических роботов [1].

При моделировании локомоций человека при ходьбе учтены взаимосвязанные между собой костная и мышечная системы. Предложена плоская четырехзвенная модель, имитирующая ходьбу человека в сагиттальной плоскости: бедро, голень, стопа и корпус представлены абсолютно жесткими звеньями, имеющими длину, массу, центр тяжести, моменты инерции. При выборе центра тяжести звеньев и расчете массы, моментов инерции учитываются индивидуальные формы отдельных элементов нижней конечности, которые аппроксимируются элементарными геометрическими фигурами в пространстве. Мышечно-сухожильные структуры сочленений звеньев представлены спиральными пружинами с жесткостями, средние значения которых приведены в литературных источниках [2].

Математическая модель локомоций при ходьбе человека представлена частным случаем уравнения Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta_i} = M_i - \frac{\partial \Pi}{\partial \theta_i},$$

где  $\theta_i$  и  $\dot{\theta}_i$  обобщенные  $i$ -я координата и скорость;  $M_i$  – управляющий момент (или момент мышечных сил), действующий по  $i$ -ой обобщенной координате;  $T$  и  $\Pi$  – кинетическая энергия и потенциальная энергия каждого из звеньев математической модели.

Положение звеньев модели в плоской системе координат задаётся двумя декартовыми координатами  $X_i$  и  $Y_i$  и четырьмя обобщёнными координатами: углами положения бедра, голени, стопы, корпуса:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  соответственно.

В ходе эксперимента методом видеоанализа обследованы 50 человек разного возраста и пола и определены средние значения периода движения конечности, дискретные значения двадцати углов поворота звеньев  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  в интервале времени, равном периоду, а также массы, длины и моменты инерции звеньев.

После аппроксимации дискретных значений углов поворота звеньев  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  полиномами десятого порядка получен закон движения нижней конечности в сагиттальной плоскости. После дифференцирования дискретных значений углов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$ ,  $\gamma$  в интервале времени, равном периоду движения, определены значения  $\dot{\alpha}$ ,  $\ddot{\alpha}$ ,  $\dot{\beta}$ ,  $\ddot{\beta}$ ,  $\dot{\varphi}$ ,  $\ddot{\varphi}$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $\ddot{\gamma}$ . Заданы средние значения параметров звеньев, после чего определены суставные моменты в суставах: бедро-голень, бедро-корпус, голень-стопа. Математическое моделирование локомоций человека при ходьбе с последующим определением динамических характеристик звеньев модели и

суставных моментов позволило разработать техническое задание на проектирование привода протезов нижней конечности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авилова Н.В., Иванов Ю.Н. Определение суставных моментов для оптимального протезирования нижних конечностей // Изв. ТРТУ. – 1998. – № 4: Тематический выпуск "Медицинские информационные системы". Материалы Всерос. науч.-техн. конф. – С. 118-119.
2. Самсонова А.В. [Биомеханика мышц](#) [Текст]: учебно-методическое пособие / А.В. Самсонова, Е.Н. Комиссарова / Под ред. А.В. Самсоновой / Санкт-Петербургский государственный университет физической культуры им. П.Ф. Лесгафта. – СПб: – 2008. – 127 с.

ПОСТРОЕНИЕ БАЙЕСОВСКОЙ ГАММА-РЕГРЕССИИ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РИСК-ФАКТОРОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДИАБЕТА

В.О. Алексеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [valeks@tpu.ru](mailto:valeks@tpu.ru)

Известно, что значение уровня гликозилированного гемоглобина выше семи принимается за подтверждение диагноза диабета. Мы выбрали данную характеристику в качестве целевой для формирования регрессионной модели. Цель работы – проанализировать данные и обнаружить признаки возникновения диабета. Для создания обобщенной линейной модели использовано двухпараметрическое гамма-распределение

$$Y_i \sim \Gamma\left(v, \frac{v}{\exp(z_i^T w)}\right)_{i=1, 2, \dots, n} \quad (1)$$

где  $v$  – параметр формы с экспоненциальным распределением и  $\lambda = 1/100$ ,  $z_i$  – это набор ковариаций для  $i$ -го элемента,  $w$  – вектор рассматриваемых регрессоров с нормальным распределением. Модель (1) представляет собой простую байесовскую линейную модель. Введем  $\mu$  для обозначения ожидаемого значения распределения. В работе [1] показано, что при  $\mu > 0$  каноническая функция связи  $g(\mu) = -\mu^{-1}$  не всегда адекватна, поэтому мы использовали в качестве функции связи выражение

$$g(\mu) = \log \mu \quad (2)$$

Зададим результирующий признак  $\eta_i$  в качестве линейной комбинации ковариаций виде  $\eta_i = z_i^T w$ , тогда из функции связи (2) получаем  $\mu_i = \exp(\eta_i)$ . Для проведения моделирования уровня гликозилированного гемоглобина были использована выборка  $n=403$  наблюдений по следующим показателям: уровень холестерина, стабилизированный уровень глюкозы, уровень липопротеина высокой плотности, местоположение, возраст, пол, рост, вес, фрейм (малый, средний, большой), первое систолическое и диастолическое артериальное давление, обхват талии, обхват бедер [2].

Для расчета была использована библиотека РунМСЗ, для генерации выборки мы использовали два метода Монте-Карло и Метрополиса. Для сравнения методов были использован тест Гельмана-Рубина (Gelman-Rubin test) и визуальная оценка цепей Маркова для одного и того же параметра. Метод Метрополиса показал преимущества по сравнению с методом Монте-Карло.

Итоговая оценка, основанная на двух методах, выявила уровень холестерина, стабилизированный уровень глюкозы, индекс массы тела и отношение waist/hip в качестве основных риск-факторов при прогнозировании диабета. С точки зрения физиологии человека эти факторы являются существенными признаками ожирения, которое рассмотрено, в качестве главного фактора риска возникновения диабета в работе [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paulino C.D., Amaral Turkman M.A., Murteira B., Silva G.L. (2018). Bayesian Statistics. Calouste Gulbenkian Foundation, Lisbon.
2. Willems J.P., Saunders J.T., Hunt D.E., Schorling J.B. (1997) Prevalence of coronary heart disease risk factors among rural blacks: A community-based study. Southern Medical Journal. V. 90, p. 814-820.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНОГО ЗАТЕНЕНИЯ

Н.А. Аманжолова<sup>1</sup>, С.В. Шидловский<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

E-mail: [nura.ana.07@gmail.com](mailto:nura.ana.07@gmail.com)

В работе решена задача математического и имитационного моделирования фотоэлектрической системы в условиях частичного затенения. Результатом выполнения работы является компьютерная обобщенная модель фотоэлектрической системы пригодная для проведения различных исследований.

Фотоэлектрические системы – это энергетические системы для преобразования солнечной энергии в электрическую. Область применения таких систем достаточно широка: энергоснабжение частных и промышленных объектов, автономное питание роботов и дронов, космическая отрасль.

Недостатком фотоэлектрических систем является их сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД), составляющий порядка 15-20 %. Для повышения эффективности фотоэлектрических систем используют различные конструкционные, аппаратные и программные методы [1]. В данной работе рассмотрено улучшение КПД фотоэлектрической системы с помощью режима экстремального регулирования мощности – программный алгоритм отслеживает изменение мощности, поддерживая отбор энергии при максимально возможной мощности. Этот метод показывает свою высокую эффективность в связи с постоянными колебаниями мощности, вызываемыми внешними факторами: нагревом фотоэлементов, падением уровня освещенности, частичного затенения солнечной батареи.

Частичное затенение солнечной батареи наиболее сложный фактор, негативно влияющий на свойства фотоэлектрической системы, так как носит, как правило, случайный характер. В связи с этим расчетные методы для оценки падения напряжения будут сложны и трудоемки, в то время как моделирование позволит быстро и гибко анализировать этот фактор.

Для моделирования используется среда MATLAB/Simulink. Модель фотоэлектрической системы представляет собой синтез нескольких основных элементов: солнечной батареи, управляющего устройства, аккумулятора и нагрузки. Солнечная батарея выполняется в виде параллельно-последовательного соединения моделей фотоэлементов, каждый из которых учитывает уровень своей освещенности, вплоть до полного затенения. Управляющее устройство моделируется как импульсный преобразователь с поддержкой режима экстремального регулирования мощности. В результате моделирования были получены графики работы системы в различных условиях затенения. Полученные результаты говорят об адекватности модели и перспективах ее дальнейшего использования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гимазов Р.У., Шидловский С.В. Автоматизированные системы контроля и управления фотоэлектрическими установками с повышенной энергетической эффективностью // Интеллектуальные энергосистемы: Труды III Международного молодежного форума. – 2015. – Т.1. – С. 113 – 116.



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЯДЕРНОЙ ТЕХНИКИ В РЕЖИМЕ СВС

М.М. Балачков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mmb2@tpu.ru](mailto:mmb2@tpu.ru)

Использование метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) является перспективным для производства многих функциональных материалов ядерной техники, таких как ядерное топливо, материалы защиты и материалы, способные иммобилизовать радиоактивные отходы. Суть СВС заключается в использовании экзотермических реакций, протекающих в шихте для получения необходимых химических соединений.

Для упрощения модели будем считать, что в процессе СВС происходит только перенос тепла, а химические реакции проходят в одну стадию. Тогда система в цилиндрических координатах будет описываться с помощью следующих уравнений [1]:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \lambda \cdot \Delta u + f(r, z, u, \eta); \quad \frac{d\eta}{dt} = k(u) \cdot \varphi(\eta),$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость образца;  $\rho$  – плотность образца;  $u$  – температура;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности образца;  $f(r, z, u, \eta)$  – функция тепловых источников;  $r, z$  – координаты по радиусу и высоте соответственно;  $t$  – время;  $\eta$  – массовая доля продукта химической реакции;  $k(u)$  – температурно-активационная функция;  $\varphi(\eta)$  – кинетическая функция протекания химической реакции.

Функция тепловых источников и две последние функции описываются уравнениями, приведёнными ниже:

$$f(r, z, u, \eta) = Q \cdot \rho \cdot k(u) \cdot \varphi(\eta); \quad k(u) = k_0 \cdot \sqrt{u} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot u}}; \quad \varphi(\eta) = e^{-m_s \cdot \eta} \cdot \eta^{-n_s} \cdot (1-\eta)^{n_c},$$

где  $Q$  – удельный тепловой эффект реакции;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;

$E_a$  – энергия активации химической реакции;  $R$  – постоянная Больцмана.  $m, n_s$  – параметры торможения;  $n_c$  – порядок химической реакции.

Обычно СВС производят в вакууме, а сам образец располагается на несгораемой слабо проводящей тепло подложке и предварительно подогрет, в связи с этим граничные и начальные условия примут следующий вид:

$$\lambda \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=H} = -\varepsilon \cdot \sigma_B \cdot (u^4 - u_e^4); \quad \lambda \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0; \quad \lambda \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\varepsilon \cdot \sigma_B \cdot (u^4 - u_e^4); \quad u|_{t=0} = u_0; \quad \eta|_{t=0} = 0,$$

где  $H, R$  – высота и радиус образца соответственно;  $u_e$  – температура окружающей среды;

$\varepsilon$  – степень черноты тела;  $\sigma_B$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $u_0$  – начальная температура образца.

Теплоёмкость и теплопроводность в любой момент времени определяются с помощью следующих соотношений:

$$c = c_f \cdot \eta + (c_1 \cdot \eta_1 + c_2 (1 - \eta_1)) \cdot (1 - \eta), \quad \lambda = \lambda_f \cdot \eta + (\lambda_1 \cdot \eta_1 + \lambda_2 (1 - \eta_1)) \cdot (1 - \eta),$$

где  $c_{f, 1, 2}$  – удельная теплоёмкость готового продукта, первого и второго реагентов соответственно;  $\lambda_{f, 1, 2}$  – коэффициент теплопроводности готового продукта, первого и второго реагентов соответственно;  $\eta_1$  – массовая доля первого реагента в начальной смеси реагентов.

Для верификации построенной математической модели были проведены эксперименты по синтезу двух соединений: NiAl и WB. При подготовке шихты соотношение реагентов подбиралось равным 1:1 по количеству вещества. Температурный режим синтеза контролировался комплексом вольфрам-рениевых термопар. Необходимые константы взяты из [2–6]. Результаты эксперимента и моделирования приведены на рисунках 1 и 2.

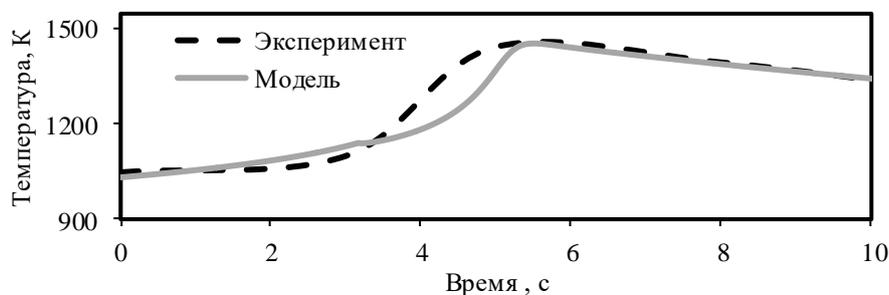


Рис. 1. Термограмма синтеза никель-алюминия

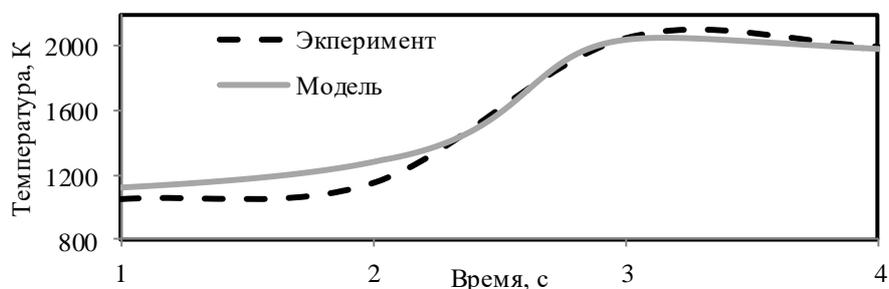


Рис. 2. Термограмма синтеза борид вольфрама

Из приведённых рисунков видно, что модель и эксперимент согласуются по характеру нагрева и максимальной температуре достигнутой в процессе синтеза.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князева А.Г. Макрокинетика: понятия, определения, приложения: учебное пособие. – Томск: Изд-во Типография ООО «С-принт», 2014. – 36 с.
2. Смитлз К. Дж. Металлы: Справ. изд. Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1980. – 447 с.
3. Елманов Г.Н. Том 1. Физика твердого тела / Г. Н. Елманов, А. Г. Залужный, В. И. Скрытный, Е. А. Смирнов, В. Н. Яльцев – М.: МИФИ, 2007. – 636 с.
4. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справ. изд. / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Самсонов Г.В., Виноцкий И.М. Тугоплавкие соединения / Г.В. Самсонов, И.М. Виноцкий. – М.: Металлургия, 1976. – 559 с.
6. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. – М.: Атомиздат, 1968. – 484 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ

О. Э. Безрукова, А. С. Мищенко, К. А. Мороз, М. М. Ханукаев

Донской государственный технический университет,

Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, 344000

E-mail: [bezruckova.olga.ed@yandex.ru](mailto:bezruckova.olga.ed@yandex.ru)

В данной работе разработан программный комплекс для диагностики работоспособности сердечной мышцы, основанный на построении математической и 3D моделей органа, а также обработке данных электрокардиограммы (ЭКГ) в программной среде MATLAB. Обработка и дальнейший анализ сигнала ЭКГ дает возможность определить частоту сердечных сокращений (ЧСС) и выделить соответствующие интервалы времени, необходимые для визуализации сокращений сердечной мышцы [1]. Математическая модель позволяет оценить насосную функцию сердца, давления в предсердиях и желудочках, а также их массу и объем. 3D-модель сердца (рис. 1), в свою очередь, позволяет визуализировать данные математической модели и сократительную функцию сердечной мышцы одновременно [2, 3].

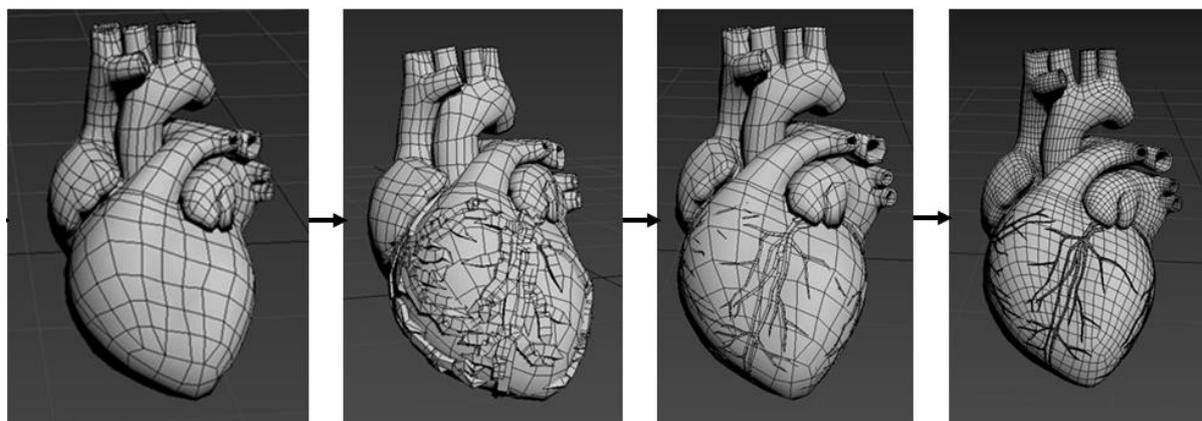


Рис. 1. Процесс создания 3D-модели сердца

Исходя из вышеизложенного, целью работы является создание программного комплекса для анализа деятельности сердечной мышцы. Для достижения поставленных целей необходимо решить следующие задачи: обработать полученный сигнал ЭКГ; разработать математическую модель сердца на основании заранее заданных уравнений и необходимых параметров; разработать 3D модель сердца; произвести оценку функционирования полученного программного комплекса.

Основными параметрами, необходимыми для построения моделей, являются такие параметры, как: массы предсердий и желудочков, диаметры клапанов, средние размеры сердечной мышцы. Для анализа электрокардиограммы необходимы знания о структуре ЭКГ-сигнала, его основных зубцах и интервалах [4, 5].

На основании этих параметров и принципов работы сердечной мышцы строятся модели, которые представляют собой системы уравнений. С помощью данных моделей возможны проведения исследований деятельности сердечной мышцы с целью выявления отклонений от нормы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дамодаран Т., Литвин А.В. Исследование влияния цифровых фильтров на сигнал ЭКГ // Сборник докладов научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, сотрудников и обучающихся по итогам работы за 2013-2014 учебный год (в части молодежной науки) – Ростов-на-Дону, 2014. - С. 581-585.
2. Лебедеико И. С., Немущенкова Н. И. Модели желудочков и предсердий//Биотехн., мед. и экол. системы и комплексы: Материалы Всерос. НТК. РГРА. Рязань, 2003. С. 106-108.
3. Литвин А.В., Ананченко В.Н. Компьютерный анализ биомедицинских сигналов и изображений. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2012. – 190 с.
4. Омельченко В.П., Курбатова Э.В., Цыбрий И.К. Биофизические основы живых систем. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2015. – 149с.
5. Физиология сердца: Учеб. пособие/ С. В. Барабанов, В. И. Евлахов и др. / Под ред. Б. И. Ткаченко. 2-е изд. СПб.: СпецЛит, 2001. – 143с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ДЕПАРАФИНИЗАЦИИ  
ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИ, ОСНОВАННОЙ  
НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ ПРОЦЕССА

В.В. Быкова, Н.С. Белинская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vvg@tpu.ru](mailto:vvg@tpu.ru)

Для России в связи с особенностями климатических условий и географического положения возникла необходимость в производстве большего объема зимнего и арктического дизельного топлива с улучшенными характеристиками эксплуатации при низких температурах окружающей среды.

Цель работы – исследование процесса производства зимнего и арктического дизельного топлива в процессе каталитической депарафинизации. Задачи исследования: изучить влияние технологических параметров на процесс каталитической депарафинизации и оптимизация технологического режима в зависимости от состава сырья и активности катализатора.

**Теория процесса.** Процесс каталитической гидродепарафинизации является новым многоцелевым каталитическим процессом переработки нефти, направленным на селективное удаление n-парафиновых углеводородов из различных нефтяных фракций с применением металлцеолитных катализаторов в присутствии водорода. Он применяется для снижения температуры застывания базовых компонентов смазочных масел и средних дистиллятов, температуры помутнения дизельных топлив и температуры кристаллизации авиационных топлив. Основные реакции процесса гидродепарафинизации включают гидрокрекинг длинноцепочечных молекул n-парафинов  $C_{17}$ - $C_{27}$  и изомеризацию n-парафинов  $C_5$ - $C_{16}$ . Эти превращения имеют наибольшее значение, так как молекулы n-парафинов обладают положительными значениями температуры застывания, что неприемлемо для топлива высокого качества. Продуктами процесса являются низкокипящие n-парафины  $C_{10}$ - $C_{13}$ , углеводороды изостроения, моноциклические ароматические углеводороды.

**Экспериментальная часть.** С помощью компьютерной моделирующей системы были проведены расчеты для исследования влияния основных технологических параметров на предельную температуру фильтруемости и выход продукта, а также на содержание n-парафинов в продукте.

Исследование влияния температуры показало, что, увеличивая температуру процесса, количество n-парафинов в продукте уменьшается. Предельная температура фильтруемости также снижается, что обусловлено прямопропорциональной зависимостью между количеством n-парафинов и предельной температурой фильтруемости. Таким образом, улучшаются низкотемпературные свойства дизельных топлив, но при этом выход целевого продукта снижается.

С увеличением температуры выкипания в разных фракциях сырья содержание n-парафинов снижается. Так как содержание n-парафинов в продукте уменьшается, то предельная температура фильтруемости продукта будет снижаться. Выход продукта имеет обратно пропорциональную зависимость от температуры выкипания сырья. При увеличении температуры выкипания снижается выход продукта.

С увеличением объема переработанного сырья активность катализатора снижается, так как содержание кокса на катализаторе увеличивается. При снижении активности катализатора содержание n-парафинов в

продукте увеличивается, так как при дезактивации активных центров катализатора целевая реакция гидрокрекинга n-парафинов протекает с меньшей интенсивностью. Соответственно, предельная температура фильтруемости получаемого продукта увеличивается.

**Заключение.** В результате изучения процесса производства зимнего и арктического дизельного топлива в процессе каталитической депарафинизации было исследовано влияние основных технологических параметров на данный процесс. Были рассмотрены влияния температуры, состава сырья и активности катализатора на содержание n-парафинов в продукте, на предельную температуру фильтруемости дизельного топлива, а также на выход продукта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванчина Э.Д., Белинская Н.С., Францина Е.В., Луценко А.С., Аверьянова Е.В. Влияние кратности циркуляции водородсодержащего газа на активность катализатора депарафинизации // Технологии нефти и газа. – 2018. – № 2 (115). – С. 8-12.
2. Агаев С.Г., Глазунов А.М. Улучшение низкотемпературных свойств дизельных топлив: монография. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2009. – 145 с.
3. Мейерс Р. А. Основные процессы нефтепереработки. Справочник: пер. с англ. 3-го изд./ [Р. А. Мейерс и др.]; под ред. О.Ф. Глаголевой, О.П. Лыкова. - СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. - с. 452-457.

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУХФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ ХАЛЛА-УАЙТА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКИ

Е.П. Егоров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [jechaeg15@gmail.com](mailto:jechaeg15@gmail.com)

Двухфакторная модель Халла-Уайта(Hull-White) предполагает, что мгновенная процентная ставка равна  $dr(t) = [\theta(t) + u(t) - \bar{a}r(t)]dt + \sigma_1 dZ_1(t)$ ,  $r(0) = r_0$ , где  $Z_1$  и  $Z_2$  двумерное броуновское движение  $dZ_1(t)dZ_2(t) = \bar{\rho}dt$  с положительными константами  $dr_0, \bar{a}, \bar{b}, \sigma_1, \sigma_2$  и  $-1 \leq \bar{\rho} \leq 1$ . Допустим, что динамика процентных ставок задана с помощью модели G2++ и выглядит как  $r(t) = x(t) + y(t) + \varphi(t)$ ,  $r(0) = r_0$ , процесс  $\{x(t) : t \geq 0\}$  и  $\{y(t) : t \geq 0\}$  удовлетворяет

$$dx(t) = -ax(t)dt + \sigma dW_1(t), x(0) = 0 \text{ и } dy(t) = -bx(t)dt + \sigma dW_2(t), y(0) = 0, \quad (1)$$

где  $W_1$  и  $W_2$  двумерное броуновское движение с  $dW_1(t) + dW_2(t) = pdt$  и  $r_0, a, b, \sigma, u, \eta$  положительные константы, а  $-1 \leq p \leq 1$ . Функция  $\varphi$  определяется на интервале от  $[0, T]$ . Преобразовав (1) получим

$$r(t) = x(s)e^{-a(t-s)} + y(s)e^{-b(t-s)} + \sigma \int_s^t e^{-a(t-u)} dW_1(u) + \eta p \int_s^t e^{-b(t-u)} dW_1(u) + \eta \sqrt{1-p^2} \int_s^t e^{-b(t-u)} dW_2(u) + \varphi(t)$$

На этой стадии аналогия с двухфакторной моделью Халла-Уайта становится очевидна. Таким образом мы можем реализовать двухфакторную модель Халла-Уайта с помощью модели G2++ (1) [1]. Далее мы проводим расчёты для выражения (1) и получаем искомые процентные ставки.

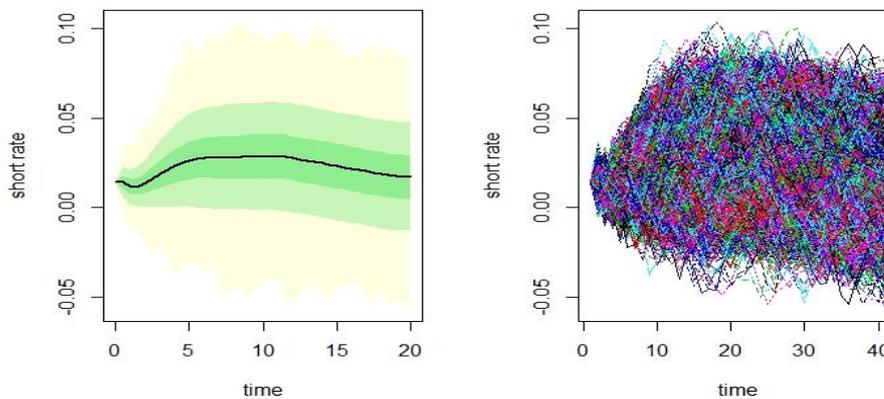


Рис. 1. Форвардные процентные ставки и доверительные интервалы (слева), получение доверительных интервалов с помощью симуляций (справа)

В работе рассмотрена двухфакторная модель Халла-Уайта. С помощью данной модели рассчитаны форвардные процентные ставки для бескупонных облигаций, а также доверительные интервалы. Все расчёты произведены с помощью языка программирования R и библиотеки ESGtoolkit [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. With Smile. (2006). Interest Rate Models - Theory and Practice. Inflation and Credit, pp.142-160.
2. Moudiki, T. (2014). ESGtoolkit, tools for Economic Scenarios Generation, pp. 2-5.

ОЦЕНКА ФИНАНСОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА

В.А. Запригалова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vera\\_zaprigalova@mail.ru](mailto:vera_zaprigalova@mail.ru)

**Введение.** Не каждое предприятие способно функционировать без финансовых потерь, а иногда и вовсе оно становится неспособным справиться с платежами по долговым обязательствам. Своевременная и достоверная оценка рисков является важнейшим фактором в деятельности любой компании.

В настоящее время множеством стран разработано большое количество моделей для оценки вероятности банкротства предприятий, однако большинство из них не учитывают специфику России, что ставит под сомнение их применимость для отечественных организаций.

**Экспериментальная часть.** С помощью шести известных моделей: модель Спрингейта, модель Таффлера, модель Беликова – Давыдовой, Модель Сайфуллина и Кадыкова, модель Савицкой и модель Чесера, на основе ежеквартальных бухгалтерских балансов за период с 2013 по 2018 гг. семь крупных предприятий энергетической отрасли России были исследованы на финансовую устойчивость. Результаты обработаны следующим образом: для каждой модели полученные значения были сопоставлены с критическими и вычислена вероятность того, что определенная модель дает в качестве результата – финансовую устойчивость или банкротство предприятия.

Дополнительно для того, чтобы убедиться, что компании являются финансово устойчивыми и стабильно функционируют, был проведен коэффициентный анализ. Для каждой компании посчитаны: коэффициент автономии, коэффициент капитализации, коэффициент текущей ликвидности и рентабельность. Далее полученные значения сравнивались с критическим значением для каждого коэффициента и в соответствии с результатами было выявлено, что все компании, кроме одной являются финансово – устойчивыми. Для компании «МОЭК» 5 коэффициентов из 6 показывали, что компания является банкротом.

**Результаты.** На основе результатов, полученных с помощью шести моделей и проведенного коэффициентного анализа, сделан вывод, что модель Спрингейта является наиболее подходящей к энергетической отрасли производства России. Так как она показывает высокий процент финансовой устойчивости для стабильно работающих предприятий и низкий для компании «МОЭК», для которой с помощью коэффициентного анализа выявлено, что компания не является стабильно работающей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жданов В.Ю., Жданов И.Ю. Финансовый анализ предприятия с помощью коэффициентов и моделей. Учебное пособие. М.: ООО «Перспект», 2018.
2. Коэффициентный анализ в банкротстве [Электронный ресурс] / Сайт: Банкротство в России. URL: <http://dolgnikov.net> (дата обращения 05.06.2019).



## ИССЛЕДОВАНИЕ РЫНКА ЦЕННЫХ БУМАГ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MARKOV CHAIN MONTE CARLO

В.К. Захаров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [zakharovseva@mail.ru](mailto:zakharovseva@mail.ru)

Ввиду специфики рынка акций ценных бумаг в настоящее время существует множество различных способов прогнозирования цен. Для прогнозирования важна адекватная оценка прошлых и текущих статистических характеристик рассматриваемого сегмента рынка. Метод Монте Карло с использованием Марковских цепей (Markov Chain Monte Carlo, МСМС) является одним из достаточно новых и редко используемых в данной сфере, поскольку требует большего количества входных данных, что существенно увеличивает время расчетов.

Несмотря на наличие определенных недостатков – использование МСМС является одним из наиболее точных методов, использующий набор алгоритмов с целью создания обратимой цепи Маркова для генерации выборок из апостериорного распределения вероятностей методом Монте-Карло. При использовании МСМС в статистике выборка из апостериорного распределения вероятностей некоторой модели в Байесовском выводе является средством для нахождения усредненной вероятности. При этом точность возрастает с ростом количества смоделированных наблюдений [1].

В работе использованы два языка программирования – R и Python в программной среде Jupyter. В качестве исходных данных для исследования возможности МСМС было выбрано нормальное распределение с разным размером выборки:  $n=250, 500, 1000, 10\ 000$ . Это дало возможность оценить время расчетов, погрешность вычисления для каждого случая. Имея исходные данные был проведен сравнительный анализ прогнозируемого и текущего значения цен акций.

В результате проведенной работы показано, что построенная расчетная модель с ростом  $n$  позволяет построить более точный прогноз за счет увеличения точности вычислений плотности апостериорного распределения вероятности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Del Moral, Pierre (2013). Mean field simulation for Monte Carlo integration. Chapman & Hall/CRC Press. Monographs on Statistics & Applied Probability. 626 p.

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИ ОБОСНОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ФАРМАКОКИНЕТИКИ НАНОЧАСТИЦ ДИОКСИДА ЦЕРИЯ

В.В. Касьянова, И.Н. Бажукова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,

Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 21, 634050

E-mail: [ValentinaKasianova@yandex.ru](mailto:ValentinaKasianova@yandex.ru)

Наночастицы диоксида церия, широко используемые в промышленности в качестве катализатора, покрывающего агента и компонента защитных покрытий, в настоящее время привлекают большое внимание в биомедицинской области. Способность данных наночастиц выполнять функции ферментов и инактивировать активные формы кислорода (АФК) может быть использована в медицине для предотвращения и лечения заболеваний, вызываемых окислительным стрессом в организме. Ряд исследований уже показал эффективность данных наночастиц в защите клеток от АФК, однако создание на их основе фармацевтических препаратов затруднено ввиду отсутствия необходимой информации о распределении данных наночастиц в организме после их введения. Полезным инструментом в этом случае может быть физиологически обоснованное моделирование фармакокинетики (physiologically based pharmacokinetic modeling), которое позволяет прогнозировать поглощение, распределение, метаболизм и выведение наночастиц, а также оценивать их токсичность в различных условиях [1].

В данной работе была разработана модель фармакокинетики наночастиц диоксида церия при их внутривенном введении с использованием программного обеспечения MATLAB SimBiology R2018b. В качестве экспериментальных данных, необходимых для оценки параметров модели, были использованы литературные данные [2]. Оптимизация модели проводилась методом нахождения минимума связанной нелинейной функции многих переменных.

Разработанная модель включает в себя десять блоков, каждый из которых моделирует фармакокинетику наночастиц в определенном органе: легких, селезенке, печени, почках, сердце, мозге, желудочно-кишечном тракте, остальных органах, а также в артериальной и венозной крови. Каждый блок был представлен в виде трех подотделов: капиллярной крови, ткани и фагоцитов.

Решением однородных дифференциальных уравнений, описывающих биокинетику наночастиц, были получены кривые распределения наночастиц в тканях различных органов. Анализ чувствительности модели показал, что наиболее значимыми параметрами являются коэффициент распределения наночастиц между тканью и кровью, коэффициент проницаемости между капиллярной кровью и тканью и максимальная скорость поглощения наночастиц фагоцитами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carlander U. Physiologically based pharmacokinetic modeling of nanoceria systemic distribution in rats suggests dose- and route-dependent biokinetics / U. Carlander, T. Moto, A. Desalegn, R. Yokel, G. Johanson // International Journal of Nanomedicine. – 2018. – V.13. – P. 2631-2646.
2. Yokel R.A. Biodistribution and oxidative stress effects of a systemically-introduced commercial ceria engineered nanomaterial / R.A. Yokel, R.L. Florence, J.M. Unrine, et al. // Nanotoxicology. – 2009. – V. 3. - No 3. – P. 234-248.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗООБРАЗНОГО UF<sub>6</sub> В КОЛЛЕКТОРЕ  
НА ДИНАМИКУ ЗАПОЛНЕНИЯ ЕМКОСТЕЙ С ГЛАДКИМИ ВНУТРЕННИМИ СТЕНКАМИ  
ДЕСУБЛИМИРОВАННЫМ UF<sub>6</sub>

А.А. Котельникова, А.А Орлов

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [aak135@bk.ru](mailto:aak135@bk.ru)

Данная работа посвящена исследованию влияния температуры газообразного UF<sub>6</sub> на динамику заполнения емкостей с гладкими внутренними стенками десублимированным UF<sub>6</sub>.

В качестве объекта исследования были выбраны емкости объемом 1,0; 2,0; 2,5; 3,0 и 4,0 м<sup>3</sup>. Расчеты заполнения емкостей проводились с использованием упрощенной трехмерной математической модели нестационарного процесса десублимации UF<sub>6</sub> [1].

При определении влияния температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе на среднюю производительность емкостей и время их заполнения десублимированным UF<sub>6</sub> до 70% их свободного объема считали, что диаметр входного клапана емкостей равен  $65 \cdot 10^{-3}$  м, рабочее давление в коллекторе составляет 80 мм рт. ст., температура хладагента (насыщенного раствора CaCl<sub>2</sub>) минус 25°C, а температура газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе изменяется с 40 до 10°C с шагом 5°C. Результаты расчетов средней производительности емкостей различного объема и времени их заполнения от температуры хладагента представлены на рисунках 1 и 2.

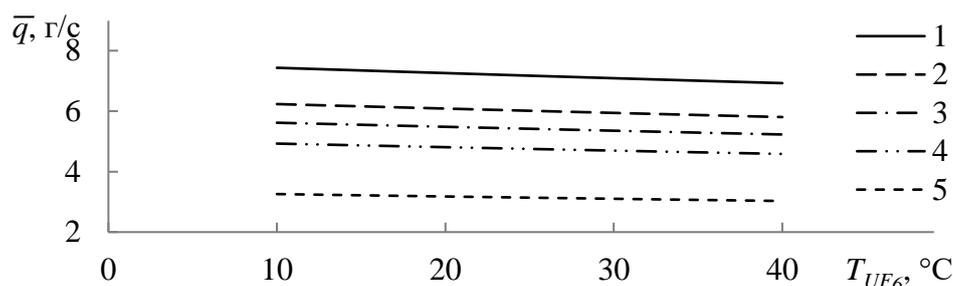


Рис. 1. Зависимость средней производительности емкостей от температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе: 1 – 4,0 м<sup>3</sup>; 2 – 3,0 м<sup>3</sup>; 3 – 2,5 м<sup>3</sup>; 4 – 2,0 м<sup>3</sup>; 5 – 1,0 м<sup>3</sup>

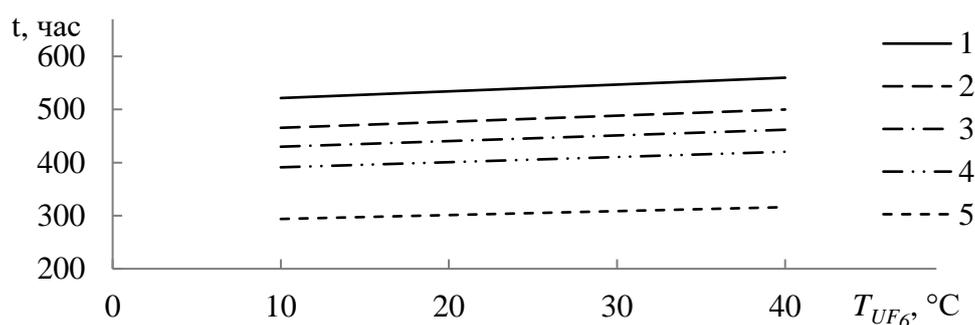


Рис. 2. Зависимость времени заполнения емкостей от температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе: 1 – 4,0 м<sup>3</sup>; 2 – 3,0 м<sup>3</sup>; 3 – 2,5 м<sup>3</sup>; 4 – 2,0 м<sup>3</sup>; 5 – 1,0 м<sup>3</sup>

В результате проведенного исследования показано (рис. 1 и 2), что понижение температуры газообразного UF<sub>6</sub> в коллекторе с 40 до 10°C приводит к линейному увеличению средней производительности емкостей  $\bar{q}$  на 7.2 % и уменьшению времени заполнения емкостей  $\bar{t}$  на 7.1 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Glazunov A.A., Dynamics of UF<sub>6</sub> desublimation with the influence of tank geometry for various coolant temperatures, MATEC Web of Conferences, 72 (2016) 01079.

ФАКТОРНЫЙ И РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗЫ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ,  
ОКАЗЫВАЮЩИХ ВЛИЯНИЕ НА ОЖИДАЕМУЮ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ

А.О. Курникова, М.Л. Шинкеев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aleksandra4816@gmail.com](mailto:aleksandra4816@gmail.com)

В самом простом случае средняя продолжительность жизни – это среднее арифметическое количества лет, прожитых определенной группой людей. Демографы такой показатель практически никогда не используют. Это неудобно: чтобы выяснить продолжительность жизни группы людей, рожденных в один год в конкретной стране или регионе, надо дождаться, пока все ее представители умрут. [1] Нам же интересно знать, что происходит и будет происходить с живущими сейчас людьми.

Эти ограничения вынуждают нас при ответе на простой, казалось бы, вопрос – сколько живут люди – прибегать к математическому моделированию, результатом которого оказывается показатель с обманчиво простым названием — ожидаемая продолжительность жизни (ОПЖ) [2]. Именно кажущаяся простота показателя приводит к многочисленным ошибкам в интерпретации.

Для выполнения задач исследования была использована информация о макроэкономических и социальных характеристиках (25 показателей) по 85 регионов России. Ограничение выборки было обусловлено неполнотой данных по ряду территориальных образований и исключением оставшихся регионов, оказывающих очень сильное влияние на результаты анализа, способное исказить закономерности, обнаруживаемые в большинстве субъектов Российской Федерации. Была проведена факторизация пространства социально-экономических показателей, в результате которой из 25 исходных показателей было сформировано 6 обобщенных факторов (главных компонент), из которых 5 высоко значимо коррелируют с ОПЖ. Можно также заметить, что второй фактор явно указывает на социальное неравенство, а пятый фактор говорит о развитии медицины в том или ином регионе страны. Для оценки степени влияния факторов на ОПЖ был проведен регрессионный анализ на основе модели множественной линейной регрессии (рис. 1). В качестве зависимой переменной выступает ожидаемая продолжительность жизни.

Regression Summary for Dependent Variable: Ожидаемая продолжительность жизни						
R= ,84107574 R <sup>2</sup> = ,70740840 Adjusted R <sup>2</sup> = ,68490135						
F(6,78)=31,431 p<.00000 Std.Error of estimate: 1,3540						
N=85	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(78)	p-value
Intercept			71,15412	0,146860	484,5022	0,000000
Ф1	-0,420292	0,061247	-1,01377	0,147732	-6,8623	0,000000
Ф2	0,135240	0,061247	0,32621	0,147732	2,2081	0,030174
Ф3	-0,007157	0,061247	-0,01726	0,147732	-0,1169	0,907269
Ф4	-0,497258	0,061247	-1,19942	0,147732	-8,1189	0,000000
Ф5	-0,474982	0,061247	-1,14569	0,147732	-7,7552	0,000000
Ф6	-0,198869	0,061247	-0,47969	0,147732	-3,2470	0,001720

Рис. 1. Результаты регрессионного анализа

Как видим, значимое влияние на ОПЖ оказывают все обобщенные факторы, кроме третьего, при этом связь между факторами и ОПЖ достаточно сильная (коэффициент детерминации модели  $R^2 \approx 0,71$ ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скопин А. Ю. Введение в экономическую географию. Учебник для ВУЗов. – М.: Владос, 2006.
2. Алексеев А.И., Николина В.В. География: население и хозяйство России. – М.: Просвещение, 2004.

ПОСТРОЕНИЕ МНОГОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОХОДНОСТЕЙ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОПУЛА-ФУНКЦИЙ

М.В. Мытницкая

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mashka7737@gmail.com](mailto:mashka7737@gmail.com)

Разработка методов моделирования совместного многомерного распределения с учётом асимметричности и «тяжелых хвостов» исходных данных является актуальной задачей. В работе проведена параметрическая оценка копулярных моделей из эллиптического и архимедова семейств. Все расчеты выполнены с использованием языка программирования R.

В данной работе мы использовали инвестиционный портфель, составленных из фьючерсов на акции ПАО «Роснефть» (ROSN), ПАО «Газпром» (GAZP) и ПАО «Лукойл» (LKOH). В качестве исходных данных использованы логарифмические доходности дневных цен закрытия указанных контрактов с 1 февраля 2018 г. по 1 февраля 2019 г. (255 наблюдений). Для построения копулярной модели мы использовали параметрический метод, который включает двухэтапную оценку максимального правдоподобия: 1) оценка параметров частных (в англоязычной литературе маргинальных) распределений, 2) оценка параметров копулы. Для описания поведения исходных данных мы рассмотрели три распределения (табл. 1) и для дальнейшего моделирования выбрали четырехпараметрическое гиперболическое распределение (табл. 2).

Таб. 1 Значение критерия Колмогорова-Смирнова, уровень значимости 0,05

Распределение	ROSN	GAZP	LKOH
Гиперболическое	0,9492	0,9543	0,9593
Устойчивое	0,7920	0,7900	0,7910
Гамма	0,8761	0,8768	0,8782

Таб. 2 Оценки значений параметров гиперболического распределения, полученные методом Нелдера-Мида

Параметры	ROSN	GAZP	LKOH
$\pi$	1,27190	0,53040	0,85920
$\zeta$	0,47010	1,36760	1,70870
$\delta$	-0,00019	-0,00028	-0,00052
$\mu$	0,05208	0,07822	0,00672

Для выбора копулярной модели мы использовали информационные критерии Акаике и Байеса (пакет VineCopula) и в дальнейших исследования будем использовать парные копулы Гумбеля, Клейтона-Гумбеля и Стьюдента [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Травкин А. И. Конструкции парных копул в задаче формирования портфеля акций // Прикладная эконометрика. 2013. – Т. 32. – № 4. – С. 110–133.

## ПОСТРОЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДОРОЖНОГО ГРАФА

М.А. Степанов<sup>1</sup>, М.Е. Семёнов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МБОУ лицей при Томском политехническом университете, Россия, г. Томск, ул. А. Иванова, 4, 634028

<sup>2</sup>Томской политехнический университет, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [sme@tpu.ru](mailto:sme@tpu.ru)

Непрерывное позиционирование и навигация человека на улице и в помещении с помощью мобильного приложения является актуальной задачей. В Томском политехническом университете разработан веб-сервис для поиска и бронирования аудиторий университета ([maps.tpu.ru](http://maps.tpu.ru)). Одним из направлений развития данного веб-сервиса является создание навигации внутри учебных корпусов, а затем сквозной (бесшовной) навигации в кампусе университета. Цель данной работы – разработка алгоритма и прототипа программного обеспечения для построения дорожного графа с учетом дополнительных условий.

В качестве входных данных использованы поэтажные планы зданий, которые хранятся в векторном формате (файлы с расширением \*.svg). Формально для  $i$ -го этажа,  $i = 1, 2, \dots, k$  известны координаты дверей  $(x_{ij}, y_{ij}) \in \mathbf{R}$ ,  $j=1, 2, \dots, n$  во внутренние помещения здания. Требуется обеспечить навигацию пользователя между любыми двумя помещениями.

Для решения поставленной задачи предлагаем использовать графовую модель, в которой вершины – это точки плоскости (двери), а ребра – линии между парами вершин, вес ребра – евклидово расстояние между смежными вершинами. Будем считать, что передвижение между внутренними помещениями осуществляется через систему связанных коридоров и лестниц по прямолинейным отрезкам на разных уровнях. Для учета этих условий введем *вершины ветвления*, а также припишем каждой вершине дополнительную характеристику – номер этажа  $z_{ij} \in \mathbf{Z}$ . Далее, применим к  $i$ -

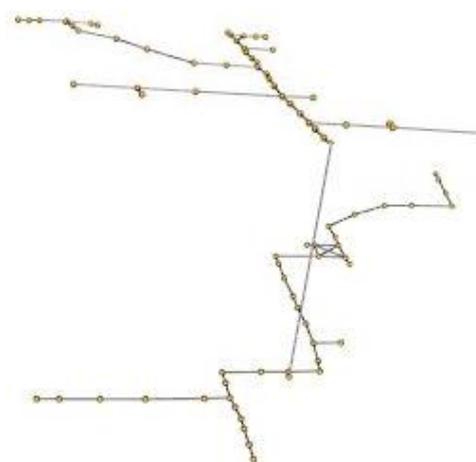


Рис. 1. Пример дорожного графа для двухэтажного здания с одной лестницей

му графу,  $i = 1, 2, \dots, k$  алгоритм Прима и найдет минимальное остовное дерево. Затем полученные деревья объединим в дорожный граф через добавление ребер между вершинами ветвления (рис. 1). Окончательно, применим к дорожному графу алгоритм Дейкстры и найдем кратчайший простой путь для любой пары заданных пользователем вершин.

Предложенное решение задачи реализовано на языке R, с использованием библиотеки `igraph`. Верификация найденных остовных деревьев показала, что не всегда полученное дерево удовлетворяет условию прямолинейного передвижения, так как, например, коридоры могут соединяться не под прямым углом. На данном этапе работы мы вынуждены вручную перемонтировать (*rewiring*) ребра, то есть при построении дорожного графа используется остовное дерево близкое к минимальному. Для решения указанной проблемы требуется проведения дополнительных исследований, направленных на разработку формального алгоритма для задания координат точек ветвления.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СООТНОШЕНИЯ CALL-PUT ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ  
СТОХАСТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕНТНОЙ СТАВКИ И ПОСТРОЕНИЯ УЛЫБКИ  
ВОЛАТИЛЬНОСТИ

Д.В. Степанян

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dar.stepanyan@yandex.ru](mailto:dar.stepanyan@yandex.ru)

Основными числовыми характеристиками в финансовой математике являются стохастическая процентная ставка и волатильность. Эти характеристики позволяют прогнозировать будущую стоимость ценных бумаг [1], таких как опционы и фьючерсы, довольно точно оценивать справедливость цены ЦБ и обнаруживать подозрительную активность трейдеров и инсайдеров на бирже [2].

В приведенной ниже работе для вычисления стохастической процентной ставки используется соотношение call-put, записанное для опционов европейского типа. Найденная ставка  $r$  применяется для построения «улыбки волатильности», необходимой для выявления тех цен опционов, которые с наибольшей вероятностью будут исполнены «в деньгах».

Для численных расчетов используем данные по результатам торгов индексными опционами европейского типа на тайваньской бирже TAIEX, находящиеся в свободном доступе. Сроки исполнения опционов: май (05), июнь (06) 2019 года. Рассмотрим промежуток торгов с 1 по 16 апреля 2019 г. Для расчетов процентной ставки и волатильности были оставлены только те деривативы, торги по которым велись непрерывно: 4 контракта на майские опционы (05) с ценой исполнения от  $K = 10500$  до  $K = 10900$  и 5 контрактов на июньские опционы (06) с ценой исполнения от  $K = 10600$  до  $K = 11000$ .

Таб. 1. Результаты расчетов стохастической процентной ставки для майских опционов с  $K=10700$  и июньских опционов с  $K=10900$

	01 апр	02 апр	03 апр	08 апр	09 апр	10 апр	11 апр	12 апр	15 апр	16 апр
05	-0,0062	-0,01384	-0,0114	-0,0245	-0,0122	-0,0109	-0,0054	-0,0016	0,000314	-0,0031
06	-0,01293	-0,01841	-0,0151	-0,0334	-0,0191	-0,0167	-0,0128	0,02575	-0,00354	-0,0150

Отрицательное значение процентной ставки  $r$  указывает на переоцененность опционов. Для существования справедливой цены требуется, чтобы  $r$  составляла 5–8 % годовых. Так же опыт показывает, что отрицательная процентная ставка приводит к удорожанию текущих денег в будущем.

Анализируя абсолютные значения  $r$  можно сказать, что чем ближе момент исполнения опциона, тем выше процентная ставка. Это совпадает с теоретическими результатами, полученными в финансовой математике: чем выше неопределенность, тем выше цена дериватива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бельснер О.А., Крицкий О.Л., Трифонов А.Ю. [Текст]/ Бельснер О.А., Крицкий О.Л., Трифонов А.Ю. Модель динамических корреляций: общее приложение к исследованию финансовых рынков// Экономический анализ: теория и практика, 2012, – №39 (294). – С. 58-62.
2. Крицкий О.Л., Глик Л.А. [Текст]/ Крицкий О.Л., Глик Л.А. Выявление информированных трейдеров при внутриведенной торговле фьючерсами и их базовыми активами// Экономический анализ: теория и практика, 2014, – № 17 (368). – С. 60-68.

ИССЛЕДОВАНИЕ КИСЛОТНО-ОСНОВНЫХ ЦЕНТРОВ ПОВЕРХНОСТИ  
АЛЮМОСИЛИКАТОВ МЕТОДОМ ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКОГО ТИТРОВАНИЯ

Е.А. Сютова<sup>1</sup>, Л.А. Джигола<sup>2</sup>, О.С. Садомцева<sup>2</sup>, В.В. Шакирова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО Астраханский государственный медицинский университет,

414000 г. Астрахань, ул. Бакинская 141,

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Астраханский государственный университет, 414056, г. Астрахань, ул. Татищева 20А

E-mail: [elizoveta\\_ast@mail.ru](mailto:elizoveta_ast@mail.ru)

Исследование кислотно-основных свойств поверхности чрезвычайно важно для понимания химических, биологических, геохимических и биолого-почвенных процессов. Они позволяют выявить закономерности изменения кислотности в зависимости от условий получения и состава материалов.

Природные алюмосиликаты Астраханской области – опока Каменнаярского и мергель Баскунчакского месторождений являлись объектами исследования, т.к. представляют собой эффективные недорогие сорбенты. Разнообразие функциональных возможностей алюмосиликатов определяется их полиморфизмом и широким спектром поверхностных свойств, которые обусловлены наличием гидроксильно-гидратного покрова, образующегося при различных формах адсорбции молекул воды и других ионов. Проводили потенциометрическое титрование суспензий алюмосиликатов (Т:Ж=1:50). Математическую обработку данных проводили согласно алгоритму [1].

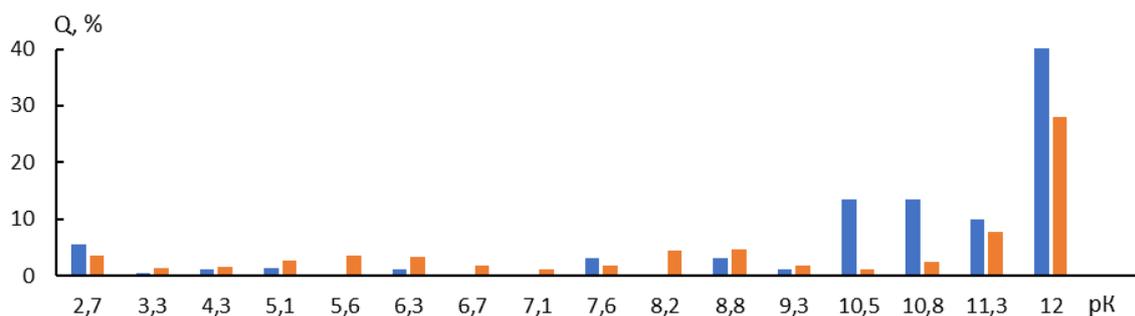


Рис. рК<sub>а</sub> спектры поверхности алюмосиликатов: 1 – опоки, 2 – мергеля

Анализ данных указывает на наличие небольшого количества основных центров и значительного содержания кислотных центров. Причем у минерала мергеля количество центров в диапазоне рН 10-12 почти в два раза меньше, чем у минерала опока. С целью изменения заряда поверхности возможно проводить щелочную или кислотную активацию воздействуя на область при рН 5,1-8,8. На поверхности мергеля суммарно присутствует 0,944 ммоль/г функциональных центров, опоки – 1.313 ммоль/г [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пахнутова Е.А., Слизов Ю.Г. Кислотно-основные свойства поверхности газохроматографических сорбентов с привитыми слоями хелатов металлов // Журнал физической химии. 2014. Т. 88. - № 7-8. С. 1228–1232. DOI: 10.7868/S0044453714080226.
2. Пухов И.Г., Смирнова Д.Н., Ильин А.П., Смирнов Н.Н. Исследование кислотно-основных свойств поверхности углеродных адсорбентов методом потенциометрического титрования // Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. - № 12. - С. 17–122.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА  
ЛОКАЛЬНОГО РАСТВОРЕНИЯ ХРОМОНИКЕЛЕВЫХ СТАЛЕЙ

Р.Ф. Тагиева, С.С. Виноградова

Казанский государственный энергетический университет,

Россия, г. Казань, ул. Красносельская, 51, 420034

E-mail: [ram89\\_89@mail.ru](mailto:ram89_89@mail.ru)

Нержавеющие стали и другие коррозионностойкие сплавы обычно защищены от окружающей среды ультратонкими слоями поверхностных оксидов – пассивными пленками, подверженным локальному растворению – питтинговой коррозии. Для описания динамики процесса применяют методы математического моделирования, где в качестве исходных данных выступают результаты поляризационных исследований [1]. Различают детерминированные [2], вероятностные [1, 3, 4] и смешанные математические модели [5]. Процессы питтинговой коррозии могут быть разделены на инициацию, зарождение метастабильных питтингов и распространение или поддержание стабильности роста питтинга. Колебания тока при поляризационных исследованиях сигнализируют о начале процесса питтингообразования, временного роста и прекращения роста метастабильных питтингов. Постоянно увеличивающийся ток свидетельствует о формировании питтингов и их распространение. Анализ колебаний тока позволил выявить связь частоты иницирования метастабильных питтингов с частотой образования устойчивых питтингов, а также получить частотные характеристики (граничные и резонансные частоты) процесса локального растворения хромоникелевых сталей.

В работе предложены аналитические и имитационные модели локального растворения в условиях гальваностатической и потенциостатической поляризации, учитывающие процессы повторной активации и пассивации поверхности металла внутри развивающегося метастабильного питтинга. В результате введения функциональной зависимости между частотами зарождения и пассивации питтингов предложен алгоритм и рассчитаны характеристики питтингостойкости нержавеющей сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shibata T. Birth and death stochastic process in pitting corrosion and stress corrosion cracking // The Electrochemical Society. – 2013. – V.31. – No 3. – pp. 13-20.
2. Thamida S.K. Modeling and simulation of galvanic corrosion pit as a moving boundary problem // Computational Materials Science. – 2012. – V. 65. - No. 4. – pp. 269–275.
3. Valor F. Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits // Corrosion Science. - 2007. – V.49. – No. 2. – pp. 559–579.
4. Melchers R.E. Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure // Reliability Engineering & System Safety. – 2008. – V.96. – No. 3. – pp. 423–432.
5. Caley F. Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines // Corrosion Science. – 2009. - V. 51. – No. 9. – pp. 2197–2207.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОРТФЕЛЯ КРИПТОВАЛЮТ С ПОМОЩЬЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ РИСКА

Е.К. Фокина, О.Л. Крицкий

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ek.fokina@bk.ru](mailto:ek.fokina@bk.ru)

Классический подход Марковица имеет ряд недостатков в современной банковской и финансовой сферах. В данной работе предлагаемый к рассмотрению подход лишен этих недостатков. В рамках данного исследования, метод Марковица, с помощью пакета программного обеспечения IBM CPLEX Optimization Studio 12.8.0, сводится к решению последовательности задач линейного программирования.

Настоящая работа посвящена исследованию формирования инвестиционного портфеля, состоящего из котировок валютных пар, с использованием предельной величины риска VaR.

Пусть  $x_i = \sum_{j=1}^K \lambda_j r_{i,j}$  – наблюдаемая доходность портфеля, состоящего из  $K$  валютных пар с  $r_{i,j}$  – наблюдаемыми доходностями  $R_j$  (где  $R_j$  – случайная величина, представляющая собой относительную доходность) и долями  $\lambda_j$ .

Модель формирования оптимального портфеля с ограничением по величине риска VaR (метод Бенати – Рицци), при фиксированном на уровне  $\alpha$  задана в виде [1]:

$$\begin{aligned} & \max_{\lambda, x, y} \sum_{i=1}^T p_i x_i, \\ & x_i = \sum_{j=1}^K \lambda_j r_{i,j}, 1 \leq i \leq T, \\ & x_i \geq r_{\min} + (r_{VaR} - r_{\min}) y_i, 1 \leq i \leq T, \\ & \sum_{i=1}^T p_i (1 - y_i) \leq \alpha, \\ & y_i \in \{0, 1\}, 1 \leq i \leq T, \\ & \sum_{j=1}^K \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $r_{VaR}$  – относительная доходность портфеля, задаваемая его управляющим,  $r_{\min} = \min\{r_{i,j}\}$  – минимальный уровень доходности для всех составляющих портфель активов. В данной модели подбираем целочисленный параметр  $y_i$  из того, условия, чтобы доходность  $x_i$  в  $i$  – момент времени была больше, чем минимальная доходность на рынке.

Произведя сравнение доходностей и стоимостей полученных портфелей двумя разными методами, а также используя полученные оценки выборочных  $\hat{\alpha}$  «альфа» и статистические гипотезы, был сделан вывод, что портфели управляются эффективно, и в переформировании не нуждаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малеева Е.А., Бельснер О.А., Крицкий О.Л. Формирование портфеля ценных бумаг с использованием предельной величины риска // Финансы и кредит: научно – практический журнал. – 2018. – Т. 24, № 12, С. 2708 – 2720

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ ВВЭР-1000  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SOLIDWORKS

Р. С. Шурыгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Е-mail: [rss7@tpu.ru](mailto:rss7@tpu.ru)

Важной задачей для мирного атома является повышения эффективности работы АЭС, которая в первую очередь связана с разработкой новых улучшенных видов ядерного топлива. Это приводит к необходимости моделирования изменений теплофизических параметров активной зоны при переходе от традиционных топливных композиций к новым, перспективным.

При переходе к топливу нового поколения важной задачей является расчет изменения теплофизических параметров реакторной установки. Промышленное моделирование стало очень популярным и важным инструментом, так как помогают делать предварительные прогнозы с наименьшими физическими и материальными затратами, минимальными рисками. В работе производился расчет термодинамической задачи ВВЭР-1000 с использованием САПР SolidWorks.

Расчетная часть работы производилась в два этапа с целью анализа установившегося стационарного температурного поля в ячейке.

Осуществлялось моделирование тепловыделяющего элемента (ТВЭЛ) реактора ВВЭР для проверки верности расчета. Первичный расчет ВВЭР-1000 проводился без центрального отверстия для газового слоя в условиях сжимаемой жидкости, как текучей среды. Следующий шаг анализа ТВЭЛа ВВЭР-100 проводился с применением центрального отверстия для газового слоя в условиях обычной воды. Результаты температурных полей ТВЭЛа для разных случаев сведены в таблицу 1.

Таб. 1. Результаты теплогидравлического расчета ТВЭЛа

Температуры, max/min °С	ВВЭР-1000	С отверстием	Без отверстия
наружная для таблетки	604/414	930/490	990/740
внутренняя для таблетки	1500/620	1200/660	1395/990
на внешней стороне оболочки твэла	350/-	340/305	350/305
на внутренней поверхности оболочки	410/-	500	490

Большие значения температур в случае отсутствия газового отверстия в топливной таблетке, нежели в случае его применения. Безусловно данная модель требует корректировки параметров тепловыделения, потоков и скорости течения с целью достижения наибольшего сходства с реальной картиной. Однако, картина довольно близка с теплофизической картиной при работе реактора, что дает возможность как для последующего использования программы для теплогидравлических расчетов [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колпаков Г. Н., Селиваникова О. В. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов. – Томск: Издательство Томского Политехнического Университета, 2009. – 118 с.

A THREE-STEP NUMERICAL APPROXIMANT BASED ON BLOCK HYBRID  
BACKWARD DIFFERENTIATION FORMULA FOR STIFF SYSTEM  
OF ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS

U. Mohammed<sup>1</sup>, B.G. Akintububo<sup>1</sup>, M.E. Semenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Technology

P. M. B 65, Gidan-Kwanu, Minna-Bida Road, Niger State, Nigeria

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Leninaave., 30, 634050

E-mail: [umarumohd@futminna.edu.ng](mailto:umarumohd@futminna.edu.ng)

Mathematical modelling involving stiff systems [1] is widely applicable in the field of science, engineering and technology [2]. Most of these models come as ordinary differential equations (ODEs) or system of ODEs that scientists, engineers and technologists must solve. However, many of these models defy analytic approaches in their solution. As a result, research into numerical approach to solving problems of stiff systems is a worthwhile undertaking.

In this paper, we present a three-step numerical approximant based on block hybrid backward differentiation formula (BDF) [1, 3] for the solution of stiff systems of ODEs. The ordinary differential equation has been formulated through continuous collocation approach using Legendre polynomial as basis function. Three off-grid points were incorporated at interpolation in order to retain the single function evaluation characteristic, which is peculiar to BDF. The basic properties of numerical methods were analyzed and the method was found to be consistent with a uniform order six and error constants

$$C = \left( -\frac{159}{448} \quad -\frac{81}{224} \quad -\frac{501}{896} \quad -\frac{177}{224} \quad -\frac{1035}{448} \quad -\frac{15}{224} \right)^T,$$

zero-stable and as such, convergent.

The region of absolute stability of the method was analyzed using the general linear method, plotted and found to be stable over a large region. The method computes the solution of stiff of systems ODEs in a block by block way by some discrete schemes obtained from the associated continuous scheme which are combined and implemented as a set of block formulae which is able to produce approximations  $y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}$  for given  $y_n$ .

Numerical experiments were carried out and the results obtained, in comparison with the exact or analytical solutions and some methods found in literatures, show that the methods are efficient and accurate.

#### REFERENCES

1. Gear C. W. (1971) Numerical initial value problems in ordinary differential equations, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
2. Peles O., Turkel E. (2018) Acceleration methods for multi-physics compressible flow, Journal of Computational Physics, Vol. 358, pp. 201-234.
3. Wu H., MaP.C., IhmeM. (2019) Efficient time-stepping techniques for simulating turbulent reactive flows with stiff chemistry, Computer Physics Communications, Vol. 243, pp. 81-96.
4. Butcher J. C. (2016) Numerical Methods for Ordinary Differential Equations, New York, John Wiley and Sons.

**A THREE-STEP EXTENDED BLOCK HYBRID BACKWARD DIFFERENTIATION FORMULA FOR STIFF SYSTEM OF SECOND ORDER ORDINARY DIFFERENTIAL EQUATIONS**

K. T. Shiawoya<sup>1</sup>, U. Mohammed<sup>1</sup> and M.E. Semenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Technology, Minna, Nigeria

P. M. B 65, Gidan-Kwanu, Minna-Bida Road, Niger State, Nigeria

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenina ave., 30, 634050

E-mail: [kateshiawoya@gmail.com](mailto:kateshiawoya@gmail.com), [umaru.mohd@futminna.edu.ng](mailto:umaru.mohd@futminna.edu.ng)

A stiff equation is a differential equation for which certain numerical methods for solving the equation are numerically unstable, unless the step size is taken to be extremely small. It has proven difficult to formulate a precise definition of stiffness, but the main idea is that the equation includes some terms that can lead to rapid variation in the solution

A three-step extended block hybrid backward differentiation formula is proposed for the stiff system of second order ordinary differential equations. This process compute the solution of stiff system in a block by block fashion by some discrete schemes obtained from the associated continuous schemes which are combined and implemented as a set of block formulae. Numerical experiments show that the method is suitable for stiff differential equations.

ABOUT CREATION OF ELECTRICALLY CONTROLLED FILTERS OF MICROWAVE, SUBTHZ AND THZ-BANDS ON THE BASE OF GRAPHENE-AND-DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE

I.A. Smirnov, E.A. Zhebrun, L.V. Cherkesova

Don State Technical University,

Russia, Rostov-on-Don city, Gagarin square, 1, 344000

E-mail: [terran.doatk@mail.ru](mailto:terran.doatk@mail.ru)

Development of methods and means of generation/reception of microwave, Sub-THz and THz frequency bands is associated with creation of high-speed radioelectronics based on graphene and carbon nanotubes. The aim of such research is to develop highly efficient tunable nanophotonics devices for signal processing, using new principles, materials and structures. The creation of transmission lines, filters, parametric generators and amplifiers based on graphene are promising are prospective. However, to date, physical phenomena and effects in graphene nanostructures have studied very poorly, while there are no engineering methods for calculating devices, which is the main difficulty in creating new generation of devices with element base line ground on graphene.

For investigation of new nanoscale properties and functional capabilities of devices based on nanostructured materials and components – microresonators, transmission lines, antennas – in microwave (SHF), Sub-THz and THz bands, the unified approach to their mathematical modeling is required. To overcome the limitations associated with the methods of calculation and design, the authors are based on the ideas of computational electrodynamics, successfully implemented in computer-aided modeling and design systems in the microwave (SHF) arrangement. Thus, the structure of graphene-based low-pass filter of N-th order consists of graphene strip and several polysilicon gate pads located below. The strip promotes to the distribution of localized transverse magnetic plasmons. The report investigates the plasmon filters based on single- and double-layer doped graphene metasurfaces in the microwave, Sub-THz and THz ranges, using the finite differences in time domain method (FDTD). For modelling of the experimental investigated sample it was applied the periodic boundary conditions in x and y directions. Figure 1 shows the modelling results – the frequency dependences of the transmission coefficient of plane wave through single-layer and two-layer structures from symmetric nano tapes of graphene for different values of the chemical potential  $\mu_c$  (the Fermi energy). Almost perfect filtration (when  $T_{min} \leq 3\%$ ) is achieved in the tuning range.

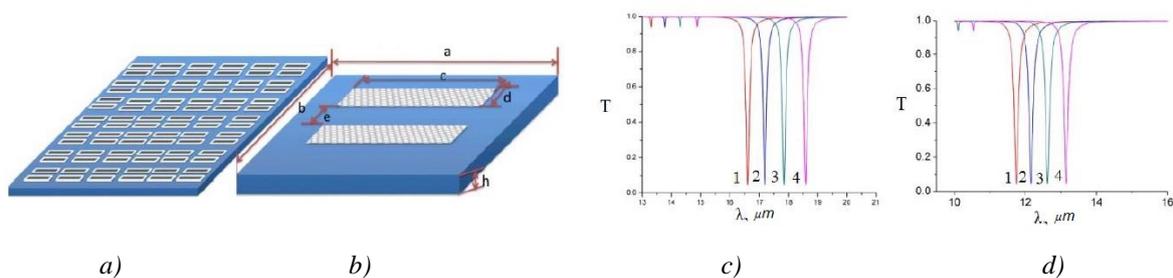


Fig. 1. Plasmonic rejective filter based on graphene meta-surface (a); structure of elementary cell of meta-surface, consisting of two symmetric nano-tapes of graphene (b); the frequency dependences of transmission coefficient through the filters based on single- (c) and double-layer (d) structures of symmetric graphene nano-tapes for the various magnitudes of chemical potential.

Curves: 1)  $\mu_c = 0.6$  eV, 2)  $\mu_c = 0.56$  eV, 3)  $\mu_c = 0.52$  eV, 4)  $\mu_c = 0.48$  eV.

The modelling results demonstrate that significant shifts of the resonance frequency can be achieved with small changes in the concentration of the doping of graphene nano tapes.

Metasurfaces with symmetric single-layer or asymmetric double-layer graphene can be used as highly sensitive refractive sensors with sensitivity up to 5100 nm, and dual-circuit switches. These prospects pave the way for the creation of super-fast plasmon devices based on graphene in microwave, Sub-THz and THz bands.

Investigation was carried out at expense of grant of Russian Science Foundation (project No. 18-79-10109).

#### LIST OF REFERENCIES

1. Chen P.-Y., Soric J., Padooru Y.R., etc. "Nanostructured Graphene Meta-Surface for Tunable Terahertz Cloaking" // *New Journal of Physics*. – 2013. – Vol. 15. – Pp. 123029.
2. Fallahi A., Perruisseau J. "Design of Tunable Biperiodic Graphene Metasurfaces" // *Physical Review*. – 2012. – Vol. 86. – Pp. 195408.
3. Zhang Y., Feng Y., Zhu B., etc. "Graphene Based Tunable Meta-Material Absorber and Polarization Modulation in Terahertz Frequency" // *Optics Express*. – Vol. 22, 19. – Pp. 22743–22752.
4. Chernozatonskiy L.A., Sorokin P.B., Artyukh A.A. "New Graphene-Based Nanostructures: Physico-Chemical Properties and Applications" // *Advances in chemistry (Uspekhi khimii)*. – 2014. – Pp. 251–279. (In Russian).
5. Isaev V.M., Kabanov I.N., Komarov V.V., etc. "Modern Radioelectronic Systems of THz Range" // *Reports of TUSUR*. – № 4 (34). – 2014. Tomsk – P. 5 – 21. (In Russian).
6. Kivshar Y.S. *From Meta-Materials to Meta-Surfaces and Meta-Devices* // *Nanosystems: Physics, Chemistry, and Mathematics*. – 2015. – Vol. 6. – No 3. – Pp. 346–352.
7. Shi S.F., Zeng B.S., Han H.L., etc. *Optimizing Broadband Terahertz Modulation with Hybrid Graphene Meta-Surface Structures* // *Nano Letters*. – 2014. – No 15. – Pp. 372–377.
8. Innocenti R.D., Jessop D.S., Shah Y.D., etc. *Terahertz Optical Modulator Based on Meta-Material Split Ring Resonators and Graphene* // *Optical Engineering*. – 2014. – Vol. 57, No 108. – Pp. 1–5.
9. Golovanov O.A. "Diffraction on the Nonlinear Dielectric in the System of Connected Strip Lines" // *Radio Engineering (Radiotekhnika)*. – 1991. – No 7. – Pp. 65–70. (In Russian).
10. Horng J., Chen C.-F., Geng B., etc. *Drude Conductivity of Dirac Fermions in Graphene* // *Physical Review*. – 2010. – Vol. 83. – P. 165113.

MATHEMATICAL MODELLING OF ELECTRICALLY CONTROLLED FILTERS  
OF MICROWAVE, SUBTHZ AND THZ-BANDS ON THE BASE OF  
GRAPHENE AND DIELECTRIC MULTILAYER STRUCTURE

I.A. Smirnov, E.A. Zhebrun, L.V. Cherckesova, D.V. Kleimenkin

Don State Technical University,

Russia, Rostov-on-Don city, Gagarin square, 1, 344000

E-mail: [terran.doatk@mail.ru](mailto:terran.doatk@mail.ru)

The high mobility of charge carriers in graphene makes it promising and prospective material for using for various applications as a future base for nanoelectronics and possible replacement of silicon in integrated circuits, and contributes to the creation of radioelectronic devices and arrangements microwave, Sub-THz and THz-bands. Progress in the production and formation of curly graphene represents great opportunities to create tunable microwave, Sub-THz, THz metamaterials and integrated plasmonic devices with potential applications in the filters and polarizers.

In this report investigated the graphene metasurfaces for transmission of radiation, induced by plasmons in the THz range, whose cell consists of structure based on a graphene ring and graphene nanotape. As graphene rings, and graphene nanotapes create regimes of transmittance – transparency windows induced by electric dipole resonances. Weak hybridization between this two elements results to appearance of new transparency window induced by plasmons that can be controlled by changing the geometric dimensions of the graphene-based metasurfaces cell structure. The resonance frequency of the transparency window can be dynamically rearranged over wide band of THz frequencies, altering the chemical potential (Fermi energy) of graphene by applying of an external electric field instead of re-fabricating the nanostructures.

Figure 1 shows the graphene-based metasurfaces cell structures to demonstrate the phenomena of Plasmon-induced radiation. The main unit cell of the metasurfaces consists of graphene ring and graphene nanotape. The inner and outer radii of the graphene ring are  $r_1 = 2 \mu\text{m}$  and  $r_2 = 3.2 \mu\text{m}$ . The length of the nanotape is  $L=9$  microns, and the width is  $W = 0.7$  microns. The dielectric substrate is photopolymer with relative permittivity  $\epsilon = 2.4$  and thickness  $h = 0.5 \mu\text{m}$ . The structure is located along the  $x$  and  $y$  directions with period  $p = 10$  microns. The incident wave is perpendicular to  $x$ - $y$  plane with  $E_x$  polarization.

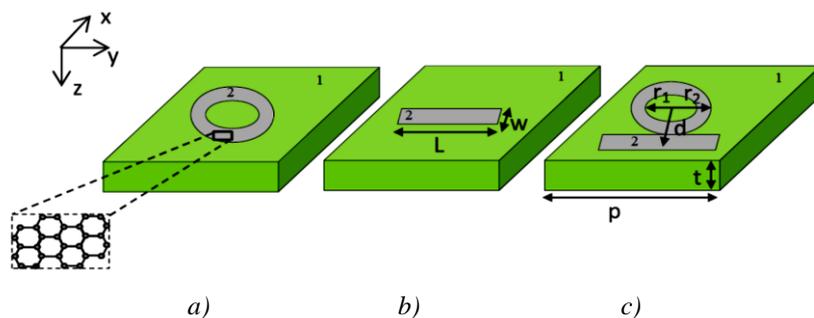


Fig. 1. Meta-surfaces cells of different configurations:

graphene ring operating in the one regime of window spectral transparency for the radiation, induced by plasmons (a), graphene nanotape, operating in the second regime of window spectral transparency (b), the element of metasurface from the graphene ring and graphene nanotape (c)



Mathematical modeling for numerical investigation of the influence of geometric dimensions of the nanostructure on the response of THz radiation induced by plasmons is carried out. With increasing length  $L$  of the nanotape resonance ( $f = 1.68$  THz) is rapidly changing to lower THz frequencies.

From the modelling and simulation results it follows that the studied periodic layered graphene and dielectric nanostructures can be used for the creation of wide-band THz-band filters of planar design, controlled by electric field, and quickly tunable with small changes in the energy level Fermi of graphene.

Investigation was carried out at expense of grant of Russian Science Foundation (project No. 18-79-10109).

#### LIST OF REFERENCES

1. Yan H., Li X., Chandra B., etc. Tunable Infrared Plasmonic Devices Using Graphene / Insulator Stacks // *Nature Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 7, No. 5. – Pp. 330–334.
2. Khromova I., Andryeuskii A., Lavrinenko A., etc. Multilayer Graphene for Waveguide Terahertz Modulator // *Meta Conference*. – Singapore, 2014. – P. 3 – 7.
3. Li H.-J., Wang L.-L., Zhang H., etc. Graphene-Based Mid-Infrared, Tunable, Electrically Controlled Plasmonic Filter // *Applied Physics Express*. – 2014. – Vol. 7 (2). – Pp. 024301–1–024301–4.
4. Zhongchao W., Xianping L., Jianjun Y., etc. Active Plasmonic Band-Stop Filters Based on Graphene Meta-Material at THz Wavelengths // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24 (13). – Pp. 14344 –143451.
5. Zhang H., Cao Y., Liu Y., etc. A Novel Graphene Meta-Material Design for Tunable Terahertz Plasmon Induced Transparency by Two Bright Mode Coupling // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 391. – Pp. 9–15.
6. Wang, J., Wang Y, Hu X., etc. Recent Advances in Graphene-Assisted Nonlinear Optical Signal Processing // *Journal of Nanotechnology*. – 2016. – Vol. 2016. – Pp. 275–292.
7. Wu Y., Yao B.C., Feng Q.Y., etc. Generation of Cascaded Four-Wave-Mixing with Graphene-Coated Microfiber // *Photonics Research*. – 2015. – Vol. 3, No. 2. – Pp. 64–68.
8. Ji M., Cai H., Deng L., etc. Enhanced Parametric Frequency Conversion in Compact Silicon-Graphene Micro-Ring Resonator // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, No. 14. – Pp. 18679–18685.
9. Sun Y., Qiao G. Direct Generation of Graphene Plasmonic Polaritons at THz Frequencies via Four Wave Mixing in the Hybrid Graphene Sheets Waveguides // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, 23. – Pp. 22880–27891.
10. Golovanov O.A. “Autonomous Blocks with Virtual Floquet Channels and Their Application for Solving Applied Problems of Electrodynamics” / O. A. Golovanov // *Radio Engineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*. – 2006. – Vol. 51, No 12. – Pp. 1423 – 1430. (In Russian).
11. Golovanov O.A., Makeeva G.S., Varenitsa V.C., etc. “Electrodynamic Calculation of Transmission Coefficients of the TEM-Wave through the Multilayer Periodic Structures Monolayer of Type “Graphene-Dielectric” in THz range” // *Izvestiya vuzov. Volga region*. – 2014. – No. 4 (32). – Pp. 123 – 137 (In Russian).

DERIVATION OF BLOCK NYSTRÖM TYPE METHOD WITH ONE-OFF-STEP POINT  
FOR THE SOLUTION OF TWO POINT BOUNDARY VALUE PROBLEMS  
WITH ROBIN BOUNDARY CONDITION

E.A. Unoko<sup>1</sup>, U. Mohammed<sup>1</sup> and M.E. Semenov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Technology, Minna, Nigeria

P. M. B 65, Gidan-Kwanu, Minna-Bida Road, Niger State, Nigeria

<sup>2</sup>Tomsk Polytechnic University,

Russia, Tomsk, Lenina ave., 30, 634050

E-mail: [unoko04@gmail.com](mailto:unoko04@gmail.com), [umaru.mohd@futminna.edu.ng](mailto:umaru.mohd@futminna.edu.ng)

In this article, we proposed a modified block Nyström type integrators for the numerical solution of boundary value problems with Robin boundary conditions. The proposed method solves the ordinary differential equations (ODEs) directly without reducing the ODE into an equivalent first order system.

The proposed block Nyström method is formulated from its continuous scheme that is constructed from an appropriate power series via collocation and interpolation techniques. The convergence analysis of the proposed method is carried out and it is shown that the method is consistent, zero-stable and convergence. The accuracy of the method is demonstrated by comparing with existing method found in the literature. Other form of problems associated with initial value problem can be solved by adjusting the boundary condition in the algorithm.

## СЕКЦИЯ 4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТАБЛЕТОК НА ОСНОВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА ДЛЯ СОРБЦИИ ВОДОРОДА

Д.Е. Адильханов, Р.Г. Бабаев, Е.А. Борецкий, Д.Г. Видяев  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [vidyaevdg@tpu.ru](mailto:vidyaevdg@tpu.ru)

В области энергоносителей основное внимание уделяется возобновляемым источникам (ВИ) энергии [1]. Хотя запасы энергии ВИ можно считать неограниченными, возникает необходимость сохранения накопленной энергии в течении длительного времени. Одним из способов сохранения энергии является использование накопителей, в которых энергия сохраняется в химической форме. К таким накопителям можно отнести водород, на производство которого требуется совершить определенные затраты энергии, после чего он может длительное время храниться. Преимущества водорода состоят в возможности его применения, как в традиционных бензиновых двигателях внутреннего сгорания, так и в топливных ячейках, где при взаимодействии с кислородом образуется вода и выделяется электрическая энергия.

Важной проблемой на пути распространения водородного топлива является создание способа хранения водорода, при котором будет обеспечиваться невозможность его детонации в случае разгерметизации системы хранения, и экономическая оправданность предлагаемого способа.

На сегодняшний день перспективными накопителями водорода считаются различные порошковые углеродные материалы, выступающие в качестве сорбентов. Применение порошков в свою очередь имеет ряд недостатков, в частности: меньшая, по сравнению с компактируемыми формами, удельная площадь контакта газа с сорбентом; низкая плотность сорбента; большое гидравлическое сопротивление при насыщении порошков газом; негативное воздействие на работу топливной системы за счет ее загрязнения мелкодисперсным сорбентом. В связи с этим возникает необходимость в разработке методики создания таблеттируемых форм хранения водорода на основе углеродных сорбентов. В данной работе приведены результаты исследования параметров таблеток на основе технического углерода, полученных при различных условиях прессования углеродных пресс-порошков, отличающихся содержанием вспомогательных компонентов.

В результате работы определена зависимость плотности получаемых углеродных таблетках от давления прессования и состава пресс-порошка и найдено предельное значение плотности. Установлено, что добавление порообразователей способствует развитию удельной поверхности и пористости таблетки. При этом наибольшее увеличение объёма пор наблюдалось при добавлении к углероду в качестве вспомогательного материала 7 % стеарата никеля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyle G. Renewable energy //Renewable Energy, by Edited by Godfrey Boyle, pp. 456. Oxford University Press, May 2004. ISBN-10: 0199261784. ISBN-13: 9780199261789. – 2004. – С. 456.
2. Видяев Д.Г., Савостиков Д.В., Селянин А.С., Сидоркин А.С. О кинетике сорбции водорода наноструктурными композитными материалами // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т.56. № 11/3. – С. 280–283.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Nd–Sm–Mg–O»

Д.В. Андреев, А.С. Пшеничников, Р.Г. Бабаев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dva17@tpu.ru](mailto:dva17@tpu.ru)

Применяемое в реакторах на тепловых нейтронах керамическое ядерное топливо (ЯТ) из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, имеет ряд существенных недостатков: низкая теплопроводность, высокая хрупкость и склонность к растрескиванию, короткий цикл использования, ограниченный ресурс изотопа уран-235.

Приоритетным направлением развития ядерной энергетики в России является создание АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, использующих дисперсионное ЯТ в виде сложных оксидных композиций из делящихся материалов, размещенных в матрице с высоким коэффициентом теплопроводности и низким поглощением нейтронов [1].

Традиционные технологии раздельного получения оксидов делящихся металлов (уран, плутоний) и матрицы приводят к удорожанию технологии получения дисперсионного ЯТ. При этом плазменная переработка смешанных водных нитратных растворов (ВНР) для плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций (ТОК) имеет следующие достоинства: одностадийность и высокая скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования. Однако плазменная переработка только растворов ВНР требует значительных затрат электрической энергии (до 4,0 кВт·ч/кг), а существенное их снижение (до 0,1 кВт·ч/кг) может быть достигнуто при плазменной переработке оптимальных по составу водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих растворы ВНР и органический компонент (спирты, кетоны) [2].

В работе представлены результаты моделирования процесса плазмохимического синтеза ТОК «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-MgO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы неодима, самария, магния и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций различного состава «оксид неодима–оксид самария–оксид магния».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для уран-плутониевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Ivan Novoselov, Alexander Karengin, Igor Shamanin, Evgeny Alyukov, Alexander Gusev. Plasmachemical Synthesis of Nanopowders of Yttria and Zirconia from Dispersed Water-Salt-Organic Mixtures // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1938, Article number 020010. – p. 1-7.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ ИЗОТОПОВ С ПОВЕРХНОСТИ  
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

И.В. Банников, Д.М. Хорохорин

Научный руководитель - В.Ф. Мышкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dmh1@tpu.ru](mailto:dmh1@tpu.ru)

Известно, что поверхность любого твердого тела «химически» активна из-за наличия неспаренных электронов. Поэтому все поверхности сорбируют атомы и молекулы и притягивают твердые наночастицы других материалов.

Очистку поверхности твердых тел от сорбированных молекул газа возможна лишь при нагреве в вакууме. Традиционным методом очистки поверхности от дисперсных частиц является мытье с помощью растворов поверхностно-активных веществ. Однако, не все конструкционные элементы возможно окунать в раствор или протирать раствором. Поэтому цель исследований – поиск оптимальной интенсивности лазерного излучения, позволяющей испарять с поверхности наночастицы оксида урана и незначительно влияющей на целостность обрабатываемой поверхности.

Процессы, протекающие на поверхности, определяются балансом поглощаемой энергии и потерей тепла за счет теплопроводности поверхности, теплового излучения, уносом тепла паром. Рассмотрим некоторые явления. Эффективность поглощения твердыми телами энергии лазерного излучения определяется мнимой частью показателя преломления. При этом излучательные потери тепла определяются температурой поверхности и коэффициентом черноты. Потеря тепла наночастицами за счет теплопроводности определяется площадью контакта с поверхностью объемного тела и не является превалирующей. Также необходимо учитывать возможность экранирования подводимой лазерной энергии облаком пара, образующимся из материала наночастицы.

Выполняли расчет теплового баланса наночастицы, находящейся на гладкой плоской поверхности металла. Известно, что мнимая часть показателя преломления объемного твердого тела, а поэтому и эффективность поглощения лазерного излучения определяются длиной волны. Для расчета теплопередачи поверхности твердого тела используется коэффициент черноты. Формула для поглощаемой и излучаемой поверхностью твердого тела энергии

$$E_1 = I \varepsilon S \Delta t,$$

где  $I$  – интенсивность лазерного излучения,  $S$  – площадь лазерного пятна,  $\varepsilon$  - степень черноты.

Энергия, поглощаемая наночастицей

$$E_2 = I \sigma s \Delta t,$$

где  $\sigma$  - фактор эффективности взаимодействия излучения с наночастицей,  $s$  - площадь сечения частицы,  $\Delta t$  – длительность импульса.

Считая, что излучение поглощается в слое  $\lambda/3$ , где  $\lambda$  - длина волны лазерного излучения, температура, до которой разогревается металл после одного импульса

$$\Delta T_1 = \frac{3E_1}{\rho_1 S \lambda c_1},$$

где  $\rho$  - плотность,  $c$  – удельная теплоемкость металла. Аналогично для наночастицы

$$\Delta T_2 = \frac{3E_2 \pi^{2,5}}{4\rho_2 c_2 s^{3,5}},$$

Необходимым условием является нагрев металла ниже температуры плавления, а энергия, поглощаемая наночастицей должна быть достаточна для её нагрева до температуры кипения и полного испарения. При проведении оценочных расчетов, при использовании лазерных импульсов длительностью менее  $10^{-6}$  с, потерями энергии за счет теплопроводности можно пренебречь.

В докладе приводятся анализ данных о температурах Zr, Sc, Ni, Cd, а также частиц оксидов урана и плутония на длинах волн серийно выпускаемых лазеров при различных интенсивностях лазерного излучения. Анализируются методы удаления паров материала наночастиц, предотвращающих повторное загрязнение.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Sm–Ce–Mg–O»

В.И. Басс, И.Ю. Загузин, И.Ю. Новоселов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vadim2@tpu.ru](mailto:vadim2@tpu.ru)

При использовании изотопов торий-232 и плутоний-239 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении урана по изотопу уран-235, а использование ЯТ из оксидных композиций плутония и тория даст возможность создания сверхмалых (до 10 МВт) и малых (до 100 МВт) энергетических установок для использования в удаленных и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах. При этом у такого ЯТ остается недостаток – низкая теплопроводность.

Перспективным является использование дисперсионного ЯТ в виде сложных оксидных композиций из дефицитных материалов, размещенных в матрице с высоким коэффициентом теплопроводности и низким поглощением нейтронов [1].

К преимуществам применения плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций для дисперсионного ЯТ из водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих водные нитратные растворы (ВНР) и органический компонент (спирты, кетоны и др.), следует отнести: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования и снижение энергозатрат (до 0,1 кВт·ч/кг) [2].

В работе представлены результаты моделирования процесса плазмохимического синтеза композиций «PuO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы самария, церия, магния и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций «оксид самария–оксид церия–оксид магния».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для плутоний-ториевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Karengin, A. G. Calculation and optimization of plasma utilization process of inflammable wastes after spent nuclear fuel recycling / A. G. Karengin, A. A. Karengin, I. Y. Novoselov, N. V. Tundeshev // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 433-436.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО ЭФФЕКТА ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ИЗ ВОДНОГО РАСТВОРА

А.Р. Бережная, А.В. Проценко

Научный руководитель: В.Ф. Мышкин

Томский политехнический университет, 634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: [arb13@tpu.ru](mailto:arb13@tpu.ru)

Изотопы находят все большие перспективы применения во многих отраслях. Себестоимость современной изотопной продукции очень высока из-за использования в технологиях разделения изотопов незначительных по величине изотопных эффектов. Поэтому для многих применений стоимость изотопной продукции, получаемой по традиционным способам разделения (центрифужный, газодиффузионный, электромагнитный), очень высока. Поэтому актуальна задача разработки новых энергоэффективных способов получения обогащенных по изотопам материалов.

Известны изотопные эффекты при кристаллизации растворов. При этом однократный коэффициент обогащения небольшой.

Мы выращивали кристаллы NaCl при периодическом воздействии постоянным магнитным полем на пересыщенный водный раствор NaCl, а также без магнитного поля. Фотографии получаемых на дне кюветы кристаллов приведены на рисунке 1.



Рис. 1. Кристаллы NaCl, формируемые при  $a - B = 0$  мТл.

Известно, что на вновь формирующейся поверхности существует значительное количество неспаренных электронов. В пересыщенном растворе увеличивается концентрация недиссоциированных молекул. При этом на поверхности растущего формируются радикальные пары. Поэтому постоянное магнитное поле может влиять на относительную скорость кристаллизации разных изотопов.

Для кристаллизации использовали отстоявшийся раствор объемом 200 мл. Раствор поддерживали при температуре 32°C в замкнутом объеме, а образующиеся пары воды удаляли путем конденсации на охлаждаемой поверхности. За время 6 часов испарилось 5-6 мл воды из раствора. Получаемые кристаллы NaCl высушивали, перетирали и изучали методом рентгеновской дифракции. Дифрактограммы для кристаллов, выращиваемых при воздействии магнитным полем, уширены из-за наличия второго максимума, смещенного в сторону меньших углов. Наличие дополнительного максимума связано с наличием областей, в выращиваемых кристаллах, с разным содержанием изотопов хлора. Рефлекс на угол 31,81° соответствует

кристаллам с равномерным (природным) распределением изотопов. Природный натрий имеет один изотоп, а хлор содержит два изотопа –  $^{35}\text{Cl}$  и  $^{37}\text{Cl}$ . Поэтому можно предполагать, что рефлекс на угол дифракции  $31,57^\circ$  обусловлен кристаллами с более высоким содержанием изотопа  $^{37}\text{Cl}$ , чем в природном соединении.

В докладе приводится анализ процессов, протекающих на поверхности растущего кристалла и в объеме пересыщенного раствора при воздействии постоянным слабым магнитным полем разной величины. Показано, что изотопная селективность процесса кристаллизации может быть значительно увеличена в магнитном поле при медленном испарении воды, когда диффузия определяет распределение изотопов по объему раствора.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Nd–Ce–Be–O»

К.И. Берестов, А.Е. Тихонов, А.А. Каренгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mihailkorobko@mail.ru](mailto:mihailkorobko@mail.ru)

Традиционные технологии получения топливных оксидных композиций (ТОК) для дисперсионного ЯТ (термическое разложение солей металлов, восстановление оксидов, электролитическое получение из расплавленных солей, золь-гель процесс) являются: многостадийность, высокая стоимость переработки сырья, неравномерное распределение фаз в продукте, необходимость использования большого количества химических реагентов [1].

К преимуществам плазмохимического синтеза ТОК из водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих водные нитратные растворы (ВНР) и органический компонент (спирты, кетоны и др.), следует отнести: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования и снижение энергозатрат (до 0,1 кВт·ч/кг) [2].

При этом использование дисперсионного ЯТ из ТОК, включающих оксиды делящихся металлов (уран, торий) и матрицу (оксид бериллия) даст возможность создания сверхмалых (до 10 МВт) и малых (до 100 МВт) энергетических установок для использования в удаленных и труднодоступных регионах, на рудниках и карьерах. При использовании изотопов уран-238 и торий-232 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении урана по изотопу уран-235.

В работе представлены результаты моделирования процесса плазмохимического синтеза ТОК «UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-BeO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы неодима, церия, бериллия и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций «оксид неодима–оксид церия–оксид бериллия» различного состава.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для уран-ториевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Ivan Novoselov, Alexander Karengin, Igor Shamanin, Evgeny Alyukov, Alexander Gusev. Plasmachemical Synthesis of Nanopowders of Yttria and Zirconia from Dispersed Water-Salt-Organic Mixtures // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1938, Article number 020010. – p. 1-7.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИДКИХ  
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ, СОДЕРЖАЩИХ ОБЛУЧЕННЫЙ ГРАФИТ**

Е.В. Беспала<sup>1</sup>, Д.О. Чубреев<sup>1</sup>, Ю.Р. Беспала<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», 662972, Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 53

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск,  
пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [bespala\\_evgeny@mail.ru](mailto:bespala_evgeny@mail.ru)

При эксплуатации уран-графитовых реакторов (УГР), а также во время планово-предупредительного ремонта и в процессе выполнения ремонтно-восстановительных работ графитовой кладки образовывались графитовые радиоактивные отходы (РАО) [1]. Для исключения возможности выхода радиоактивных веществ (РВ) за пределы реакторного пространства (РП) применялась специальная система пылеподавления, принцип действия которой основан на втягивании и осаждении дисперсных графитовых частиц в емкости большого объема. Концентрирование и перемещение пыли, состоящей из облученного графита, в указанную емкость осуществлялось с помощью проточной воды. В результате происходило накопление жидких радиоактивных отходов (ЖРО), содержащих помимо графита, продукты коррозии трубопровода, а также другого оборудования и различных технологических систем. Также в такие емкости могли попадать продукты деления, активации и актиноиды, что особенно характерно для зарубежных УГР, эксплуатировавшихся в начале прошлого века.

При проведении мероприятий, направленных на вывод из эксплуатации УГР, требуется кондиционирование РАО, образующихся в результате его работы, включая ЖРО, содержащие облученный реакторный графит. В работах [2,3] показано, что для этих целей можно использовать высокотемпературные термические методы дезактивации графитовых РАО, например, плазменные. Ранее было показано, что в низкотемпературной инертной плазме возможно практически полное удаление продуктов деления, активации и некоторых актиноидов с поверхности облученного реакторного графита. При этом главным преимуществом указанного метода является незначительное образование вторичных РАО.

Предлагается использовать низкотемпературную плазму для переработки ЖРО, содержащих облученный реакторный графит, с целью дезактивации и снижения объема. Однако экспериментальные работы на данном этапе исследования затруднены в силу больших дозовых нагрузок на персонал. Поэтому целесообразно проводить математическое моделирование процесса плазмохимической переработки графитсодержащих пульп.

На начальном этапе исследований с помощью термодинамического моделирования равновесного состава продуктов реакции, протекающих при заполнении емкостей смесью воды и облученного графита, проводили оценку возможных химических соединений, в которых могут находиться радионуклиды ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $\Sigma\text{U}$ ,  $\Sigma\text{Pu}$ ), содержащиеся в образующихся ЖРО. Показано, что большая часть указанных радионуклидов находится в форме оксидов и, в меньшей степени, хлоридов. При этом данные радиоактивные изотопы практически не образуют устойчивых химических соединений между друг другом.

На следующем этапе исследований определяли возможные химические соединения, которые могут образовываться при плазменной переработке ЖРО, содержащих облученный реакторный графит, при исполь-

зовании различного плазмообразующего газа. Определено, что в широком диапазоне температур при использовании инертных и химически активных газов с наибольшей вероятностью образуются оксиды радиоактивных веществ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adamov E.O., Gragunov Yu.G., Slobodchikov A.V., Mikhailov M.N., Petrov A.A., Ukharov S.G., Burlakov E.V., Asmolov V.G., Chernikov O.G., Bystrikov A.A., Kudryavtsev K.G., Lozhnikov I.N., Kharakhnin S.N. Service life restoration technology for RBMK: design, implementation, and assimilation experience // Atomic energy. – 2017. – Vol. 123. – No. 5. – P. 293–301.
2. Kashcheev V.A., Ustinov O.A., Yakunin S.A., Zagumennov V.S., Pavlyuk A.O., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V. Technology and facility for incinerating irradiated reactor graphite // Atomic Energy. – 2017. – V. 122. – № 4. – P. 252–256.
3. Bepala E.V., Myshkin V.F., Pavlyuk A.O., Novoselov I. Yu. Heat and mass transfer in cesium evaporation from graphite surface in argon // Atomic Energy. – 2017. – V. 122. – P. 400–405.

**ДЕСУБЛИМАЦИЯ UF<sub>6</sub> В ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОГРУЖНЫЕ ЕМКОСТИ  
С ГЛАДКИМИ ВНУТРЕННИМИ СТЕНКАМИ, ВЕРТИКАЛЬНЫМ  
И ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ**

М.В. Верлинский, Р.В. Малюгин, А.А. Орлов

Томский политехнический университет

E-mail: [malyugin@tpu.ru](mailto:malyugin@tpu.ru)

Для определения влияния оребрения вертикальных погружных емкостей для десублимации UF<sub>6</sub> на среднюю производительность и время заполнения использовалась математическая модель [1].

В емкости объемом 1,0 м<sup>3</sup>, 1,5 м<sup>3</sup>, 2,0 м<sup>3</sup>, 2,5 м<sup>3</sup> с гладкими внутренними стенками были добавлены 12 вертикальных ребер или 6 горизонтальных ребер. Их размеры подбирались таким образом, чтобы общая площадь теплообменной поверхности была одинакова. При этом соблюдались ограничения, исключающие перемерзание десублимата во входном клапане и на ребрах емкости.

Результаты расчетов площади теплообменной поверхности, площади контакта ребер со стенкой, объема ребер, конечной массы десублимата и их средней производительности представлены в таблице 1.

Таб. 1. Результаты расчетов

Вемк, м <sup>3</sup>		Стп, м <sup>2</sup>	Скс, 10 <sup>-2</sup> м <sup>2</sup>	VP, 10 <sup>-2</sup> м <sup>3</sup>	q, кг/ч	Δq, кг/ч
1	БО	4,67			9,23	
	ВО	10,39	6,078	1,422	12,72	3,49
	ГО	10,39	9,312	1,452	43,59	34,36
1,5	БО	6,15			11,98	
	ВО	15,97	6,522	2,446	20,39	8,41
	ГО	15,97	11,2	2,483	74,82	62,85
2	БО	7,52			14,11	
	ВО	18,58	7,368	2,756	22,87	8,76
	ГО	18,58	12,14	2,794	79,89	65,78
2,5	БО	8,72			16,14	
	ВО	23,46	7,818	3,674	28,74	12,6
	ГО	23,46	13,08	3,719	100,86	84,72

Стп – площадь теплообменной поверхности; Скс – площадь контакта ребер со стенкой; VP – объем ребер; Мк – конечная масса десублимата; q – средняя производительность; БО – без оребрения (с гладкими стенками); ВО – с вертикальным оребрением; ГО – с горизонтальным оребрением.

Из таблицы 1 видно, что с увеличением объема емкостей и пропорциональном увеличении площади поверхности ребер в них происходит существенное увеличение средней производительности. Причем у емкостей с горизонтальным оребрением оно больше, чем у емкостей с вертикальными ребрами (это объясняется различием в площадях контакта и объема горизонтальных и вертикальных ребер со стенкой емкости), и значительно больше, чем у емкостей с гладкими внутренними стенками. Следовательно, емкости с горизонтальным оребрением работают намного эффективнее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Glazunov A.A., Dynamics of UF<sub>6</sub> desublimation with the influence of tank geometry for various coolant temperatures // MATEC Web of Conferences. – 2016. – 72. – Article number 01079.

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОСТРУКТУРНОГО Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> В ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ПЛАЗМЕ  
ИЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Н.И. Головков, И.Ю. Новоселов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [golniigo@gmail.com](mailto:golniigo@gmail.com)

Известно, что одними из продуктов деления, которые образуются в отработавшем ядерном топливе (ОЯТ), являются изотопы редких и рассеянных элементов: рутения, циркония, ниобия, иттрия и др. По действующей технологической схеме ОЯТ после извлечения из реактора выдерживается в пристанционном бассейне, после чего направляется на переработку, состоящую из нескольких стадий: фрагментирование сборок, растворение фрагментов в азотной кислоте с последующим извлечением химическими методами урана, плутония и других продуктов деления. Следует отметить, что такой продукт деления как иттрий потенциально может быть использован для синтеза его оксида и применения в разных отраслях производства.

Оксид иттрия играет большую роль в производстве изделий из высокотемпературной керамики, которые используются в агрессивных средах из-за своей химической стойкости. Прозрачная керамика из оксида иттрия обладает высоким светопропусканием в видимой и ИК-области спектра.

Технология плазмохимического синтеза – один из перспективных методов получения порошковых материалов, характеризующийся одностадийностью, высокой скоростью процесса, гомогенным распределением фаз с заданным стехиометрическим составом, возможностью активно влиять на размер и морфологию частиц, компактностью технологического оборудования [1].

В качестве прекурсора для синтеза оксида иттрия рассматривался нитрат иттрия. Для проведения экспериментальных исследований готовились насыщенные водные растворы нитрата иттрия (96,7 г/100 г воды). Эксперименты проводились с использованием плазменного стенда на базе высокочастотного факельного плазмотрона. В качестве плазмообразующего газа (окислительной среды) выступал воздух.

Синтезированный порошок оксида иттрия отправлялся на анализ. Для исследования основных параметров порошка проводилась просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия, БЭТ анализ и рентгенофазовый анализ. Полученные данные показали, что проба порошка оксида иттрия состояла из агломерированных частиц, имела площадь удельной поверхности 31 м<sup>2</sup>/г, кубическую кристаллическую решетку, размер ОКР 41 нм.

Полученные результаты подтверждают возможность плазмохимического синтеза наноструктурного порошка оксида иттрия из нитрата иттрия, который может быть извлечен из отработавшего ядерного топлива. Метод может быть распространен на получение оксидов других редких и рассеянных элементов, являющихся продуктами деления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новоселов И.Ю., Подгорная О.Д., Шлотгауэр Е.Э., Каренгин А.Г., Кокарев Г.Г. Плазменная утилизация и магнитная сепарация модельных отходов переработки отработавшего ядерного топлива // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – №. 2/2. – С. 26–30.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Nd–Sm–Be–O»

А.Ю. Дербин, В.И. Расторгуев, С.В. Беденко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [petr.a.kurkin@gmail.com](mailto:petr.a.kurkin@gmail.com)

Приоритетным направлением развития ядерной энергетики в России является создание АЭС с реакторами на быстрых нейтронах, использующих дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) в виде сложных оксидных композиций из делящихся материалов, размещенных в матрице с высоким коэффициентом теплопроводности и низким поглощением нейтронов [1].

Общими недостатками применяемых технологий получения топливных оксидных композиций (ТОК) для дисперсионного ЯТ (термическое разложение солей металлов, восстановление оксидов, электролитическое получение из расплавленных солей, золь-гель процесс) являются: многостадийность, высокая стоимость переработки сырья, неравномерное распределение фаз в продукте, необходимость использования большого количества химических реагентов.

К преимуществам прямого плазмохимического синтеза ТОК из смешанных водных нитратных растворов (ВНР) следует отнести: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования. Однако плазменная переработка только растворов ВНР требует значительных затрат электрической энергии (до 4,0 кВт·ч/кг). При этом существенное снижение энергозатрат (до 0,1 кВт·ч/кг) может быть достигнуто при плазменной переработке оптимальных по составу водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих растворы ВНР и органический компонент (спирты, кетоны) [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза ТОК «UO<sub>2</sub>-PuO<sub>2</sub>-BeO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы неодима, самария, бериллия и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций различного состава «оксид неодима–оксид самария–оксид бериллия».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для уран-плутониевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Ivan Yu. Novoselov, Alexander G. Karengin, Renat G. Babaev. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1938, Article number 020016. – p. 1-5.



МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ  
ИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ  
АЛЬФА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

М.А. Дзик, С.П. Журавков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mad15@tpu.ru](mailto:mad15@tpu.ru)

В современном мире радиоактивные изотопы невозможно определить какими-либо качественными химическими реакциями именно из-за этого возникает необходимость создания методики, которая бы позволяла решить данную проблему. В данной работе описан метод, который характеризуется предварительной радиохимической подготовкой проб для проведения процесса. Подготовка заключается в концентрировании изотопов Pu из водного образца на гидроксиде железа методом ионообменной хроматографии и приготовлением электролитическим способом счетного образца с последующим отделением от носителя и мешающих радионуклидов. Спектрометрический анализ  $\alpha$ -частиц проводится с помощью  $\alpha$ -спектрометра при помощи ионизационной импульсной камеры и специального полупроводникового поверхностно-барьерного детектора, которые позволяют преобразовывать энергию излучения в импульс электрической энергии с определенной амплитудой соответствующей данной энергии.

Измерения, проводимые в данной работе, выполнялись согласно инструкции по техническому использованию спектрометрической аппаратуры и при нормальных условиях (ГОСТ 15150-69). При температуре внешней среды  $+25\pm 10$  °С, относительной влажности воздуха от 40 до 80 % и атмосферном давлении от 630 до 800 мм. рт. ст.

**Выполнение работы.**

Исследуемую водную пробу объемом 1 дм<sup>3</sup> подкисляли концентрированной соляной кислотой до pH равного 1, затем, добавляли 1 дм<sup>3</sup> перекиси водорода и 1 дм<sup>3</sup> раствора изотопного индикатора – <sup>239</sup>Pu. Раствор подвергался тщательному перемешиванию и кипячению под часовым стеклом в течении 20 минут до полного разрушения карбонатов.

После чего в стакан, который снимался с плитки, вносили объёмом 1 см<sup>3</sup> раствор FeCl<sub>3</sub> (10 мг в расчёте на Fe) и осаждали гидроксиды, при этом параллельно добавлялся раствор аммиака для стабилизации pH среды в диапазоне от 8 до 9. Пробу нагревали до образования осадка, который после отстаивания в течении часа подвергался фильтрации на фильтре “белая лента” диаметром в 9 см. После фильтрации фильтрат утилизировался.

Осадок на фильтре растворялся в минимальном объеме (не более 15 см<sup>3</sup>) кипящей 7М HNO<sub>3</sub>, которая приливалась небольшими порциями для того, чтобы захватить весь осадок. В полученный азотнокислый раствор вносили около 50 мг сухой соли азотнокислого натрия для перевода плутония в 4-х валентное состояние и перемешивали до прекращения выделения бурых паров окислов азота.

Подготовленный таким образом азотнокислый раствор переносили на хроматографическую колонку с анионообменной смолой - высота слоя смолы 10 см. Раствор пропускали через колонку со скоростью 1 капля в 4 секунды. Стакан обмывали 5 см<sup>3</sup> 7М HNO<sub>3</sub> и промывной раствор также пропускали через колонку.

Затем смолу промывали последовательно растворами с объёмом по 50 см<sup>3</sup> 7М HNO<sub>3</sub> и 10М HCl. Все фильтраты образовавшиеся в ходе промывки проходили дальнейшую утилизацию. Изотопы Pu вымывали раствором с объёмом в 20 см<sup>3</sup> 10М HCl, которая была насыщена йодидом калия. После чего в образовавшийся раствор добавляли 1 см<sup>3</sup> концентрированной HNO<sub>3</sub> и подвергали выпариванию досуха. Образовавшийся сухой остаток соли смачивали азотной кислотой и снова выпаривали досуха.

Остаток в стакане растворяли в объёме 10 см<sup>3</sup> 1-% раствора трилона Б и добавляли по 1 см<sup>3</sup> насыщенного раствора щавелевокислого аммония и 25-% раствора хлористого аммония. Кислотность среды в образовавшемся растворе доводили до диапазона от 3 до 4 добавлением 7М HNO<sub>3</sub>, после чего полученный раствор переводился в электролитическую ячейку. Стакан из-под раствора подвергался промыванию дистиллированной воды объёмом 8 см<sup>3</sup>, после чего промывные воды направлялись к основному раствору в ячейке.

Процесс электроосаждения изотопов Pu проводился в течении 30 минут на подложку-диск сделанный из нержавеющей стали диаметром 34 мм при постоянном токе мощностью в 2,0 А.

В ходе протекания процесса кислотность раствора контролировалась с помощью универсальной индикаторной бумаги и поддерживалась на уровне в диапазоне от 3 до 4 путём добавления растворов NH<sub>4</sub>OH или 7М HNO<sub>3</sub>. В процессе выкипания раствора прибавляли дистиллированную воду для доведения раствора до исходного объёма. Перед окончанием процесса осаждения устанавливалась кислотность среды больше 7 путём добавления аммиака, после чего отключали ток, извлекали диск промывая его дистиллированной водой и сушили на воздухе.

Полученный препарат (счётный образец) передавали на измерения на  $\alpha$ -спектрометре.

Таб. 1 Интервалы значений объемной активности, полученные на  $\alpha$ -спектрометре.

Наименование изотопа	Объемная активность, Бк/дм <sup>3</sup>
Pu <sup>238</sup>	0,046; 0,065
Pu <sup>239+240</sup>	0,130; 0,173

В данной работе была представлена методика определения изотопов плутония 238, 239+240 в природных водах и получены результаты исследований счетного образца на альфа-спектрометре. В результате минимальная объемная активность Pu<sup>238</sup> составила 0,046 Бк/дм<sup>3</sup>, а максимальная – 0,065 Бк/дм<sup>3</sup>, тогда как для Pu<sup>239+240</sup> минимальное значение начинается с 0,130 Бк/дм<sup>3</sup>, а максимальное значение активности равняется 0,173 Бк/дм<sup>3</sup>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т. 1 / под ред. В. Ю. Баранова – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 728 с.
2. Изотопы: свойства, получение, применение. В 2 т. Т. 2 / под ред. В. Ю. Баранова – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 728 с.
3. Полинг Л. Общая химия: учебник для вузов – 3-е изд., под ред. М. Х. Карапетьянца – М.: Мир, 1974. – 850 с.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ РАБОТЫ КОЛОННЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ  
В ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОСТНЫХ СИСТЕМАХ

В.В. Дмитриев, Д.Г. Видяев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [neversummer@tpu.ru](mailto:neversummer@tpu.ru)

Известно, что щелочные элементы нашли широкое применение в различных областях науки и техники, таких как медицина, пищевая промышленность, оптика, электроника, металлургия и атомной энергетика. В частности, литий используется в качестве легирующей добавки в легких конструкционных сплавах, катализатора в органическом синтезе, компонента модифицирующих флюсов в металлургии. Вещества на основе лития служат сырьем при получении катодных материалов, а в ядерной энергетике соединения лития, в зависимости от изотопного состава, могут использоваться в качестве поглотителя нейтронов или в теплоносителе реактора для корректировки для поддержания водно-химического режима. Потребность в литиевой продукции и требования к её чистоте постоянно возрастают.

Для очистки лёгких щелочных металлов и разделения их изотопов в промышленности наиболее широко применяются два, реализуемые в системе жидкость–жидкость, метода разделения. Одним из таких методов является высокоэффективный амальгамный обмен, использующий в качестве одной фазы амальгаму [1]. Другим способом разделения щелочных элементов и их изотопов является экстракция, так как обладает хорошими разделительными характеристиками и принципиальной возможностью организации непрерывного обменного процесса в колоннах [2].

При организации разделения щелочных элементов применяют многоступенчатые процессы, осуществляемые в противотоке двух фаз в колоннах, обеспечивающих необходимую степень очистки и производительность. Проведение натурных испытаний разделительных систем и отработка режимов их работы экономически невыгодно, так как связано с большими временными и материальными затратами. В связи с этим актуальны исследования, направленные на проведение численного анализа параметров работы обменной колонны в зависимости от условий ее эксплуатации. Данная работа является частью таких исследований и посвящена разработке математической модели расчета основных параметров массообмена в системе жидкость–жидкость, протекающего в колонне.

В результате работы создана модель, позволяющая определить ряд параметров процесса обмена, протекающего в условиях противотока двух несмешивающихся жидких фаз, в насадочной колонне. Результаты расчета, проведенного с помощью разработанной модели, показали ее применимость для нахождения и оптимизации параметров разделения веществ в системах жидкость–жидкость в колоннах или каскадах из колонн.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомиров И.А., Видяев Д.Г., Гринюк А.А. [Уравнение амальгамно-обменной колонны в стационарном режиме работы](#) // [Известия Томского политехнического университета](#). – 2005. Т. 308.– № 2. – С. 95–97.
2. Холькин А.И. и др. Экстракция металлов фенолами. – Новосибирск: Наука, 1976. – 192 с.

**ВОЗМОЖНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ МЕТОДОВ В ТЕХНОЛОГИЮ  
ФОРМИРОВАНИЯ МОКС-ТОПЛИВА**

Р.С. Еремеев, Д.М. Хорохорин, И.В. Банников

Научный руководитель - В.А. Хан

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dmh1@tpu.ru](mailto:dmh1@tpu.ru)

Изотопы находят все большие перспективы применения во многих отраслях. Наибольшее применение изотопы находят в ядерной энергетике. Например,  $U^{235}$  служит топливом на АЭС.

МОКС-топливо содержит смесь оксидов плутония и природного урана, обогащённого урана или обедненного урана. МОКС-топливо ведет себя в цепной реакции сходно (хотя и не совсем идентично) с оксидом низкообогащенного урана и может применяться как дополнительное топливо для наиболее распространенного типа ядерных реакторов, например, легководных на тепловых нейтронах. Однако, более эффективным использованием МОКС-топлива является сжигание в реакторах на быстрых нейтронах.

МОКС топливо можно получать путем переработки облученного топлива с энергетических реакторов. В процессе переработки из него выделяются изотопы плутония, например, для топлива после достаточно длительной кампании почти 2/3 приходится на изотопы  $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$  (делящиеся в реакторах на тепловых нейтронах), а около 1/3 -  $Pu^{240}$ . Содержание оксида плутония в МОКС-топливе составляет от 1,5 до 25-30 весовых %.

В настоящее время в РФ разработана технология формирования МОКС-топлива. Однако, характеристики топлива далеки от оптимальных из-за значительного отличия размеров частиц смешиваемых порошков оксидов плутония и урана. Также необходимо учитывать возможность появления брака при производстве МОКС-топлива по существующей технологии. В настоящее время бракованные таблетки механически размалываются в порошок для повторного формирования топливных таблеток.

Альтернативой механического размола является лазерное испарение спрессованной смеси оксидов с последующим формированием нанопорошка. Очевидно, что по такой технологии можно формировать порошок с очень высокой гомогенностью, из-за формирования дисперсных частиц с размерами, менее 20 нм. Температура кипения оксида урана – 3640К, оксида плутония – 2800К. Понятно, что такой разнице температур кипения нуклеацию оксида урана можно считать гомогенной, а оксида плутония – гетерогенной. Можно предполагать, что при температуре ниже 2800К оксид плутония будет конденсироваться на частицах оксида урана. При этом формируется дисперсная частица, ядро которого представляет оксид урана, а оболочка – оксид плутония. Также вероятно формирование небольшого количества дисперсных частиц, содержащих лишь оксид плутония. Равномерность перемешивания оксидов в топливной таблетке во многом будет определяться гранулометрическим составом образующегося порошка.

В докладе анализируются различные физико-химические процессы, протекающие при нуклеации смеси двух оксидов, испаряемых одновременно с поверхности твердого тела с помощью инфракрасного излучения импульсного лазера.

При проведении экспериментов по формированию двухкомпонентной смеси из неравновесной низкотемпературной плазмы некоторые исследователи моделируют смесь оксидов урана и плутония с помощью смеси оксидов церия и неодима. Однако, даже поверхностное рассмотрение свойств смесей показывает,

что при формировании нанопорошков смесь  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$  не совсем аналогична смеси  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$ . В настоящей работе для экспериментального моделирования теплофизических свойств смеси  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$  используется смесь  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  более близкий по разности температур кипения. По теплопроводности смесь  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$  также ближе к  $\text{UO}_2\text{-PuO}_2$ , чем  $\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$ . Значительное различие по плотности рассматриваемых оксидов, при формировании наночастиц в плазменном потоке, не имеет существенного значения.

В докладе приводятся анализ экспериментальных данных по рентгенофазной диагностике и SEM-изображений наночастиц, содержащих смесь оксидов  $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ . Экспериментальные данные показывают, что оксиды перемешаны более равномерно, чем механическая смесь исходных порошков.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ ЦЕРИЯ И ИТТРИЯ

И.Ю. Загузин, А.С. Пшеничников, В.В. Сопыряев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [iyz4@tpu.ru](mailto:iyz4@tpu.ru)

Общими недостатками применяемых технологий получения сложных оксидных композиций из водных нитратных растворов являются: многостадийность, необходимость использования большого количества химических реагентов, неравномерное распределение фаз и высокая стоимость [1].

К несомненным преимуществам плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов (ВОНР) следует отнести: одностадийность, низкие удельные энергозатраты, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц [2].

Предлагается прямой плазмохимический синтез композиций, включающий оксиды церия и иттрия из смешанных водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент.

В результате проведенных расчетов определены составы ВОНР, имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг и обеспечивающих их энергоэффективную переработку. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР определены режимы, обеспечивающие прямой плазмохимический синтез в воздушной плазме оксидных композиций « $\text{CeO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$ » различного состава. Расчеты проведены при давлении 0,1 МПа, в широком диапазоне температур 300–4000 К и массовых долей воздушного теплоносителя 10–90 %.

На рисунке 1 представлен характерный равновесный состав конденсированных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР на основе ацетона «39,427 %  $\text{H}_2\text{O}$  – 30%  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  – 27,516 %  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  – 3,057 %  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ » при массовой доле воздуха 65 %, обеспечивающей в воздушной плазме прямой синтез оксидной композиции следующего состава «90%  $\text{Ce}_2\text{O}_3$ –10%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ».

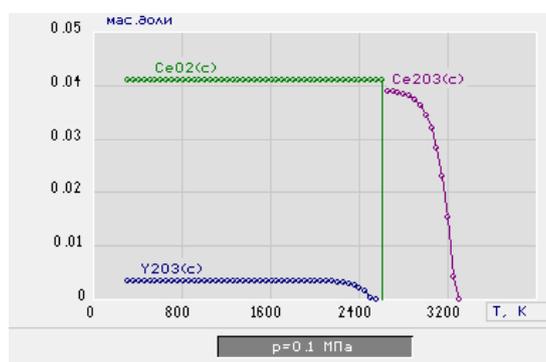


Рис. 1. Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР на основе ацетона при массовой доле воздуха 65 %.

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы при создании технологии и оборудования, предназначенного для плазмохимического синтеза оксидных композиций из водно-органических нитратных и других растворов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.
2. Novoselov I.Yu., Karegin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
ИЗ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ НЕОДИМА И МАГНИЯ

И.Ю. Загузин, А.С. Пшеничников, А.А. Котельникова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [iyz4@tpu.ru](mailto:iyz4@tpu.ru)

Общими недостатками применяемых технологий получения сложных оксидных композиций из водных нитратных растворов являются: многостадийность, необходимость использования большого количества химических реагентов, неравномерное распределение фаз и высокая стоимость [1].

К несомненным преимуществам плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов (ВОНР) следует отнести: одностадийность, низкие удельные энергозатраты, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц [2].

Предлагается прямой плазмохимический синтез композиций, включающий оксиды неодима и магния из смешанных водно-органических нитратных растворов, включающих органический компонент.

В результате проведенных расчетов определены составы ВОНР, имеющих низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг и обеспечивающих их энергоэффективную переработку. В результате проведенного термодинамического моделирования процесса плазменной переработки растворов ВОНР определены режимы, обеспечивающие прямой плазмохимический синтез в воздушной плазме оксидных композиций «Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–MgO–MgCO<sub>3</sub>» различного состава. Расчеты проведены при давлении 0,1 МПа, в широком диапазоне температур 300–4000 К и массовых долей воздушного теплоносителя 10–90 %.

На рисунке 1 представлен характерный равновесный состав конденсированных продуктов плазменной переработки раствора ВОНР на основе ацетона «9,223% H<sub>2</sub>O – 8,990% C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O – 11,058% Nd<sub>2</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O – 1,729% Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O» при массовой доле воздуха 69 %, обеспечивающей в воздушной плазме прямой синтез оксидной композиции следующего состава «95% Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–5% MgO».

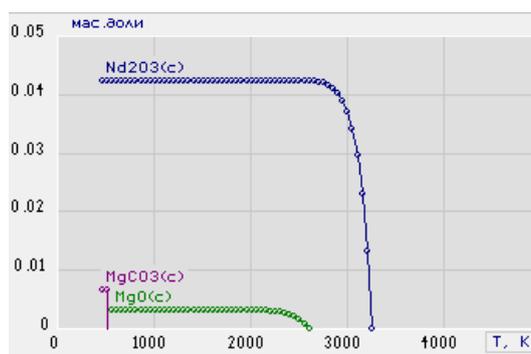


Рис. 1. Влияние температуры на равновесный состав основных продуктов плазменной обработки раствора ВОНР на основе ацетона при массовой доле воздуха 69 %.



Результаты проведенных расчетов могут быть использованы при создании технологии и оборудования, предназначенного для плазмохимического синтеза оксидных композиций из водно-органических нитратных и других растворов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туманов Ю. Н. Плазменные и высокочастотные процессы получения и обработки материалов в ядерном топливном цикле: настоящее и будущее. – М.: «Физматлит», 2003. – 759 с.
2. Novoselov I.Yu., Karengin A.G., Babaev R.G. Simulation of Uranium and Plutonium Oxides Compounds Obtained in Plasma // AIP Conference Proceedings. – 2018. – V. 1938. – P. 1-5.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Nd–Ce–Mg–O»

Е.Э. Зотов, В.В. Сопыряев, В.И. Шаманин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [evgeniy.zotov97@mail.ru](mailto:evgeniy.zotov97@mail.ru)

У традиционной ядерной энергетики, использующей керамическое ядерное топливо (ЯТ) из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235, есть существенные недостатки (низкая теплопроводность; короткий цикл использования (3-5 лет); большие расходы на утилизацию отработавшего ЯТ; ограниченный ресурс изотопа уран-235. При использовании изотопов уран-238 и торий-232 отпадает необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении, но у такого керамического ЯТ остается существенный недостаток – низкая теплопроводность.

Общими недостатками применяемых технологий получения топливных оксидных композиций (ТОК) для дисперсионного ЯТ (термическое разложение солей металлов, восстановление оксидов, электролитическое получение из расплавленных солей, золь-гель процесс) являются: многостадийность, высокая стоимость переработки сырья, неравномерное распределение фаз в продукте, необходимость использования большого количества химических реагентов.

К преимуществам плазмохимического синтеза топливных оксидных композиций (ТОК) для дисперсионного ЯТ из водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих водные нитратные растворы (ВНР) и органический компонент (спирты, кетоны и др.), следует отнести: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования и снижение энергозатрат (до 0,1 кВт·ч/кг) [2].

В работе представлены результаты исследований процесса плазмохимического синтеза ТОК «UO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-MgO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы неодима, церия, магния и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций «оксид неодима–оксид церия–оксид магния» различного состава.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для уран-ториевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Ivan Novoselov, Alexander Karengin, Igor Shamanin, Evgeny Alyukov, Alexander Gusev. Plasmachemical Synthesis of Nanopowders of Yttria and Zirconia from Dispersed Water-Salt-Organic Mixtures // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 1938, Article number 020010. – p. 1-7.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В.В. Зубов<sup>1,2</sup>, А.Г. Каренгин<sup>2</sup>

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н. И.В. Шаманин

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Россия, г. Саров, пр. Мира, 37, 607188

<sup>2</sup>НИ «Томский политехнический университет», Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kaberne1812@yandex.ru](mailto:kaberne1812@yandex.ru)

Одним из перспективных направлений дальнейшего развития атомной энергетики является использование дисперсионного ЯТ, в котором ядерные материалы в виде оксидных композиций размещают в матрице, имеющей высокий коэффициент теплопроводности [1]. Однако использование в качестве матрицы порошков металлов (алюминия, молибдена, вольфрама и др.) увеличивает коэффициент теплопроводности, но приводит к ухудшению нейтронного баланса дисперсионного ЯТ из-за резонансного поглощения нейтронов.

Предлагается совместный плазмохимический синтез оксидных композиций, включающих диоксид урана (плутония, тория) и матрицу из оксида бериллия (магния), имеющего высокий коэффициент теплопроводности и низкое резонансное поглощение нейтронов, из водно-органических нитратных растворов (ВОНР) на основе смешанных водных нитратных растворов и органического компонента (спирты, кетоны). Это обеспечит прямой плазмохимический синтез в воздушной плазме оксидных композиций с гомогенным распределением фаз и требуемым стехиометрическим составом без дополнительного водородного восстановления, а также и существенное снижение энергозатрат на их получение.

Для определения оптимальных режимов процесса плазмохимического синтеза ВОНР были проведены расчеты равновесных составов газообразных и твердофазных продуктов. Для расчётов использовалась лицензионная программа «TERRA».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке энергоэффективной технологии прямого плазмохимического синтеза различных по составу оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.

ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ  
КОМПОЗИЦИЙ  
«Sm–Ce–Be–O»

К.С. Иванов, Н.С. Хоцеловский, А.Д. Побережников  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [ksi5@tpu.ru](mailto:ksi5@tpu.ru)

Создание АЭС с применением реакторов на быстрых нейтронах (РБН) является приоритетным направлением дальнейшего развития ядерной энергетики. Для их работы перспективным является использование дисперсионного ядерного топлива (ЯТ) в котором делящиеся материалы (U,Pu) в виде оксидных композиций размещают в матрице, имеющей высокий коэффициент теплопроводности и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1]. Однако раздельное получение оксидов урана и плутония и использование в качестве матрицы порошков металлов (алюминий, молибден, вольфрам и др.) увеличивает коэффициент теплопроводности, но приводит к резкому удорожанию технологии получения такого топлива.

Перспективным является совместный плазмохимический синтез топливных оксидных композиций (ТОК), включающих делящиеся металлы в виде оксидов урана и плутония, а также матрицу (оксид бериллия), из смешанных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны и др.).

К преимуществам плазмохимического синтеза ТОК из растворов (ВОНР), включающих водные нитратные растворы (ВНР) и органический компонент (спирты, кетоны и др.), следует отнести: одностадийность и высокую скорость процесса, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц, компактность технологического оборудования и снижение энергозатрат (до 0,1 кВт·ч/кг) [2].

В работе представлены результаты моделирования процесса плазмохимического синтеза композиций «PuO<sub>2</sub>-ThO<sub>2</sub>-BeO» на модельных растворах ВОНР, включающих водные нитратные растворы самария, магния и органический компонент (этанол, ацетон), а также закономерности влияния состава растворов ВОНР и режимов их переработки, обеспечивающих в воздушной плазме прямой синтез наноразмерных композиций «оксид самария–оксид церия–оксид бериллия».

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для создания технологии плазмохимического синтеза ТОК для плутоний-ториевого дисперсионного ЯТ.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Karengin, A. G. Calculation and optimization of plasma utilization process of inflammable wastes after spent nuclear fuel recycling / A. G. Karengin, A. A. Karengin, I. Y. Novoselov, N. V. Tundeshev // Advanced Materials Research. – 2014. – V. 1040. – P. 433-436.

МОДЕЛЬ РЕАКТОРА ДЛЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА СЛОЖНЫХ  
ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ИЗ ДИСПЕРГИРОВАННЫХ  
ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ

А.А. Каренгин, А.Г. Каренгин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [karenginaa@tpu.ru](mailto:karenginaa@tpu.ru)

Для дальнейшего развития ядерной энергетики перспективным является применение дисперсионного ЯТ, в которые включения в виде сложных оксидных композиций из делящихся материалов (U, Th, Pu) размещают в металлической или оксидной матрице, имеющей высокий коэффициент теплопроводности и низкое сечение резонансного поглощения нейтронов [1].

К несомненным преимуществам плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из диспергированных водно-органических нитратных растворов (ВОНР), включающих органический компонент (спирты, кетоны), по сравнению с золь-гель процессом и технологией, основанной на отдельном получении и механическом смешении оксидов металлов, следует отнести: одностадийность, низкие удельные энергозатраты (до 0,1 МВт·ч/т), гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц.

На рисунке 1 представлена схема процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР.

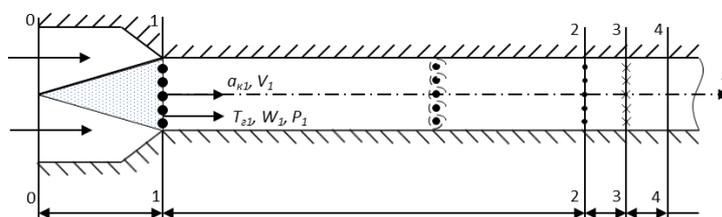


Рис. 1. Схема процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций в воздушно-плазменном потоке из диспергированных растворов ВОНР

Из сравнительного анализа процессов взаимодействия капель с воздушно-плазменным потоком показано, что при температурах  $T \geq 1500$  К лимитирующей стадией является стадия испарения растворителя (1-2). На основе полученных результатов расчетов установлены закономерности влияния начальных параметров воздушно-плазменного потока (температура, скорость), капель (размер, скорость), а также массового отношения фаз на кинетику испарения капель в реакторе.

Результаты исследований могут быть использованы при создании технологии плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций для различных типов дисперсионного ядерного топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.

СИСТЕМА ДОСТАВКИ iq-1 НА ОСНОВЕ PLGA МИКРОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ  
МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОРАСПЫЛЕНИЯ

И.М. Колесник, Э.В. Киблер, К.С. Станкевич, Е.Н. Больбасов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kolesnik0796@gmail.com](mailto:kolesnik0796@gmail.com)

Целевая доставка лекарственных средств является перспективным направлением как в терапии онкологических заболеваний, так и в тканевой инженерии за счет снижения количества применяемых дорогостоящих лекарственных форм и сокращения возможного вредного воздействия на другие ткани и органы в условиях направленного действия активного вещества. Наиболее распространенным материалом для производства систем доставки является сополимер молочной и гликолевой кислот «PLGA» по причине высокой биосовместимости и биodeградации на молочную и гликолевую кислоты, выводимые из организма человека естественным образом. На данный момент существует множество методов синтеза систем доставки на основе полимерных микрокапсул: метод одинарной или двойной эмульсии, распылительной сушки и их вариации. Однако их главными недостатками являются повреждение чувствительных лекарственных форм при инкапсуляции, а также невозможность переноса многих лекарственных форм. В отличие от прочих методов, метод электрораспыления лишен данных недостатков и позволяет тонко настраивать морфологию поверхности, размер частиц и количество инкапсулированного лекарства за счет изменения параметров системы. В свою очередь, отличительными особенностями оксима 11Н-индено [1,2-b] хиноксалин-11-она (IQ-1) является подавление провоспалительных цитокинов в организме и ингибирование c-Jun N-терминальных киназ, участвующих во многих патологических процессах в организме [1]. К тому же, метод электрораспыления является единственным методом для инкапсуляции IQ-1.

Было проведено исследование физико-химических свойств системы доставки IQ-1 на основе PLGA микрокапсул, полученных методом электрораспыления. Расчетная загрузка лекарства составила 0, 5, 10 и 20 % по отношению к сухому полимеру в виде гранул. Свойства микрокапсул были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), лазерной дифракции (ЛД) до и после ультразвукового воздействия, дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) и рентгеноструктурного анализа (РСА). Коэффициенты загрузки и кинетика высвобождения IQ-1 оценивалась методом УФ-видимой спектроскопии.

Результаты СЭМ иллюстрируют округлую форму PLGA микрокапсул, похожую на эритроциты человека. Вне зависимости от величины теоретической загрузки, образцы делятся по размерам на 3 класса: малые, с диаметром до 400 нм, средние, с размером около 2,7 мкм, и крупные агломераты с размерами более 10 мкм. После ультразвуковой обработки наблюдается снижение количества агломерированных частиц за счет разрушения больших кусков. Из результатов ДСК и РСА следует, что лекарство находится в капсулах в кристаллической форме после загрузки, равной 10 %, что связано с его избыточной концентрацией в аморфной фазе. После 90 дней исследования кинетики высвобождения IQ-1 выход лекарства для 5, 10 и 20 процентной загрузки составил 96, 36 и 15 % соответственно. Таким образом, применение системы доставки IQ-1 на основе PLGA микрокапсул, полученных методом электрораспыления, является перспективным в терапии сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schepetkin I.A. Identification and Characterization of a Novel Class of c-Jun N-terminal Kinase Inhibitors // *Molecular Pharmacology*. – 2012. – Vol.81. – № 6. – P. 832–845.

ЕСТЕСТВЕННАЯ КОНВЕКЦИЯ ГАЗООБРАЗНОГО  $UF_6$  В ВЕРТИКАЛЬНОЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

Котельникова А.А., Орлов А.А., Мalyugin Р.В.

Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина,30

E-mail: [malyugin@tpu.ru](mailto:malyugin@tpu.ru)

Модернизация разделительного оборудования на обогатительных предприятиях России, сопровождается увеличением нагрузки на цеха конденсационно-испарительных установок [1]. Замена газовых центрифуг на более производительные и увеличения разделительных мощностей предприятий придает актуальность работам, направленным на исследование и интенсификацию процесса десублимации  $UF_6$ , проектирование коллекторов десублимации  $UF_6$  повышенной производительности и совершенствование конструкций емкостей.

Наиболее перспективным способом решения подобного рода задач является разработка математических моделей тепло- и массообмена, протекающих при десублимации  $UF_6$ . Для исследования нестационарного процесса десублимации  $UF_6$  в вертикальные погружные емкости нами разработана двумерная математическая модель, которая в отличие от известных математических моделей не использует эмпирические данные и учитывает десублимацию  $UF_6$  на торцевых стенках емкости, эллиптичность этих стенок, нестационарность процессов тепло- и массообмена, а также движение газообразного  $UF_6$  внутри емкости [1,2].

Движение газообразного  $UF_6$  внутри емкостей при их охлаждении возникает в результате гравитационной конвекции и является определяющим механизмом формирования рабочего режима переноса массы, импульса и энергии. Численное решение задачи тепловой гравитационной конвекции газообразного  $UF_6$  в вертикальной цилиндрической емкости подтверждает, что разработанная математическая модель адекватно описывает движение в ней газообразного  $UF_6$  в процессе десублимации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Desublimation for purification and transporting  $UF_6$ : process description and modeling, Separation and Purification Reviews, 2017, Vol. 46, No. 1, P. 81–89.
2. Orlov A.A., Tsimbalyuk A.F., Malyugin R.V., Leontieva D.A., Kotelnikova A.A., Effect of tank geometry on its average performance, AIP Conference Proceedings, 2018, Vol. 1938, Article number 020009.

ВЛИЯНИЕ ИЗОТОПОВ МАГНИЯ НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
БАКТЕРИЙ *E. COLI*

У.Г. Летута, Т.А. Тихонова

Оренбургский государственный университет,

Россия, г. Оренбург, пр-т Победы 13, 460018

E-mail: [shevulyana@yandex.ru](mailto:shevulyana@yandex.ru)

Магнитно-изотопные эффекты (МИЭ) впервые были обнаружены в радикальных жидкофазных реакциях. После открытия МИЭ магния  $^{25}\text{Mg}$ , кальция  $^{43}\text{Ca}$ , цинка  $^{67}\text{Zn}$ , обладающих магнитным моментом, в ферментативных реакциях *in vitro* [1] магнитная изотопия вышла на новый, биологический уровень. Цикл независимых исследований на бактериальных клетках *E. coli* показал, что внутриклеточное обогащение магнитным изотопом  $^{25}\text{Mg}$  ускоряет рост, увеличивает жизнеспособность (КОЕ) клеточной культуры, влияет на выживаемость микробной клетки и изменяет её относительный элементный состав [2].

Влияние магнитных изотопов магния позволяет изменять ростовые и биохимические показатели бактерий *E. coli* [2]. Подобные эффекты открывают новые возможности управления ферментативными процессами и, как следствие, основными физиологическими свойствами бактерий. Цель данной работы - исследовать влияние изотопов магния на два важнейших физиологических свойства бактерий *E. coli* - процесс формирования биопленок и резистентность к антибиотикам. Проводимые исследования по поиску альтернативных методов воздействия на процесс биопленкообразования бактерий актуальны и практически востребованы в связи с возрастающей устойчивостью бактерий к воздействию внешних физико-химических факторов, в том числе антибиотиков.

Способность к образованию биоплёнок оценивали стандартным фотометрическим методом по степени связывания красителя кристаллического фиолетового. Резистентность к антибиотикам оценивалась с помощью диско-диффузионного метода и метода серийных разведений. Бактерии *E. coli* образовывали биоплёнки лучше в том случае, когда культивировались на среде с магнитным изотопом магния  $^{25}\text{Mg}$  по сравнению с немагнитными формами  $^{24,26}\text{Mg}$ . При этом резистентность к антибиотикам зависела от механизма действия препаратов. Например, бактериальная чувствительность к рифампицину, ингибирующего синтез РНК, увеличивалась для бактерий, обогащенных магнитным магнием  $^{25}\text{Mg}$ . В работе обсуждаются механизмы полученных магнитно-изотопных эффектов и возможность их практического применения в медицине и фармакологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации, заявка СП-225.2019.4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Buchachenko A.L. Magneto-Biology and Medicine. - New York: Nova Science Publishers, 2014. – 236 р.
2. Letuta U.G., Berdinskiy V.L. Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: Magnetic isotope and magnetic field effects // Bioelectromagnetics. – 2017. - Vol.38(8). - P. 581-591



## ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ИЗОТОПОВ МАГНИЯ И ЦИНКА НА КОНЦЕНТРАЦИЮ АТФ *IN VIVO*

У.Г. Летута

Оренбургский государственный университет,

Россия, г. Оренбург, пр-т Победы 13, 460018

E-mail: [shevulyana@yandex.ru](mailto:shevulyana@yandex.ru)

Магнитные изотопы химических элементов, ядра которых обладают магнитным моментом, способны влиять на ход химических процессов. Магнитно-изотопные эффекты для таких процессов давно известны [1]. Они обусловлены влиянием ядерного магнитного момента ядра на суммарное спиновое состояние радикальных пар – индуцированием синглет-триплетной конверсии в соответствии с правилами отбора и спиновыми запретами. Открытия в области спиновой биохимии – магнитно-изотопные эффекты магния в ферментативном синтезе АТФ [2], - показали, что магнитные изотопы влияют и на биологические процессы. Магниточувствительными стадиями в таком случае являются элементарные акты ферментативных реакций, в которых обязательной стадией является перенос электрона и образование ион-радикальной пары. Чувствительность синтеза АТФ и ДНК к стабильным магнитным изотопам магния, цинка и кальция обнаружена экспериментально [3]. Присутствие магнитного изотопа магния  $^{25}\text{Mg}$  в среде роста бактерий *E. coli* приводит к повышению жизнеспособности микроорганизмов *in vivo* [4].

В данной работе проведен цикл исследований по влиянию магнитных изотопов цинка  $^{67}\text{Zn}$  и магния  $^{25}\text{Mg}$  на концентрацию АТФ в живых организмах на примере бактерий *E. coli*. Для усиления влияния магнитных изотопов на внутриклеточные процессы применялось внешнее постоянное магнитное поле 0-100 мТл. Получено, что обогащение изотопами магния или цинка микроорганизмов в процессе роста изменяет концентрацию АТФ в клетках в зависимости от типа изотопа – магнитный/немагнитный. Влияние слабых магнитных полей 0-10 мТл стимулирует рост бактериальных клеток и изменяет внутриклеточную концентрацию АТФ. Максимальная концентрация АТФ достигается при использовании магнитного изотопа магния  $^{25}\text{Mg}$  и воздействии на бактерии постоянного магнитного поля диапазона 70-90 мТл. Для уменьшения скорости синтеза АТФ можно использовать немагнитные изотопы магния или цинка и магнитные поля, отличные от диапазонов 0-10 и 70-90 мТл.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-33-60021, и Правительства Оренбургской области.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бучаченко А.Л., Сагдеев Р.З., Салихов К.М. Магнитные и спиновые эффекты в химических реакциях. - Новосибирск: Наука, 1978. – 296 с.
2. Buchachenko A.L. Magnetic isotope effects in chemistry and biochemistry. - New York: Nova Science Publishers, Inc., 2009. – 149 p.
3. Buchachenko A.L. Magneto-Biology and Medicine. - New York: Nova Science Publishers, 2014. – 236 p.
4. Letuta U.G., Berdinskiy V.L. Magnetosensitivity of bacteria *E. coli*: Magnetic isotope and magnetic field effects // Bioelectromagnetics. – 2017. - Vol.38(8). - P. 581-591

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ  
РЕЭКСТРАКТОВ ПЛАТИНОИДОВ ИЗ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

В.И. Ли

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [suzuno@list.ru](mailto:suzuno@list.ru)

Истощение минеральных запасов металлов платиновой группы (Ru, Rh, Pa) приведет к росту их стоимости до такой степени, что отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) может стать основным замещающим источником их промышленного производства. Этому будет способствовать рост мощностей ядерной энергетики и накопление ОЯТ. До настоящего времени ни один из предложенных методов выделения платиноидов из ОЯТ не был реализован в промышленном масштабе. Поэтому представляет интерес использование плазмы для энергоэффективной переработки реэкстрактов родия (палладия) в виде водных нитратно-нитритных растворов для извлечения из ОЯТ.

Плазмохимическая переработка водных растворов солей и гидроксидов металлов обладает важными достоинствами (одностадийное получения целевых продуктов с гомогенным распределением фаз и заданным стехиометрическим составом, их чистота и возможность активно влиять на размер и морфологию частиц), но требует значительных энергозатрат (до 4 МВт·ч/т). Существенное снижение энергозатрат (до 0,1 МВт·ч/т) может быть достигнуто при плазменной обработке растворов, включающих органический компонент (спирты, кетоны и др.) [1].

В результате проведенных расчетов показателей горючести различных по составу растворов на основе этилового этанола (ацетона) и реэкстрактов родия (палладия) определены оптимальные по составу водно-органические растворы реэкстрактов (ВОРР), имеющие низшую теплотворную способность не менее 8,4 МДж/кг, и обеспечивающих их энергоэффективную плазменную переработку.

С использованием лицензионной программы «TERRA» определены равновесные составы газообразных и конденсированных продуктов плазменной переработки растворов ВОРР в широком диапазоне температур (300÷4000 К) и массовых долей воздушного плазменного теплоносителя (0,1÷0,9), С учетом полученных результатов определены следующие режимы переработки ВОРР:

- состав раствора ВОРР: (70% Реэкстракт(Rh): 30 % Этанол);
- отношение фаз: (74% Воздух: 26 % ВОРР);
- рабочая температура: (1500±100) К;

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании энергоэффективной технологии плазмохимической переработки водных реэкстрактов родия и палладия, а также других ценных металлов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гостева И. В., Каренгин А.Г. Оценка возможности плазменной переработки нитратно-нитритных растворов родия после переработки ОЯТ // V Международная школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов, Томск, 22-24 октября 2014. - Томск: ТПУ, 2014 - С. 5

**МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ КОМПЛЕКС МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ОНКОЛОГИЧЕСКИХ НОВООБРАЗОВАНИЙ**

Е.В. Обходская<sup>1</sup>, А.В. Обходский<sup>2</sup>, В.И. Сачков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36, 634050

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [lenaobx@yandex.ru](mailto:lenaobx@yandex.ru)

Развитие и широкое внедрение современных молекулярно-генетических экспресс тестов позволяет улучшить эффективность ранней диагностики и, как следствие, лечение онкологических заболеваний.

Настоящая работа направлена на проведение комплекса экспериментальных исследований и создание научно-технических основ построения аппаратно-программного диагностического комплекса на основе полупроводниковых тонкопленочных сенсоров (ПТС), обеспечивающего возможность реализации конвергентного подхода для ранней диагностики злокачественных опухолей с применением методов искусственного интеллекта для поддержки принятия решения при постановке диагноза.

Известно, что наличие злокачественного новообразования в клеточном организме влечет изменение внутренних метаболических процессов. Различные продукты изменённого метаболизма (летучие и полуметучие) выводятся из организма различными путями в окружающую среду. Таким образом, в выдыхаемом воздухе клеточного организма, страдающего опухолевым процессом, могут находиться специфичные продукты распада (метаболиты), по наличию которых, их состава, концентрации и соотношению можно сделать предположения о наличии того или иного патологического процесса, протекающего в организме. Данное предположение подтверждается анализом мировой литературы, где в последнее время отмечается рост публикации по неинвазивной диагностике опухолевых процессов на основе анализа выдыхаемого воздуха. Данный метод диагностики рассматривается при опухолях легких, молочной железы, кишечника, предстательной железы [1]. Так показана эффективность скрининговой диагностики опухолей желудка по анализу выдыхаемого воздуха. В данном исследовании чувствительность метода составила 83 %, а специфичность - 91 % [2].

Анализ, распознавание и мониторинг выдыхаемых газовых смесей, содержащих маркеры при измененном метаболизме в организме больных различными злокачественными новообразованиями, может проводиться с применением высокочувствительных систем измерения на основе полупроводниковых сенсоров. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор работ (проекта) 2019-05-576-0001-4259.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Kabir K.M.M., Donald W.A. Cancer breath testing // A patent review Expert Opinion in Therapeutic Patents. – 2018. – V.28. – PP. 227-239.
2. Krilaviciute A., Stock C., Leja M., Brenner H. Potential for non-invasive breath tests for preselecting individuals for invasive gastric cancer screening endoscopy // Journal of Breath Research. – 2018. – V. 12 (3), 036009.

## ЛАЗЕРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОТОПОВ УРАНА – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Ш.С. Оспанова<sup>1</sup>, Л.А. Рахимжанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, 050056, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

<sup>2</sup>Казахский агротехнический ун-т им. С. Сейфуллина, 010011, РК, г. Нур-Султан, пр. Победы, 62

E-mail: [shynarospanova1987@gmail.com](mailto:shynarospanova1987@gmail.com)

Линии поглощения  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$  в ИК, видимой и УФ областях не совпадают. Поэтому путем облучения смеси изотопов лазерными импульсами на заданных частотах можно селективно возбудить целевой изотоп для его выделения химическими или физическими методами.

Селективное по изотопам колебательное возбуждение молекул для их диссоциации является одним из лазерно-молекулярных методов разделения изотопов. Во многих лабораториях мира продемонстрирована возможность получения изотопов урана при селективном лазерном воздействии на молекулы  $\text{UF}_6$  с помощью методов MLIS (Molecular Laser Isotope Separation) и CRISLA (Chemical Reaction by Isotope Selective Laser Activation). Возможность практического использования лазерных методов зависит от их конкурентоспособности с ныне существующими методами, например центрифужным. Успех в этом направлении, в первую очередь, будет определяться совершенствованием лазерной техники. Также необходимо решить два основных методологические задачи:

- достижение высокой селективности процесса, при которой достигается необходимое обогащение продукта по  $^{235}\text{U}$  и содержание целевого изотопа в «отвалах» не превышает 0,1%;
- получения максимального выхода соединений, содержащих целевой изотоп, на единицу энергии лазерного излучения (максимальная квантовая эффективность).

Лазерная сепарация изотопов урана возможна путем многофотонной диссоциации молекул  $\text{UF}_6$  в поле излучения оптически накачиваемого импульсно-периодического  $\text{CF}_4$ -лазера (16 мкм,  $615\text{ см}^{-1}$ ). В статьях различных авторов приведены данные: о пороговых для фотодиссоциации плотностях энергии облучения; о методах идентификации и определения количества продуктов фотодиссоциации; о возможных химических реакциях образующихся радикалов между собой, с исходным веществом и различными реагентами, препятствующими протеканию восстанавливающих исходное соединение химических реакций; а также данные о выходе диссоциации в одиночных импульсах.

Диссоциация молекул, как правило, включает в себя различные фотофизические и фотохимические процессы. Фотофизические процессы: поглощение излучения, мономолекулярная диссоциация, излучательная и безызлучательная дезактивация молекул, перенос энергии и тепла, диффузия продуктов фотолиза из зоны облучения к стенкам реактора. Фотохимические процессы: реакции возбужденных молекул с веществами-реагентами, с которыми неактивированные молекулы не реагируют или реагируют с гораздо меньшими скоростями, вторичные химические реакции между продуктами первичного распада молекул, а также продуктов с исходным соединением и реагентом, гетерогенные реакции продуктов первичного распада и продуктов вторичных процессов на стенках реактора.

Известно, что при фотодиссоциации молекул  $\text{SF}_6$ , наблюдается резкое уменьшение выхода от импульса к импульсу. Например, при давлении 0,5 мм рт.ст. и интенсивности лазерных импульсов  $\sim 6,3\text{ Дж/см}^2$  коэффициент диссоциации  $\text{SF}_6$  в пятом импульсе в три раза меньше, чем в первом. Аналогичная картина наблюдается при фотодиссоциации молекул  $\text{UF}_6$  в поле излучения импульсно-периодического лазера.

В качестве источника излучения 16-мкм, попадающего на линию поглощения  $\text{UF}_6$ , можно использовать импульсно-периодический  $\text{CF}_4$ -лазер, накачиваемый ТЕА  $\text{CO}_2$ -лазером.

До настоящего времени потрачено несколько миллиардов долларов для финансирования исследований по AVLIS множественными организациями, главным образом в США. Однако, ни один из вариантов не были доведены до промышленных масштабов, и были заброшены. Единственное продолжающееся исследование - это процесс SILEX (разделение изотопов лазерным возбуждением) от фирмы GE-Hitachi. SILEX использует  $\text{UF}_6$  в качестве исходного материала и тандем лазеров для избирательного возбуждения молекул, содержащих  $^{235}\text{U}$ .

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ  
ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ  
ОБЛУЧЕННОГО ГРАФИТА

А.П. Павленко<sup>1,2</sup>, Д.О. Чубреев<sup>1</sup>, Е.В. Беспала<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУП «Горно-химический комбинат», Россия, г. Железногорск, ул. Ленина, д. 53, 662972

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск,  
пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [moroziknastia94@mail.ru](mailto:moroziknastia94@mail.ru)

За время становления и развития атомной промышленности в мире было накоплено более 250 000 тонн графитовых радиоактивных отходов (РАО). На сегодняшний день для облученного ядерного графита, отнесенного к особым РАО или содержащегося в активной зоне реактора, существует технология захоронения путем создания пункта долговременной консервации. Однако во всех прочих случаях вопрос переработки и захоронения графитовых РАО остается открытым. Этой проблеме посвящено множество научно-исследовательских работ, в которых представлены подробные результаты исследования свойств и состава графитовых радиоактивных отходов.

Основная сложность в разработке метода дезактивации графитовых РАО заключается в том, что облученный графит обладает большим количеством индивидуальных особенностей. В работах [1, 2] показано, что помимо активационных радионуклидов, продуктов деления и трансурановых элементов по объему графита неравномерно могут быть распределены такие радионуклиды, как <sup>90</sup>Sr, <sup>106</sup>Ru, <sup>125</sup>Sb, <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm,  $\Sigma$ U,  $\Sigma$ Pu.

В качестве одного из возможных вариантов снижения потенциальной опасности графитовых РАО целесообразно рассмотреть способ электрохимической дезактивации. Такое решение обусловлено тем, что часть графитовых РАО имеет преимущественно поверхностное загрязнение, в том числе, слабосвязанными со структурой графита продуктами деления, активации, а также актинидами. Кроме того, в работе [3] показано, что облученный реакторный графит имеет достаточно высокую для конструкционных материалов реактора пористость, достигающую 25 %, что позволяет раствору проникать внутрь материала при электрохимической обработке. В процессе такой обработки графита удаление радионуклидов происходит за счет их перехода в раствор в ионной форме. Это позволяет избежать образования дополнительных газообразных соединений, содержащих радиоактивные изотопы.

В работе представлены результаты экспериментов по исследованию образцов облученного ядерного графита одного из остановленных уран-графитовых ядерных реакторов методом спектрометрического анализа. Экспериментально подтверждено, что в состав реакторного графита входят такие радионуклиды, как <sup>55</sup>Fe, <sup>60</sup>Co, <sup>90</sup>Sr, <sup>106</sup>Ru, <sup>125</sup>Sb, <sup>133</sup>Ba, <sup>137</sup>Cs, <sup>154</sup>Eu, <sup>155</sup>Eu, <sup>241</sup>Am, <sup>243</sup>Am, <sup>244</sup>Cm. Исходя из этого, с помощью программы TERRA было проведено моделирование процесса электрохимической обработки реакторного графита. В качестве электролитических растворов были выбраны: дистиллированная вода, HNO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Определено, что в процессе электрохимической обработки облученного графита радионуклиды и их соединения способны вступать в химические взаимодействия с ионами дезактивирующего раствора, образуя при этом нитриды, сульфиды, а также различные оксиды. В исключительных случаях возможно образование гидридов и хлоридов металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pavliuk A.O., Zagummenov V.S., Kotlyarevskiy S.G., Bepala E.V. Thermodynamic Simulation of Equilibrium Composition of Reaction Products at Dehydration of a Technological Channel in a Uranium-Graphite Reactor // Thermal Engineering. – 2018. – V. 65. – № 1. – P. 51–56.
2. Wood C. Graphite Decommissioning Options for Graphite Treatment, Recycling, or Disposal, including a discussion of Safety Related Issues. Technical Report 1013091, 2006. 156 p.
3. Snead L.L., Contescu C.I., Byun T.S., Porter W. Thermophysical property and pore structure evolution in stressed and non-stressed neutron irradiated IG-110 nuclear graphite // Journal of Nuclear Materials. – 2016. – V. 476. – P. 102–109.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ $Cs^{137}$ ФЕРРОЦИАНИДНЫМИ СОРБЕНТАМИ ИЗ РАДИОАКТИВНЫХ РАСТВОРОВ

И.А. Пивоваров, И.И. Жерин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ivan271294@gmail.com](mailto:ivan271294@gmail.com)

При работе ядерных энергетических установок образуется большое количество отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В настоящее время основным методом переработки ОЯТ является жидкостная экстракция. Образующиеся в процессе экстракции жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) содержат в значительных количествах долгоживущий  $\beta$ -активный радионуклид  $Cs^{137}$ . При иммобилизации и окончательном захоронении ЖРО, входящий в радионуклидный состав  $Cs^{137}$ , ввиду, большого периода полураспада (30,4 года) по сравнению с другими продуктами деления ядерного топлива, высокой растворимостью в водных средах и высокой миграционной способностью, считается одним из опасных элементов для окружающей среды. Из-за своих химических свойств, близких к калию,  $Cs^{137}$  может легко ассимилироваться в биологических организмах [1].

Чтобы предотвратить эти негативные последствия, необходимо проводить извлечение  $Cs^{137}$  из жидких радиоактивных отходов, а полученные соединения  $Cs^{137}$  в дальнейшем могут быть использованы в перспективных областях медицины и промышленности.

В рамках данной работы проведены эксперименты с сорбцией природного Cs (как иммитатора  $Cs^{137}$ ) двойными ферроцианидами калия-меди, с целью определения времени достижения равновесия сорбции  $Cs^{137}$  и влияния pH раствора на процесс сорбционного извлечения радиоцезия двойными ферроцианидами калия-меди.

Определение времени установления равновесия сорбции  $Cs^{137}$  исследовали путем добавления 1,5 г сорбента в коническую колбу, содержащую 150 мл раствора  $CsNO_3$  (100 мг/л) при значении pH равном 4. Процесс перемешивания осуществлялся на возвратно-поступательном шейкере. По окончании процесса сорбции раствор фильтровали через фильтр «синяя лента» и определяли концентрацию Cs в растворе спектрофотометрическим методом. Результаты представлены на рисунке 1. Видно, что в указанных условиях проведения опытов время установления равновесия сорбции составляет не менее 2 часов, поэтому все последующие эксперименты проводились в течение 3 часов.



Рис. 1. Время установления равновесия сорбции



Для оценки влияния pH на сорбционное извлечение цезия 0,3 г сорбента погружали в 30 мл раствора  $\text{CsNO}_3$  при концентрации 100 мг/л для различных начальных значений pH в диапазоне от 2,0 до 12,0, результаты представлены на рисунке 2.

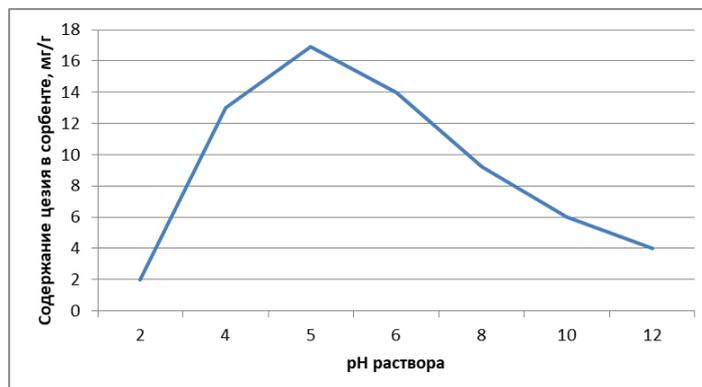


Рис. 2. Влияние на pH процесс сорбции цезия

Из этих данных следует, что наиболее эффективно процесс извлечения цезия протекает при pH около 5, при этом ёмкость сорбента составляет около 16 мг/г. При значениях pH ниже 5 содержание цезия в сорбенте уменьшается из-за конкуренции сорбции между ионами  $\text{H}_3\text{O}^+$  и  $\text{Cs}^+$  [2], а при значениях pH выше 5 наблюдается уменьшение содержания ионов цезия в фазе сорбента, вызванное нестабильностью сорбента в сильнощелочной среде [3].

Таким образом, поисковые исследования показывают возможность сорбционного концентрирования цезия из растворов при помощи двойных ферроцианидов калия-меди.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плющев В.Е. Химия и технология соединений лития, рубидия и цезия. – М.: ХИМИЯ, 1970. – 408 с.
2. Тананаев И.В. Химия ферроцианидов / И.В. Тананаев, Г.Б. Сейфер, Ю.Я. Харитонов. – М: Наука, 1971. – 320 с.
3. Волков А. И. Большой химический справочник. – Минск: Современная школа, 2005. – 608 с.

ИОНООБМЕННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЛАНТАНА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ  
КАТАЛИЗАТОРА КРЕКИНГА НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛЬНЫХ РАСТВОРОВ

М.А. Погодаева, А.О. Богданова, Л.Н. Адеева

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Россия, г.Омск, пр. Мира, 55а, 644077

E-mail: [konfetka\\_ma@mail.ru](mailto:konfetka_ma@mail.ru)

В настоящее время большое значение приобретает вторичная переработка производственных отходов, в качестве которых может быть использован отработанный катализатор крекинга нефтехимического производства, имеющий в своем составе до 1,0 % дорогостоящих редкоземельных элементов (РЗЭ). При фторидной переработке катализатора образуются концентрат редкоземельных элементов. В качестве метода извлечения ионов РЗЭ из получаемого концентрата был изучен ионный обмен на катионите Purolite C-100-Н, содержащий сульфогруппы и хелатная смола Purolite S-957 [1,2] на примере модельных растворов хлорида лантана. Эффективная сорбция наблюдается при pH 2,0. Величина сорбционной емкости смолы Purolite C-100-Н по ионам лантана составляет 1,28 ммоль/г, а хелатной смолы Purolite S-957 0,733 ммоль/г. При извлечении РЗЭ из реального объекта значительное влияние оказывает присутствие мешающих ионов (таких как алюминий и железо [3]) на величину сорбции. Рассчитаны коэффициенты распределения и разделения ионов для обеих смол. Данные приведены в таб.1.

Таб.1. Значения коэффициентов распределения и разделения для ионов лантана, железа и алюминия на смолах Purolite S-957 и Purolite C-100-Н

Ионообменная смола	Коэффициент распределения, Краспр			Коэффициент разделения, Кразд	
	La(III)	Fe(III)	Al(III)	Fe(III)	Al(III)
Purolite C-100-Н	847	59	372	14	2
Purolite S-957	792	1850	51	0,4	15

Из данных по коэффициентам распределения можно сделать вывод о том, что обе смолы эффективно извлекают РЗЭ из растворов, содержащих алюминий и железо (Краспр=847 для Purolite C-100-Н, Краспр=792 для Purolite S-957). Коэффициенты разделения, величина которых больше единицы, свидетельствуют о том, что катионит Purolite C-100-Н может быть использован для извлечения ионов лантана из растворов, содержащих алюминий и железо.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мясоедова Г.В., Саввин С.Б. Хелатообразующие сорбенты. – М.: Издательство «Наука», 1984. – С. 8–12.
2. Херинг Р. Хелатообразующие ионообменники: Пер. с нем.. – М.: Издательство «Мир», 1971. – 263 с.
3. А.В.Гоголев, М.В.Никонов, И.Г.Тананаев, Б.Ф.Мясоедов. Отделение трехвалентных актиноидов и редкоземельных элементов от примесей железа с применением некоторых комплексных соединений. // Радиохимия. – 2005. – Т.47. – №6. – С. 534–535.

## ПРИМЕНЕНИЕ ФЛОКУЛЯНТОВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

И.В. Распутин, Н.А. Журавлев, В.А. Карелин

Национальный Исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [rasputin.ilia@yandex.ru](mailto:rasputin.ilia@yandex.ru)

За последние десятилетия процессам переработки керамического отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1], образующегося в реакторах LWR [2], уделяется все больше внимания. Процесс переработки позволяет использовать замкнутый ядерный топливный цикл и обеспечить многократное использование урана, находящегося в исходном топливе [3].

В процессе растворения керамического ОЯТ получаются растворы, содержащие от 0,19 до 0,59 % коллоидных частиц от массы исходного топлива (их концентрация в растворе составляет  $\sim 1 \dots 3$  г/дм<sup>3</sup>). Для их удаления используют флокуляцию, а в качестве флокулянта – BESFLOC. Для определения принципиальной возможности применения BESFLOC и осветления азотнокислых растворов ОЯТ с концентрацией урана 400–1000 г/дм<sup>3</sup> используют неионогенный BESFLOC K4000. Осаждение коллоидных частиц в растворе с BESFLOC K4000 произошло за  $\sim 15$  мин. Выполнены исследования процесса выделения платиновых металлов и определена возможность использования неионогенных BESFLOC K4000 и K4020, а также катионного BESFLOC K6651 и анионного BESFLOC K4032. Изучен процесс разрушения коллоидных растворов, содержащих мелкодисперсный порошок Pt – платиновая «чернь». Исследовано воздействие излучения интенсивностью 18,5 Р/ч на U-растворы с указанным флокулянтом в течение 3-х суток. Установлено, что внешний вид раствора не изменяется, а образовавшиеся агрегаты частиц не разрушаются. На рис. 1 показана зависимость изменения оптической

плотности растворов  $UO_2(NO_3)_2$  с концентрацией 1000 г/л по U и раствором имитатора мелкодисперсным порошком графита от времени проведения процесса взаимодействия с флокулянтами BESFLOC:

- раствор BESFLOC K40001 – линия 1;
- раствор BESFLOC K4032 – линия 2;
- раствор BESFLOC K6651 – линия 3.

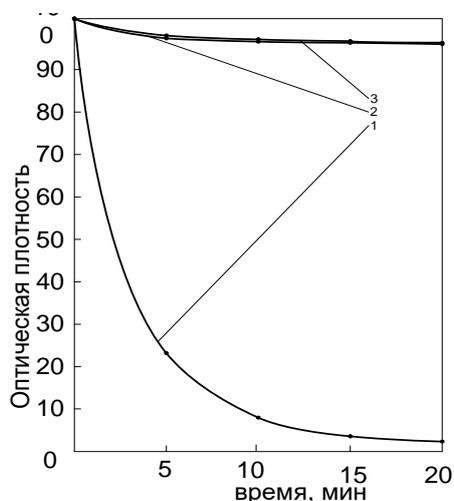


Рис. 1 Изменение оптической плотности растворов от времени проведения процесса

Анионный BESFLOC K4032 и катионный BESFLOC K6651 незначительно увеличивают размеры коллоидных частиц только при длительном контакте флокулянта (> 1 часа) с раствором. Образующиеся частицы имеют рыхлую структуру и при перемешивании разрушаются. При использовании неионогенного BESFLOC K4000 оптическая плотность раствора I/I<sub>0</sub> уменьшилась за 10 мин до 8 ед., а через 20 мин произошло практически полное осветление исходного раствора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Choi, E.Y. et al. Progress in Natural Science: Materials International. 2015, 25(6), 572–582.
2. Alekseev, P.N. et al.: Physics of Atomic Nuclei. 2015, 78(11, 1), p. 1264–1273.
3. Chen, G.J. International Conference on Nuclear Engineering, Proceedings, ICONE Xi'an; China; 2010, 1, p.

## ПЕРЕСТРОЙКА ОДНОМОДОВОГО ЛАЗЕРА В ОДНОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ СЕЛЕКЦИИ ИЗОТОПОВ

Л.А. Рахимжанова<sup>1</sup>, Ш.С. Оспанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Казахский агротехнический ун-т им. С. Сейфуллина, 010011, РК, г. Нур-Султан, пр. Победы, 62

<sup>2</sup>Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, 050056, РК, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 71

E-mail: [laura-rahimjan@mail.ru](mailto:laura-rahimjan@mail.ru), [shynarospanova1987@gmail.com](mailto:shynarospanova1987@gmail.com)

Известно, что линии поглощения изотопных модификаций различных молекул во всем диапазоне оптического спектра не совпадают. Поэтому путем облучения смеси изотопов лазерными импульсами на заданных частотах можно селективно возбудить целевой изотоп для его выделения физико-химическими методами.

Во многих лабораториях мира продемонстрирована возможность получения стабильных изотопов различных элементов при селективном лазерном воздействии на молекулы с помощью методов MLIS (Molecular Laser Isotope Separation) и CRISLA (Chemical Reaction by Isotope Selective Laser Activation). Успех в лазерном разделении изотопов, в первую очередь, зависит от совершенства параметров лазерного излучения [1].

При лазерном разделении изотопов необходимо решить две основные методологические задачи. Первая - достижение высокой селективности процесса, при которой не только достигается необходимое обогащение продукта целевым изотопом, но содержание целевого изотопа в «отвалах» ниже заданного предела. Вторая - получение максимального выхода соединений, содержащих целевой изотоп, на единицу энергии лазерного излучения (максимальная энергетическая эффективность).

Лазерная сепарация изотопов возможна путем многофотонной диссоциации или ионизации молекул при селективном воздействии одного или нескольких лазеров. В статьях различных авторов приведены данные: о пороговых для фотодиссоциации или фотоионизации плотностях энергии излучения; о методах определения количества продуктов фотодиссоциации; о возможных химических реакциях образующихся радикалов между собой, с исходным веществом и различными реагентами, уменьшающих скорость восстанавливающих исходное соединение химических реакций; а также данные об эффективности диссоциации или фотоионизации [2, 3].

Первоочередной задачей лазерного разделения изотопов является формирование излучения с узкой спектральной линией, длину волны которого можно перестраивать в заданном диапазоне для подстройки на длину волны поглощения целевого изотопа. Известно, что одночастотные лазеры имеют минимально возможную спектральную ширину излучения.

Наиболее простой способ получения одночастотного режима – использование нескольких, вложенных один в другой резонаторов. Например, можно использовать интерферометр Фурье, установленный внутри резонатора. При этом в пределах полосы усиления активного элемента будет генерироваться излучение на длине волны, характерном для обоих резонаторов. Небольшое изменение угла, относительно оси лазерного излучения, позволяет перестраивать длину волны для точной настройки на резонанс с целевым изотопом.

Экспериментально изучали возможность перестройки длины волны одномодового гелий-неонового лазера. Длину волны лазера после перестройки контролировали с помощью фурье-спектрометра. В докладе

обсуждаются стабильность во времени частоты генерируемого излучения и возможности тонкой перестройки на резонанс с длиной волны целевой изотопной модификации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Летохов В.С., Мур С.Б., Лазерное разделение изотопов (обзор) Ч. I. // Квантовая электроника, 1976. - Том 3, № 2. - С.248-287.
2. Koster U., Fedoseyev V.N., Mishin V.I., Resonant laser ionization of radioactive atoms // Spectrochimica Acta Part B. – 2003. – Vol. 58. – P.1047–1068.
3. Макаров Г.Н., Низкоэнергетические методы молекулярного лазерного разделения изотопов // УФН. – 2015. - Том 185. - № 7. – С.717–751.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
ДИФФУЗИИ ВОДОРОДА, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ КАК КРИТЕРИЯ РАЗ-  
ВИТИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТНОЙ СТРУКТУРЫ  
В ТРУБОПРОВОДНОЙ СТАЛИ

И. Саквин, В.Н. Кудияров

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [sakvinis@gmail.com](mailto:sakvinis@gmail.com)

На протяжении последних десятилетий встает вопрос о защите магистральных трубопроводов от коррозионного растрескивания под напряжением в связи с тем, что это является причиной большинства известных аварий [1]. В настоящее время основным методом контроля микроповреждений и микродефектов магистрального трубопровода является ультразвуковая диагностика. Одним из важнейших минусов данного метода является малая разрешающая способность. Ультразвуковая диагностика не может обнаружить микроповреждения, в том числе: локальные изменения микроструктуры материала, наклеп, локальное накопление водорода и образование микроскопических зон усталостного разрушения. Данные задачи можно решить, применяя метод проницаемости водорода. Любые структурные дефекты материала являются, своего рода, ловушками, задерживающими водород. Чем больше количество ловушек, тем большее время понадобится водороду, чтобы диффундировать сквозь образец. Сравнивая коэффициент диффузии в исходном материале и материале, выведенном из эксплуатации, можно качественно сказать о степени деградации материала.

В данной работе был использован разработанный отделением экспериментальной физики НИ ТПУ экспериментальный комплекс Stand for Testing Electrochemical Permeation (STEP) предназначенный для исследования как диффузии водорода, так и для системы металл-водород в целом [2].

Для определения коэффициента диффузии необходимо воспользоваться формулой [2]:

$$D = \frac{l^2}{6t_{0,5}} \quad (1)$$

Используя описанную в статье [2] методику расчета коэффициента диффузии водорода и воспользовавшись формулой 1, получены следующие данные, представленные в таблице 1.

Таб. 1. Значения коэффициентов диффузии водорода в стали марки 10Г2 до и после эксплуатации.

Параметр	Образец		
	#0	#1	#2
Толщина образца, мкм	330	330	280
Время установления половины стационарного потока, мин.	17	89	220
Коэффициент диффузии, см <sup>2</sup> /с	1,8·10 <sup>-7</sup>	3,4·10 <sup>-8</sup>	9,8·10 <sup>-9</sup>
Литературные данные коэффициента диффузии [3, 4, 5], см <sup>2</sup> /с	(2÷50)·10 <sup>-7</sup>	–	–

Коэффициент диффузии в исходной стали лежит в интервале, характерном для данного класса материалов, что говорит о работоспособности данной методики. Различие же коэффициентов диффузии в сталях, подвергшихся различным эксплуатационным параметрам, можно связать с накоплением в материалах большого количества дефектов в процессе эксплуатации. Как известно, любые дефекты кристаллической структуры являются центрами захвата водорода, которые препятствуют диффузии водорода в материале. Так, при изменении коэффициента диффузии на 2 порядка, как в стали, выведенной из эксплуатации, в материале образуется большое количество дефектов старения. Изменение коэффициента диффузии на 1 порядок в стали, подвергнутой ускоренным коррозионным испытаниям, говорит о возможном появлении дефектов старения в процессе испытаний.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпов С. В., Ширяпов Д. И., Алихашкин А. С., Вести газовой науки, 3 (27), 143 (2016).
2. Kudiyarov V. N., Pushilina N. S., Harchenko S. Y., Advanced Materials Research, 1085, 224 (2015).
3. Huang F. et al. Effect of microstructure and inclusions on hydrogen induced cracking susceptibility and hydrogen trapping efficiency of X120 pipeline steel //Materials Science and Engineering: A. – 2010. – Т. 527. – №. 26. – С. 6997-7001.
4. Li L. et al. Effects of vanadium precipitates on hydrogen trapping efficiency and hydrogen induced cracking resistance in X80 pipeline steel //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Т. 43. – №. 36. – С. 17353-17363.
5. Gan L. et al. Hydrogen trapping and hydrogen induced cracking of welded X100 pipeline steel in H<sub>2</sub>S environments //International Journal of Hydrogen Energy. – 2018. – Т. 43. – №. 4. – С. 2293-2306.



## ПРОБЛЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МИШЕНИ ПРИ НАРАБОТКЕ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ

С.С. Салодкин, В.М. Головков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [salodkin@tpu.ru](mailto:salodkin@tpu.ru)

Радиоактивные изотопы различных веществ активно используются во многих сферах человеческой деятельности, в том числе, в ядерной медицине, в качестве диагностических и терапевтических радиофармпрепаратов (РФП). При получении радиоактивных изотопов на циклотроне используются различные типы мишеней (жидкие, твёрдые, газообразные), в зависимости от выбранного метода получения радионуклида. В данной работе рассмотрены проблемы термической устойчивости твердотельных оксидных и металлических мишеней при работе на высоких токах пучка циклотрона.

При получении радионуклидов (РН) на циклотроне поток заряженных частиц (протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц) бомбардирует мишень, где в результате ядерных реакций образуются определённые нуклиды. В производственной наработке РН к мишени предъявляются определённые требования, а именно подходящие физико-химические свойства материалов мишени и подложки, химический состав, агрегатное состояние и процент обогащения. Совокупность необходимых требований позволяет получить максимальный выход целевого нуклида с наименьшим содержанием РН примесей [1].

При облучении твердотельной мишени, для обеспечения максимального выхода целевого нуклида, используется максимальный ток пучка заряженных частиц. При этом плотность твёрдых мишеней выше, чем жидких и газообразных, а значит пробег заряженных частиц в веществе будет меньше, а потери энергии больше. Энергия, теряемая заряженными частицами в веществе мишени, рассеивается в виде тепла. Одной из самых больших проблем при разработке и облучении твердотельной мишени является отвод тепла. Избыточное тепло, выделяемое в мишени, может привести к различным неприятным последствиям, таким как уменьшение плотности мишени, химические реакции, образующиеся в материале или продуктах мишени и, наконец, разрушение мишени. Таким образом, выбор вещества мишени будет зависеть не только от его прочности и химической стабильности, но и от тепловых свойств.

В данной работе рассматриваются условия успешной наработки РФП на циклотроне, а именно:

Определение композиционного состава и толщины мишени, материала подложки и метода нанесения.

Использование максимально эффективного охлаждения, которое определяется геометрией мишени, видом хладагента и скоростью его потока [2].

Равномерное распределение плотности тока пучка заряженных частиц по поверхности облучаемой мишени [3].

Таким образом, можно отметить, что термическая стабильность твердотельной мишени, а именно улучшение теплопроводных характеристик, является ключевым параметром повышения экономической эффективности радионуклидного производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изотопы: свойства, получение, применение / Под ред. В.Ю. Баранова. – М.: ИздАТ, 2000. – 704 с.
2. Cyclotron produced radionuclides: principles and practice. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2008.
3. Салодкин С.С., Головков В.М. Получение йода-124 по реакции (d,2n) на циклотроне Р7М для ядерной медицины // Известия Высших учебных заведений. Физика. – 2017. – Т.60. – № 9/2. – С. 102–105.

## ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ПРЯМОТОЧНОЙ УСТАНОВКИ ХЛОРИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ

Сулейменов Н.А., Котов В.М., Вурим А.Д., Бакланова Ю.Ю.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10, 071100

E-mail: [suleimenov@nnc.kz](mailto:suleimenov@nnc.kz)

В Филиале «Институт атомной энергии» Республиканского государственного предприятия «Национальный ядерный центр Республики Казахстан» исследования возможности применения хлоридной технологии для очистки облученного бериллия проводятся на протяжении нескольких последних лет [1-3]. В частности, выполнены исследования в обоснование технологии сухой очистки облученного бериллия методом хлорирования, разработаны варианты конструкции установки, выполнены ее расчетное обоснование и экспериментальная проверка. Первый вариант конструкции установки представлял собой циклический хлоратор, изготовленный из стальных труб [4].

В ходе экспериментов на циклическом хлораторе получены данные о скорости взаимодействия хлора с бериллием и влиянии температуры рабочих поверхностей на осаждение хлоридов с различными температурами плавления. Вместе с тем, дальнейшее использование этой установки невозможно из-за того, что хлор активно реагирует с нержавеющей сталью. В итоге конструкция установки была изменена и преобразована в прямоточный хлоратор с кварцевой реакционной камерой [5].

Целью данного исследования является определение возможных параметров работы прямоточной установки хлорирования при проведении экспериментальных исследований по очистке облученного бериллия. Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного учреждения «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» в рамках Договора №305 от 30.03.2018 года по теме «Совершенствование метода сухой очистки облученного бериллия».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технология очистки облученного бериллия: итоговый технический отчет по проекту МНТЦ К-1566 / Институт атомной энергии РГП НЯЦ РК; рук: В.М. Котов. – Курчатов, 2013.
2. Проведение экспериментов по определению степени очистки хлорида бериллия от радионуклидов, отличающихся режимами работ хлоратора, фильтра хлорида кобальта, накопителей хлорида бериллия и трития: отчет о НИР по 02.13 НТП / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; рук: В.М. Котов [и др]. – Курчатов, 2013.
3. Установка хлорирования облученного бериллия / В.М. Котов, М.А. Баусадьков // Конференция Ядерного общества Республики Казахстан. – Алматы, 2012.
4. Установка с прямоточным хлоратором: сборочный чертеж: АК.21262.00.000СБ / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; утв. В.В. Яковлев. – Курчатов, 2014.
5. Оптимизация конструкции теплообменника прямоточной установки очистки облученного бериллия. Тезисы V Международной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение», НИ ТПУ, 2018.

БЕЗОПАСНОСТЬ РАБОТ ПРИ ОЧИСТКЕ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ  
ХЛОРИРОВАНИЕМ

А.С. Сураев, Ю.Ю. Бакланова, А.Д. Вурим, В.М. Котов

Филиал «Институт атомной энергии» РГП Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Республика Казахстан, г. Курчатова, ул. Бейбіт атом, 10, 071100

E-mail: [suraev@nnc.kz](mailto:suraev@nnc.kz)

Радиационная опасность облученного бериллия определяется наличием целого ряда изотопов: продуктов деления урана,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{108\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^3\text{H}$ . Одной из причин наличия в облученном в исследовательских реакторах бериллии радиоактивных изотопов является его загрязненность ураном [1, 2]. При практическом отсутствии урана, которое может быть обеспечено специальными методами очистки бериллия, радиационные характеристики облученного бериллия определяются, в основном,  $^3\text{H}$  [3] и  $^{60}\text{Co}$ , при этом загрязненность тритием является одной из основных причин его высокой удельной активности [1]. Образование трития в бериллии происходит в результате цепочки ядерных реакций под действием реакторного излучения. Нейтроны с энергией выше 0,7 МэВ взаимодействуют с бериллием ( $n, \beta$ ) с образованием  $^6\text{He}$ , который в результате бета-распада переходит в  $^6\text{Li}$ . При взаимодействии  $^6\text{Li}$  с нейтроном происходит образование трития. Тритий, являясь бета-излучателем превращается в  $^3\text{He}$ , который, поглощая нейтроны, вновь превращается в тритий. Низкое содержание бериллия в природе и его высокая рыночная стоимость являются основными причинами необходимости решения задачи возврата облученного бериллия в повторное использование после восстановления его исходных свойств.

В настоящей работе обсуждаются вопросы обеспечения безопасности при реализации технологии очистки облученного бериллия [4] от  $^{60}\text{Co}$  и сопутствующей его детритизации, основанной на применении химической транспортной реакции с участием газообразного хлора.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГУ «Комитет науки МОН РК» в рамках Договора №305 от 30.03.2018 года по теме «Совершенствование метода сухой очистки облученного бериллия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колбасов Б.Н., Хрипунов В.И., Бирюков А.Ю. Применение бериллия в термоядерных реакторах: ресурсы, примеси, детритизация после облучения. - НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия. - УДК 553.679, 614.876. - ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 4. – с. 3-12. – С. 3-4.
2. Investigation of Uranium Content in Russian Federation Beryllium. - July 2012 Fusion Science and Technology 62(1):180-184. - DOI: 10.13182/FST12-A14132. - Igor V. KupriyanovIgor V. KupriyanovA. A. BorisovN. G. Gorlevskaja.
3. Малков А.П., Пименов В.В., Калыгин В.В., Козыльков А.В. Ядерно-физические процессы в бериллии под облучением и их влияние на физические и технологические характеристики исследовательских реакторов // Сборник тр. АО ГНЦ НИИАР. - Номер: 1. – Димитровград, 2016. – С. 13-25.
4. Бакланова Ю.Ю., Котов В.М., Градобоев А.В., Ситников А.А. Установка очистки облученного бериллия от радионуклидов. Изд-во: АлтГТУ им. И.И. Ползунова (Барнаул). - Ползуновский вестник. - Номер: 4-2 Год: 2016 Страницы: 129-133.

## СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ ОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ДЛЯ УРАН-ТОРИЕВОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ПЛАЗМЕ ФАКЕЛЬНОГО РАЗРЯДА

А.Е. Тихонов

Научный руководитель: И.Ю. Новоселов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aet13@tpu.ru](mailto:aet13@tpu.ru)

На сегодняшний день значительную часть атомной энергетики составляют АЭС, использующие керамическое ядерное топливо из диоксида урана, обогащенного по изотопу уран-235. Такое топливо обладает рядом недостатков, среди которых стоит выделить низкую теплопроводность и необходимость в дорогостоящем изотопном обогащении.

В то же время перспективным направлением дальнейшего развития атомной энергетики является тенденция к созданию дисперсионного ядерного топлива, которое представляет собой композицию ядерного топлива, в котором делящаяся фаза находится в виде частиц (металл, соединение), равномерно распределенных в матрице из неделящегося материала. Такое топливо обладает хорошими механическими свойствами, а материал матрицы и определяет радиационную стойкость и высокую теплопроводность топлива [1].

Основными технологиями получения оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива являются: термическое разложение, восстановление оксидов, электролитическое получение из расплавленных солей, золь-гель процесс. Общими недостатками применяемых технологий являются: многостадийность, высокая стоимость переработки сырья, неравномерное распределение фаз в продукте, необходимость использования большого количества химических реагентов.

В то же время, технология синтеза оксидных композиций в воздушной плазме обладает следующими преимуществами: одностадийность, гомогенное распределение фаз с заданным стехиометрическим составом, возможность активно влиять на размер и морфологию частиц [2,3].

Следует отметить, что переработка азотнокислых растворов в плазме достаточно затратна. Для уменьшения энергозатрат прибегают к добавлению в состав растворов органического компонента, который, окисляясь в воздушной плазме, приносит дополнительную энергию, позволяя увеличить расход перерабатываемого раствора и, таким образом, увеличить выход целевого продукта.

В работе было проведено термодинамическое моделирование процесса плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций из водно-органических нитратных растворов (ВОНР), состоящих из делящегося материала и материала матрицы. В качестве делящегося включения рассматривались оксиды урана и тория, в качестве материала матрицы – оксид магния, ацетон использовался в качестве органической добавки. Доля топливного включения в целевой сложной оксидной композиции выбиралась в пределах 90–99 %, при этом соотношения  $UO_2/(UO_2 + ThO_2)$  принималось 0,1–0,3, а доля матрицы – в пределах 1–10 %. В результате моделирования были рассчитаны оптимальные составы ВОНР на основе нитратов уранила, тория и магния, а также ацетона. Были определены оптимальные режимы плазменной обработки ВОНР: доля воздушного плазменного теплоносителя (67–71 %), давление (1 атм.) и температурный интервал (1000–2000 К). Показано, что при избытке воздуха, из исходных растворов образуются нецелевые продукты ( $UO_3$ ,  $U_3O_8$ ,  $U_4O_9$ ), при недостатке – продукты неполного термического разложения углеводовородов ВОНР (сажа).

Результаты проведенных исследований могут быть использованы для расчета плазмохимического синтеза сложных оксидных композиций для дисперсионного ядерного топлива.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00136).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С. Дисперсионное ядерное топливо. – М.: Техносфера, 2015. – 248 с.
2. Космачев П.В., Власов В.А., Скрипникова Н.К. // Известия вузов. Физика. – 2017. – Т. 60. – № 2. – С. 46–50.
3. Новоселов И.Ю., Подгорная О.Д., Шлотгауэр Е.Э., Каренгин А.Г., Кокарев Г.Г. Плазменная утилизация и магнитная сепарация модельных отходов переработки отработавшего ядерного топлива // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т. 57. – №. 2/2. – С. 26–30.



**РАЗДЕЛЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ИЗОТОПНОЙ СМЕСИ В ПРОЦЕССЕ  
ЗАПОЛНЕНИЯ КАСКАДА ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ**

Ушаков А.А.<sup>1,2</sup>, Совач В.П.<sup>1</sup>, Орлов А.А.<sup>2</sup>

Научный руководитель: Орлов А.А., д.т.н., профессор

<sup>1</sup>АО «ПО «Электрохимический завод», Россия, г. Зеленогорск Красноярского края,  
ул. Первая промышленная, 1, 663690

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск,  
пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ushakovaa2015@sibmail.com](mailto:ushakovaa2015@sibmail.com)

В последнее время широкое применение в ядерной энергетике, медицине, фундаментальных исследованиях, сельском хозяйстве и других областях нашли изотопно-модифицированные материалы с изотопным составом, отличным от природного. В последние десятилетия интерес исследователей прикован к разделению многокомпонентных изотопных смесей в каскадах газовых центрифуг.

Стационарному режиму разделения многокомпонентной изотопной смеси в каскаде газовых центрифуг предшествует нестационарный процесс, который условно можно разделить на две стадии: 1 – заполнение каскада рабочим веществом, 2 – установление равновесных концентраций компонентов в каскаде. Изучение процесса заполнения каскада до настоящего времени никем не проводилось, поэтому для расчета второй стадии при задании начальных условий использовалось допущение, что концентрации компонентов в ступенях каскада после его заполнения соответствуют их концентрациям в исходной многокомпонентной изотопной смеси. Учитывая, что от начальных условий зависит характер изменения концентраций компонентов в ходе нестационарного процесса и его длительность, целесообразно провести исследование процесса разделения многокомпонентной изотопной смеси в ходе заполнения каскада и проверить справедливость этого допущения.

В данной работе приведены результаты моделирования процесса заполнения каскада при различном количестве ступеней каскада и величине потока питания, а также при подаче потока питания в различные ступени каскада на примере разделения изотопов германия. Определены закономерности изменения концентраций изотопов германия в ступенях и потоках каскада. В процессе заполнения каскада происходит разделение изотопов германия и их распределение по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами. Увеличение потока питания приводит к уменьшению продолжительности заполнения каскада, снижению максимальных концентраций изотопов и перераспределению их по каскаду. Концентрации каждого изотопа германия в каскаде после его заполнения находятся в широком диапазоне значений. Показано, что допущение о равенстве концентраций изотопов в ступенях после заполнения каскада концентрациям в исходной смеси (потоке питания) является достаточно грубым приближением. Использование этого допущения при задании начальных условий для моделирования нестационарного разделительного процесса приводит к изменению расчетной динамики концентраций изотопов в потоках каскада.

## ЛАЗЕРНАЯ ОЧИСТКА ОТ РАДИОНУКЛИДОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЭЛОВ

Д.М. Хорохорин, М.С. Кузнецов, Р.С. Еремеев

Научный руководитель - В.А. Хан

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dmh1@tpu.ru](mailto:dmh1@tpu.ru)

В настоящее время принято считать перспективным ядерные реакторы 4-го поколения, например, реактор БН-800, использующие мокс-топливо. Производство мокс-топлива имеет технологические особенности и требует контрольных операций, не характерных для топлива на основе  $UO_2$ .

В связи с тем, что мокс-топливо содержит  $Pu^{239}$ , который претерпевает, в основном  $\alpha$ -распад, и примерно в 180000 раз активнее природного  $U$ , попадание даже малых частиц топлива на внешнюю поверхность трубки твэла определяет большую  $\alpha$ -активность. Поэтому при производстве твэлов с мокс-топливом контролируют поверхностное загрязнение  $\alpha$ -активными радионуклидами.

При загрузке трубки топливным столбом, частицы топлива могут попасть на торец трубки. При последующей приварке заглушки, возможно загрязнение сварного шва заглушки. Загрязнение твэла представляет из себя частицы мокс-топлива находящиеся на поверхности трубки, а также включения частиц топлива во внутренние объемы сварочного шва заглушки твэла.

Известна технология дезактивации трубки твэла, включающая протирку поверхности твэла через тканевые чистящие элементы картриджа [патент РФ№2605540]. Однако, метод не обеспечивает полное удаление радиоактивных пылинок, частично утопленных в объем сварного шва заглушки твэла.

Нами проводятся исследования, целью которых является разработка метода лазерной дезактивации внешней поверхности оболочки твэла, в том числе сварных швов.

Известно, что трубка оболочки твэла и мокс-топливо имеют разные теплофизические свойства: теплоемкость, теплопроводность, температуры плавления и кипения. Металлы имеют большую теплопроводность, чем оксиды металлов  $UO_2$ ,  $PuO_2$ . Хотя температуры кипения металлов значительно меньше, чем  $UO_2$ ,  $PuO_2$ , но при импульсном лазерном нагреве температура металлов значительно меньше, чем у их оксидов. Поэтому с помощью лазерного излучения возможно избирательно испарять  $UO_2$ ,  $PuO_2$  с поверхности металлов. При этом металлическая оболочка может остаться практически нетронутой. Однако, необходимо определить параметры импульсов лазерного излучения, при воздействии которых будут испаряться частицы  $UO_2$ ,  $PuO_2$ , утопленные в металл. При этом избыточная энергия, действующая на металлическую оболочку, должна рассеиваться по оболочке твэла, не повреждая её.

Исследования, связанные с использованием радионуклидов можно проводить только в специальных лабораториях. Поэтому мы использовали имитаторы радионуклидов: смесь  $CeO_2$  с другим лантаноидом  $Nd_2O_3$ . Оксиды  $CeO_2+Nd_2O_3$  можно использовать в качестве имитаторов  $UO_2+PuO_2$ , т.к. они имеют схожую зависимость теплопроводности от температуры, а также соотношения температур кипения и плавления.

Для экспериментальных исследований была собрана установка, включающая импульсный лазер, линзу, позиционирующее устройство с закрепленной пластиной, имитирующей поверхность трубки твэла.

В докладе обсуждаются экспериментальные результаты и процессы, протекающие на поверхности металла, содержащем керамические частицы, при облучении импульсным лазерным излучением.



## МЕТОД И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИТИЕВЫХ МИШЕНЕЙ

Д. Чумаков, В. Кабак, Му Юйчэнь, Г.Н. Дудкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dkc1@tpu.ru](mailto:dkc1@tpu.ru)

В ядерной астрофизике одной из основных проблем является проблема «космологического лития». Проблема «космологического лития» является серьезной проблемой для понимания ранней Вселенной и подвергает сомнению стандартную модель Big bang nucleosynthesis (SBBN). Массовая распространенность ядер лития-7, определенная средствами наблюдательной астрономии, примерно в 3 раза меньше результатов расчетов по SBBN модели (проблема «космологического лития-1»). Проблема «космологического лития-2» заключается в том, что до последнего времени массовая распространенность ядер лития-6, определенная средствами наблюдательной астрономии, была примерно в 1000 раз больше значений расчетов по SBBN модели. Основу расчетов по SBBN модели составляет знание сечений и астрофизических  $S$  – факторов ядерных реакций, участвующих в примордиальном синтезе. В ТПУ впервые предлагается измерить сечение и астрофизический  $S$  – фактор реакции  $T(^3\text{He},\gamma)^6\text{Li}$  в диапазоне энергий 16-19 кэВ в с.ц.м., используя импульсный ускоритель легких ионов Холловского типа. Для калибровки экспериментальной установки будет использована реакция  $T(^1\text{H},\gamma)^4\text{He}$ , исследование которой, кроме того, имеет самостоятельное научное значение.

Значительную трудность представляет применение в экспериментах тритиевой мишени, обусловленную сложностью ее изготовления, ее радиоактивностью, а также ее большой площадью (74 см<sup>2</sup>). Мишени представляют собой диск из молибдена диаметром 97 мм и толщиной 0.2 мм, на одну из торцевых поверхностей которой нанесен методом Сивертса слой из тригида титана. Толщина нанесенного слоя составляет 1.5 мкм. Измерение распределения концентрации атомов трития по глубине слоя мишени из тригида титана осуществляется методом детектирования тритонов отдачи (ERD-метод) с использованием пучка  $\alpha$ -частиц с энергией 2.3 МэВ, создаваемого с помощью ускорителя Ван де Граафа лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. При этом не проводятся измерения концентрации трития по площади мишени вследствие большой затраты ускорительного времени.

Нами предложен метод исследования концентрации трития по площади, используя ее радиоактивность. Тритий, радиоактивный изотоп водорода имеет период полураспада  $T_{1/2} = 12.262$  года и распадается по  $\beta^-$ -распаду, образуя изотоп  $^3\text{He}$ . Максимальная энергия бета частиц равна  $E_\beta = 18.6$  кэВ, что вполне достаточно, чтобы возбудить  $k\alpha$  и  $k\beta$  рентгеновские линии титана с энергиями  $E_{k\alpha} = 4.51$  кэВ и  $E_{k\beta} = 4.93$  кэВ. Регистрируя эти рентгеновские линии по площади мишени, и нормируясь на концентрацию трития, измеренную на ускорителе Ван де Грааф, можно определить равномерность распределения трития по площади мишени.

Для регистрации рентгеновских линий применен полупроводниковый кремниевый детектор ППД «БДЕР-КИ-11К»  $d=12$ мм, с коллимацией. Бериллиевое окно  $h=25$  мкм. В данном докладе представлены результаты исследования равномерности распределения трития по площади мишени для 4-х тритиевых мишеней.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИММОБИЛИЗАЦИИ ИЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ  
БАССЕЙНОВ-ХРАНИЛИЩ ЖРО В УСЛОВИЯХ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ  
ВЧФ-РАЗРЯДА

Л.А. Шестакова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [shestakova\\_lyu@mail.ru](mailto:shestakova_lyu@mail.ru)

За период работы ФГУП ФЯО «Горно-химический комбинат» накоплены и размещены в бассейнах-хранилищах жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) в виде иловых отложений (ИЛО), имеющие состав: Fe (3-17%), Si (2,8-8,5%), Ca (0,2-3,2%), Mg (1-2,8%), Na (0,7-1,9%), P (0,1-0,9%) [1].

Общими недостатками традиционно используемых методов переработки ИЛО (сорбционные, электрохимические, химические способы переработки, различные способы высокотемпературной обработки с получением керамических и стеклоподобных матриц) является многостадийность и высокая стоимость [2]. Перспективным является прямая плазменная иммобилизация ИЛО в виде ило-органических композиций (ИЛОК), включающих органический компонент.

В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса прямой плазменной иммобилизации ИЛО в воздушной плазме ВЧФ-разряда в расплавах хлоридов металлов (NaCl, KCl), стойких к радиационному воздействию (Рис. 1). Определены составы ИЛОК и режимы, обеспечивающие в воздушной плазме их энергоэффективную иммобилизацию с получением расплавов требуемого состава.



Рис. 1. Плазменный стенд «Высокочастотный факельный плазматрон на базе генератора ВЧГ8-60/13» для исследования процесса плазменной иммобилизации ИЛО

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при создании технологии плазменной иммобилизации иловых отложений бассейнов-хранилищ ЖРО, а также других радиоактивных отходов ядерного топливного цикла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестакова Л.А. Моделирование и исследование процессов плазменной утилизации и иммобилизации иловых отложений бассейнов-хранилищ ЖРО // IX Школа-конференция молодых атомщиков Сибири: сборник тезисов докладов 17-19 октября 2018 года, г. Томск. – Томск: Дельтаплан, 2018. – С. 50.
2. Дмитриев С.А., Стефановский С.В. Обращение с радиоактивными отходами. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2000, с.12-20.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ ИЗ ГЕТЕРОГЕННОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

К.Т. Шикерун, А.В. Сычев

Научный руководитель: проф. В.Ф. Мышкин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [shikerunk@gmail.ru](mailto:shikerunk@gmail.ru)

Низкотемпературная неравновесная плазма позволяет проводить с высокой эффективностью многие процессы. Например, синтез новых молекул, сфероидизация частиц порошка, формирование тугоплавких или твердых покрытий (в том числе, алмазоподобных пленок). Также известны различные методы плазменного разделения изотопов.

Большинство плазменных процессов протекают с образованием конденсированной дисперсной фазы (КДФ). При этом параметры процесса формирования частиц КДФ и плазменной системы взаимно влияют друг на друга. Например: при образовании частиц КДФ выделяется теплота фазового перехода – плазма разогревается. Испарение частиц наоборот, обуславливает охлаждение плазмы. Оба процесса приводят к значительному изменению химического состава плазмы. Также следует учитывать, что частицы КДФ в низкотемпературной плазме (в особенности неравновесной) приобретает электрический заряд. Скорость накопления заряда зависит как от материала, так и от его диаметра. При этом частицы из разных материалов могут заряжаться как положительно, так и отрицательно. Захват свободных электронов дисперсными частицами обуславливает уменьшение подвижности зарядов.

Таким образом, появление или изменение распределения по размерам дисперсных частиц напрямую влияет на электрофизические характеристики плазмы (проводимость, диэлектрическая проницаемость, плазменная частота). Изменение электрофизических параметров плазмы сопровождается изменением энерговклада и кинетики целевого процесса. Поэтому поиск путей нетеплового управления гранулометрическим составом частиц КДФ является актуальной задачей.

Известно, что время сорбции частиц из газовой фазы на поверхности твердого тела зависит от температуры его поверхности. Поэтому часть сорбированных атомов испаряются. Магнитное поле позволяет изменять относительную скорость испарения изотопов. При этом изменяется изотопный эффект.

Магнитное поле может увеличивать скорость формирования ядер конденсации, так как позволяет уменьшать время формирования химической связи между атомами. При одинаковом количестве вещества в паровой фазе, увеличение количества ядер конденсации уменьшает средний размер дисперсных частиц.

Экспериментальный стенд основывался на дуговом разряде между алюминиевыми электродами. Использовался высоковольтный источник питания. Электрическую дугу формировали в атмосфере аргона. Магнитное поле, в диапазоне 2-100 мТл, создавали с помощью двух постоянных магнитов с остаточной намагниченностью 250 мТл. Формирующийся порошок осаждали на стеклянные подложки в различных магнитных полях и анализировали с помощью ТЕМ и SEM микроскопии.

Получаемые результаты подтверждают, что при действии магнитного поля на процесс нуклеации паров диамагнитных металлов изменяются структура конденсированной фазы и размеры дисперсных частиц. В докладе, кроме особенностей нуклеации паров из низкотемпературной плазмы, также обсуждается роль селективных по изотопам парамагнитных явлений, вносящих вклад в изотопный эффект конденсации, дополнительно к термодинамическим параметрам фазовых переходов.

## CHANGE OF EXTERNAL FLOWS OF THE SEPARATION CASCADE TO REDUCE THE TRANSITION PROCESS DURATION

Ushakov A.A.<sup>1,2</sup>, Orlov A.A.<sup>2</sup>, Sovah V.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company «Production Association «Electrochemical Plant»,

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: [ushakovaa2015@sibmail.com](mailto:ushakovaa2015@sibmail.com)

Recently, isotope-modified materials have been widely used in nuclear energy, medicine, and basic research. The change in the composition of the isotope mixture occurs in the process of its separation by any method. In recent decades, the interest of researchers has been riveted to the separation of multicomponent isotopic mixtures (MIS) in cascades of gas centrifuges (GC).

The stationary mode of separation of MIS in the GC cascade is preceded by a non-stationary process, which can conditionally be divided into two stages: 1 - filling the cascade with a working substance, 2 - transition process, during which stationary values of the concentrations of the components of the isotopic mixture in the steps and flows of the cascade are established. Of particular interest is the study of the transition process in view of its considerable duration and, as a consequence, a significant negative impact on the efficiency of the GC cascade. The transition process is an unsteady hydraulic and separation process, during which the values of the flows and pressures of the working substance and the concentrations of the components change.

This paper presents the results of studies to determine the effect of external cascade flows on the duration of the transition process using a mathematical model. The studies were carried out for the case of separation of germanium isotopes, which are used to create semiconductor materials and to study neutrinoless double  $\beta$ -decay.

The influence of the values of the feed flows and the light fraction of the cascade on the time to achieve the desired concentration of  $^{72}\text{Ge}$  was shown. It was found that the duration of the transition process is reduced by about 4 times with an increase in the supply flow by 20% and the maximum value of the light fraction flow. The transition process can be represented as the transfer of a desired isotope in the direction of the stage of selection of light or heavy fractions, accompanied by the accumulation or removal of an excess of this isotope from the cascade with an increase or decrease in its maximum concentration in the cascade.

**MATHEMATICAL MODELING OF FILLING GAS CENTRIFUGE CASCADE  
FOR NICKEL ISOTOPE SEPARATION BY VARIOUS FEED FLOW RATE**

Ushakov A.A.<sup>1,2</sup>, Orlov A.A.<sup>2</sup>, Sovah V.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Joint Stock Company «Production Association «Electrochemical Plant»

<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University

E-mail: [ushakovaa2015@sibmail.com](mailto:ushakovaa2015@sibmail.com)

During the operation of gas centrifuge (GC) cascade for the multicomponent isotope mixture (MIM) separation there are nonstationary hydraulic processes. In all nonstationary processes, safe operation of equipment should be ensured and separation work losses should be minimized. In this regard, the research into the effects of nonstationary processes on the efficiency of MIM separation seems to become even more important. We had done verification of developed mathematical model as an example silicon, krypton and germanium isotope separation. Filling GC cascade with process gas precedes an isotope separation mode. Distribution of isotopes in cascade stages after its filling is initial conditions for calculation of subsequent nonstationary process. Thus actual task is research MIM separation during filling GC cascade. Earlier we had identified that isotope concentrations on light and heavy fraction flows after filling cascade depend on feed stage number.

This article presents the results of research filling GC cascade for nickel isotope separation with process gas by various feed flow rate. Nickel isotopes are used for nuclear physics experiments and production radioactive isotopes (for example,  $^{62}\text{Ni}$  stable isotope is used as source material to produce  $^{63}\text{Ni}$  radioactive isotope). Analysis of the research results has shown that nickel isotopes are distributed along the cascade length in accordance with their mass numbers regardless of feed flow rate. Isotope concentrations in stages, light and heavy fraction flows after filling cascade depend on feed flow rate. The increase of feed flow rate leads to reduce of isotope concentration maximum value and the transfer of isotopes. Optimization of feed flow rate during filling cascade makes it possible to reduce duration of the subsequent nonstationary process to steady-state mode of cascade.

## СЕКЦИЯ 5

### РАДИАЦИОННЫЕ И ПУЧКОВО-ПЛАЗМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ

## ПОЛУЧЕНИЕ ФОТОКАТАЛИТИЧЕСКИХ ПЛЁНОК ОКСИДА ТИТАНА МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГ- НЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

М.А. Андреева, Ю.Н. Юрьев

Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов,

Россия, г. Томск, ул. Красноармейская 99А, 634034

E-mail: [maa7@tpu.ru](mailto:maa7@tpu.ru)

Тонкие плёнки оксида титана  $TiO_2$  применяются в качестве тонкопленочных фотокатализаторов, позволяющих повысить эффективность технологических процессов очистки воды и воздуха от токсичных органических примесей [1]. Принцип действия фотокатализатора основан на фотокаталитическом эффекте, который заключается в разложении органических загрязнений под действием ультрафиолетовой (УФ) части спектра света. Фотокаталитические покрытия на основе оксида титана получают несколькими способами, одним из которых является магнетронное распыление.

Анализ использования оксида титана в фотокаталитических процессах показывает, что кристаллическая модификация анатаз, является наиболее фотокаталитически активной по сравнению с двумя другими (рутил и брукит) [2]. В связи с этим получение анатаза является наиболее перспективным, однако плёнки, полученные с помощью магнетронного распыления, в основном являются аморфными с незначительным количеством кристаллической фазы, увеличить содержание которой можно с помощью последующего отжига.

Другой проблемой, присущей магнетронному распылению, является сильная зависимость свойств покрытий от режимов осаждения, наиболее весомым из которых является парциальное давление кислорода, определяемое его потоком. Наличие в камере реакционного газа приводит к нежелательным процессам на катоде магнетронного узла, а также наиболее сильно влияет на состав покрытия.

Таким образом, цель работы состоит в получении закономерностей влияния режимов осаждения и температуры последующего отжига на фотокаталитические свойства плёнок оксида титана, полученных реактивным магнетронным распылением.

Получения тонких плёнок  $TiO_2$  толщиной  $100 \pm 2$  нм осуществлялось на вакуумной ионно-плазменной установке ТЕМП-74М. На магнетрон подавалось импульсное напряжение с частотой 1, 20, 30, 40 кГц при коэффициенте заполнения 80%. Мощность разряда составляла 2 кВт. Потоки аргона в рабочую камеру был постоянным  $Q(Ar) = 6,5$  см<sup>3</sup>/мин, а поток кислорода  $Q(O_2) = 6,5$  см<sup>3</sup>/мин и  $Q(O_2) = 7,0$  см<sup>3</sup>/мин. Рабочее давление составляло не более  $3 \cdot 10^{-1}$  Па. Структура всех полученных покрытий  $TiO_2$  исследовалась методом рамановской спектроскопии на комплексе Centaur U до отжига и после отжига 300; 500; 600 °С на подложках из стекла. Для исследования морфологии поверхности плёнок оксида титана на кремневой подложке использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) серии Zeiss Supra 55.

Структура всех плёнок, полученных при потоке кислорода 6 см<sup>3</sup>/мин без отжига, является аморфная. Для плёнок, полученных при частоте импульсов 20 кГц и 30 кГц, заметная кристаллизация происходит при отжиге плёнок в 300 °С, а для 1 кГц и 40 кГц при 500 °С, 600 °С соответственно. Полученные пики плёнок оксида титана 145 см<sup>-1</sup> и 637 см<sup>-1</sup> характерны для фазы анатаза.

Для образцов, которые не подвергались отжигу и были получены при  $Q(O_2) = 7,5$  см<sup>3</sup>/мин наблюдаются слабо выраженные пики, которые говорят о наличии фазы анатаза. После отжига в 300 °С, наблюдается

выраженные пики  $144\text{ см}^{-1}$  и  $635\text{ см}^{-1}$  кристаллической структуры анатаза. Пики, характерные фазе рутила обнаружены не были.

Морфология поверхности плёнки с ростом температуры значительно изменяется. Так исходный образец при  $Q(O_2) = 6\text{ см}^3/\text{мин}$ ,  $f = 1\text{ кГц}$  имеет поверхность с мелкими зёрнами размером  $7,9 \pm 1,5\text{ нм}$  после увеличения температуры отжига происходит укрупнение зерна до  $19,1 \pm 5,7\text{ нм}$ , а также увеличение расстояния между ними. А морфология поверхности плёнок  $TiO_2$ , полученных при частоте  $20\text{ кГц}$  и  $30\text{ кГц}$ , демонстрируют более гладкую структуру с размерами зёрен  $4 \pm 1\text{ нм}$ , после отжига образуется крупнозернистая плёнка с размерами  $36,8 \pm 5,3\text{ нм}$ , по сравнению с плёнками, полученными при частоте  $1\text{ кГц}$ . Вероятно, что после отжига плёнки приобретают столбчатую структуру.

Плёнки исследованы на фотокаталитическую активность по методике разложения метиленового синего раствора.

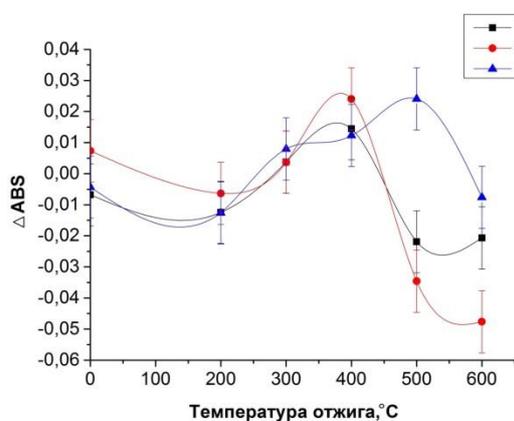


Рис. 1. Зависимость фотокаталитической активности от температуры отжига плёнок для  $Q(O_2) = 7,5\text{ см}^3/\text{мин}$

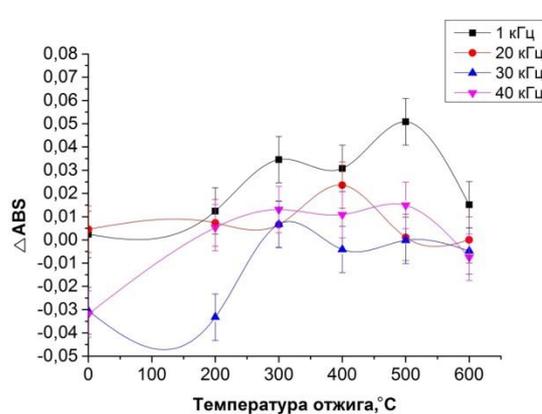


Рис. 2. Зависимость фотокаталитической активности от температуры отжига плёнок для  $Q(O_2) = 6\text{ см}^3/\text{мин}$

Отжиг плёнок в диапазоне от  $200$  до  $400\text{ °C}$  приводит к увеличению фотокаталитической активности. Это связано с формированием в покрытиях фазы анатаза. Это подтверждается результатами рамановской спектроскопии. После отжига при температурах  $500-600\text{ °C}$  фотокаталитическая активность плёнок уменьшается, что связано с разрушением покрытия и деформацией стеклянной подложки.

Наибольшей активностью обладают плёнки, полученные при потоке кислорода, близком к началу переходных процессов ( $Q(O_2) = 6\text{ см}^3/\text{мин}$ ), при низкой частоте рабочего напряжения ( $f = 1\text{ кГц}$ ) и температуре отжига  $500\text{ °C}$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савинов Е.Н. Фотокаталитические методы очистки воды и воздуха // Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Т. 6. – № 11. – 52 – 56.
2. Фахрутдинова Е.Д. Получение и исследование физико-химических свойств допированных фотокаталитических материалов на основе диоксида титана: Автореф. дис. канд. хим. наук. – Томск, 2014. – 3 с.



ЭЛЕМЕНТНЫЙ И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ КАЛЬЦИЙФОСФАТНЫХ МИШЕНЕЙ  
ДЛЯ ВЧ-МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

А.А. Болат-оол, К.А. Просолов, М.А. Химич, О.А. Белявская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aab157@tpu.ru](mailto:aab157@tpu.ru)

В настоящее время актуальным направлением медицинского материаловедения является модификация поверхности имплантатов биоактивными покрытиями с антибактериальными свойствами. Основной целью таких модификаций является снижение риска развития послеоперационных осложнений из-за бактериальных инфекций. Более того, необходимо сформировать защитные слои на имплантате, которые имели бы высокую прочность и достаточную адгезию к поверхности. Биоматериалы на основе кальцийфосфатов (СаР) широко используются в имплантологии благодаря тому, что их элементный состав близок к минеральной составляющей костной ткани. Значительный интерес представляет нанесение СаР биопокровов на основе гидроксиапатита (ГА) с частичным замещением в структуре ГА катионов  $\text{Ca}^{+2}$  на катионы  $\text{Zn}^{+2}$  и  $\text{Cu}^{+2}$ , так как ионы этих металлов не только имеют антибактериальные свойства, но и стимулируют процесс остеогенеза.

В работе проведены исследования элементного и фазового состава мишеней, сформированных методом одноосного прессования из порошков чистого ГА ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (ГА)), Zn-замещенного ГА ( $\text{Ca}_{9,6}\text{Zn}_{0,4}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (Zn-ГА)) и Cu-замещенного ГА ( $\text{Ca}_{9,8}\text{Cu}_{0,2}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  (Cu-ГА)). Порошки получали методом механохимической активации [1] с изменением удельной поверхности частиц порошка в диапазоне 0,7-60 м<sup>2</sup>/г.

Известно, что соотношение Са/Р для ГА ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) составляет 1,67. В нашем случае, по результатам энергодисперсионного рентгеновского анализа были сформированы мишени с повышенным содержанием кальция таким, что соотношение Са/Р для мишени, изготовленной из порошка чистого ГА, составило  $1,53 \pm 0,5$ ; для Zn-ГА –  $1,63 \pm 0,5$ ; для Cu-ГА –  $1,86 \pm 0,5$ .

Благодаря оптимальному режиму спекания, подобранному экспериментально, удалось получить мишени, фазовый состав которых представлен фазой ГА. Замещение катионов  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$  в решетке ГА подтверждается тем, что на дифрактограммах мишеней, полученных из порошков Zn-ГА и Cu-ГА, присутствует небольшое смещение пиков фазы ГА в сторону малых углов относительно профиля мишени из чистого ГА. Эти смещения указывают на изменение параметров решетки.

Таким образом, показано, что синтез механохимическим методом порошков ГА с частичным ионным замещением и использованными режимами спекания позволяют изготавливать мишени желаемого фазового состава, где ионы  $\text{Ca}^{2+}$  частично замещены ионами  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ .

*Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, направление III.23.2.5, в ИФПМ СО РАН.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чайкина М.В. Механохимический синтез изоморфных разновидностей апатита в качестве материалов для биокерамики // Физическая мезомеханика. – 2004. – Т. 7. – №5. – С. 101–110.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛИМЕРНОГО КОЛЛИМАТОРА,  
ИЗГОТОВЛЕННОГО ПОСРЕДСТВОМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИХ,  
НА РАССЕЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ**

Е.А. Бушмина, Ю.А. Зубкова, А.А. Булавская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [bushmina.2000@mail.ru](mailto:bushmina.2000@mail.ru)

Онкологические заболевания являются одними из самых распространённых заболеваний в мире, но их эффективное лечение стало возможным с помощью комплексов процедур химиотерапии, лучевой терапии и хирургии. Лучевая терапия основана на развитии биологических реакций в облученных частицами патологически измененных тканях. Но при этом нужно минимально облучить здоровые ткани и органы. Однако, эффективность лечения достигается не только безопасностью его проведения, но ещё и скоростью проведения лечения [1].

В настоящее время для формирования полей облучения электронами используются стандартные наборы блоков и коллиматоров или персонализированные металлические коллиматоры [2]. Но для создания таких коллиматоров нужно иметь специальное помещение и дорогостоящее оборудование, включающее устройства для их создания и вентиляционные системы для очистки помещения от токсичных паров металлов, а также необходим специально подготовленный персонал. Для улучшения результата лечения предлагается создание индивидуальных пучков электронов при помощи полимерных коллиматоров, созданных посредством аддитивных технологий. Этот метод требует меньших расходов и отличается быстротой при создании полимерных коллиматоров.

Для осуществления поставленной задачи следует исследовать влияние толщины полимерного коллиматора на рассеяние высокоэнергетичных электронов при расположении коллиматора в аппликаторе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. - 500 с.
2. Workstation for melting and casting alloy. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.parscientific.com/Workstation.html>

ДИНАМИКА РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
КЕРАМИКАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПОТОКАМИ ГАММА-КВАНТОВ  
И ЭЛЕКТРОНОВ

А.М. Владимиров, Л.Ф. Смекалин, А.А. Лукащук, Т.В. Смекалина  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [amvladimirov88@yandex.ru](mailto:amvladimirov88@yandex.ru)

В ряде литературных источников [1–4] показано, что процесс радиационной электризации диэлектрических материалов в той или иной степени определяется их радиационной проводимостью. В целях выяснения различий в характере радиационной электропроводности исследуемых материалов и возможного влияния этих различий на процессы радиационной электризации были исследованы кинетика радиационной электризации диэлектриков при облучении электронами и динамика объемной радиационной электропроводности этих же диэлектриков в процессе облучения гамма-квантами высоких энергий.

В качестве исследуемых материалов были взяты гексагональный чистый нитрид бора ( $BN$ ) и композиция 60% - го нитрида бора и 40%-го оксида кремния ( $BN + SiO_2$ ). Исследования проводились на установках «Прогноз» [5] и «Радиян» [6]. Образцы представляли собой диски толщиной 5 мм и диаметром 80 мм. На тыльной стороне напылен алюминиевый электрод диаметром 60 мм (задний электрод), приклеенный токопроводящим компаундом к металлическому основанию диаметром 60 мм, включенному в систему измерения тока во время облучения и релаксации заряда.

Установлены следующие закономерности в накоплении радиационного заряда при облучении потоком моноэнергетических электронов (энергия пучка – до 100 кэВ):

– потенциал поверхности, а, следовательно, и радиационный заряд в образцах  $BN$  и ( $BN + SiO_2$ ) монотонно возрастают по времени облучения до стационарного значения. При этом величина накопленного заряда в керамике  $BN$  существенно меньше, чем в керамике ( $BN + SiO_2$ ), а время выхода на стационар заметно больше.

С другой стороны, после прекращения облучения, релаксация накопленного радиационного заряда на керамике  $BN$  идет значительно быстрее, чем на керамике ( $BN + SiO_2$ ).

Значения исходной темновой электропроводности для всех образцов находятся в диапазоне величин  $(1,5–4,5) \cdot 10^{-15} S/m$ .

При включении гамма-излучения (энергия квантов 1,25 МэВ) проводимость резко возрастает до величин  $(3–4) \cdot 10^{-14} S/m$ . При дальнейшем облучении установлены следующие закономерности:

–объемная проводимость образцов  $BN$  монотонно возрастает с ростом дозы гамма-излучения до практически постоянного значения  $(1,15–1,2) \cdot 10^{-13} S/m$  при достижении значений дозы (190–220)  $Gy$ . Время облучения (2–2,2) часа.

–объемная проводимость образцов ( $BN + SiO_2$ ) практически не изменяется при наборе дозы гамма-излучения до 270  $Gy$  (более 2,5 часа непрерывного облучения). После прекращения воздействия гамма-квантов на исследуемые керамики наблюдалась релаксация радиационной электропроводности в обоих образцах. При этом установлено, что скорость релаксации образцов  $BN$  и ( $BN + SiO_2$ ) различна и имеет сходный ха-

ракет со скоростью нарастания радиационной электропроводности до установления постоянного значения. Темновые характеристики облученных образцов возвращаются в исходное состояние после выдержки в вакууме примерно в течение 24-х часов.

Таким образом, установлено, что хотя исходные темновые величины электропроводности примерно одинаковы для образцов из  $BN$  и  $(BN + SiO_2)$ , значения их радиационной электропроводности при длительном облучении высокоэнергетическими гамма-квантами различаются почти на порядок.

Дальнейшие исследования влияния радиационной электропроводности на уровни электризации конструкционных материалов при воздействии факторов космического пространства должны быть направлены на более детальное изучение, как механизмов самой радиационной электропроводности, так и взаимосвязи накопления объемных зарядов и их переноса в объеме диэлектриков при постоянно меняющемся внутреннем электрическом поле.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paulmier T., Hanna R., Belhaj M., Dirassen B., Payan D., Balcon N., Tonon C., Dantras E., Bernes A.. Aging Effect and Induced Electric Phenomena on Dielectric Materials Irradiated With High Energy Electrons // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2013. – V. 41. – № 12.
2. Starodubtsev V.A., Fursa T.V., Zausaeva N.N. Charge Electrification of Irradiated Dielectrics and its Effect on Incident Flu // Journal of Electrostatics. – 1998. – № 20. – P. 341-347.
3. Paulmier T., Dirassen B., Belin E., Payan D.. Material Charging in Space Environment: Experimental Test Simulation and Induced Conductive Mechanisms // IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2009. – V. 16. – № 3.
4. Paulmier T., Dirassen B., Arnaout M., Payan D., Balcon N. Radiation Induced Conductivity of Space Used // Spacecraft Charging Technology Conference. – 2014. – 135 P.
5. Vladimirov A.M., Bezhayev Y.A., Zykov V.M., Isaychenko V.I., Lukashchuk A.A., Lukonin S.E. Automated test bench for simulation of radiation electrification of spacecraft structural dielectrics // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 12th International Conference Radiation-Thermal Effects and Processes in Inorganic Materials. – Томск, 2017. – V.168. – С. 012037.
6. Пичугин В.Ф., Смекалин Л.Ф., Владимиров А.М. Радиационно-стимулированная электропроводность высоковольтной керамики при облучении гамма-квантами // «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине»: Труды VII Международной научно-практической конференции. – Томск, 2015. – С. 232–233.

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЛАСТИКОВОГО КОЛЛИМАТОРА С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

А.А. Григорьева, С.В. Мельченко, А.А. Булавская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [anngriгорievabr@gmail.com](mailto:anngriгорievabr@gmail.com)

В современной лучевой терапии (ЛТ) облучение пучками высокоэнергетических электронов является весьма востребованным, а в некоторых случаях фактически незаменимым способом лечения [1].

На сегодняшний день, на практике при проведении сеансов лучевой терапии электронными пучками формирование полей излучений ограничивается применением блоков из свинца, которые экранируют зону критических органов, однако, могут использоваться только при статическом облучении. Кроме того, форма таких металлических блоков имеет простую конфигурацию и не может в полной мере обеспечить сложное пространственное распределение дозы в теле пациента.

Помимо этого, используют индивидуальные металлические коллиматоры, однако, существует ряд сложностей при изготовлении таких изделий, связанные с выделением токсических веществ при плавке металлов.

В свою очередь, преимущество аддитивных технологий заключается в быстром изготовлении коллиматоров индивидуальной конфигурации, увеличивающих качество процедур ЛТ, низкой стоимостью используемых материалов, простотой технологического процесса изготовления полимерных изделий и абсолютно не токсичным производством [2-3].

В данной работе описан процесс изготовления полимерных коллиматоров при помощи аддитивных технологий, для дальнейшего формирования электронных пучков. Данное использование пластиковых коллиматоров обусловлено тем, что при проведении сеансов лучевой терапии необходимо задавать сложные пространственные распределения поглощенной дозы в органах и тканях, в виду анатомических особенностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10052).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 500с.
2. Красных АА, Милойчикова ИА, Стучебров СГ. Анализ характера взаимодействия электронных пучков с модифицированным АБС-пластиком. Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2017;6(2):108-112. doi: 10.1134/S2304487X17020080
3. Красных АА, Милойчикова ИА, Стучебров СГ. Анализ характера взаимодействия электронных пучков с модифицированным АБС-пластиком. Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2017;6(2):108-112. doi: 10.1134/S2304487X17020080

СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ TiAlN, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
ВАКУУМНО-ДУГОВОГО ИСПАРЕНИЯ

Л.Е. Гусс, Ю.Н. Юрьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [lyda.guss@mail.ru](mailto:lyda.guss@mail.ru)

Применение металлообрабатывающего инструмента с различного рода покрытиями обусловлена необходимостью вести обработку с высокими скоростями, приводящими к большим термическими нагрузкам на инструмент. Одним из наиболее распространенных защитных покрытий являются пленки на основе нитрида титана. Они известны достаточно давно и изучались во многих научных и экспериментальных исследованиях [1-3]. Такие покрытия имеют очень хорошие физические свойства, но не лишены недостатков, таких как относительно невысокий показатель микротвердости, и невысокая возможная рабочая температура. Для их устранения рекомендуется добавлять в покрытие различные легирующие элементы (Al, C и другие), которые выбираются в зависимости от условий применения. Одним из наиболее применимых для высокоскоростной обработки покрытий является TiAlN, который имеет высокий показатель микротвердости (39 ГПа), максимальную рабочую температуру 800 С° и высокую стойкость к абразивному и адгезионному изнашиванию. Кроме того, его состав легче контролировать при нанесении, например, по сравнению с TiCN. Однако свойства TiAlN очень сильно зависят от процентного соотношения в покрытии Ti и Al.

Таким образом, целью данной работы является получение закономерностей в зависимости свойств покрытий TiAlN от соотношения Ti и Al.

В результате обнаружено, что для каждого из используемых катодов с различным содержанием Ti и Al имеется точка с максимальным значением твердости и модуля упругости, соответствующая по видимому составу покрытия, близкому к стехиометрическому. Для катода с соотношением Ti и Al 50/50% она соответствует давлению азота 0,1Па, а для 66,6/33,4% - 0,12Па.

Покрытия, содержащие большее количество алюминия обладают большей стойкостью износа. Это может быть связано с тем, что более мягкий алюминий, попадающий на пленку в виде микрокапельной фракции, выступает в качестве смазки, уменьшая коэффициент трения индентора о пленку. При этом использование катода с соотношением TiAl 33,4/66,6% позволяет улучшить износостойкость покрытий TiAlN более чем на порядок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хамдохов, А. З. Структурно-фазовая однородность субмикронных пленок нитрида титана и способы ее повышения: дисс. канд. техн. наук: 01.04.15 / Хамдохов Алим Залимович. – Нальчик. 2017. – 103 с.
2. Цыренов, Б. Д., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Формирование и свойства покрытий TiN на титановом сплаве ОТ4-1 // Труды II Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». – Улан-Удэ, 2006. –Т.1 – С.1-7
3. Титов В. Покрытия для режущего инструмента // Оборудование - технический альманах. – 2004 – №1. – С.26-29.

ШАБЛОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ  
ТРАНЗИСТОРОВ С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N-ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ ЗАДАЧ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

А.А. Жук<sup>1</sup>, А.М. Пилипенко<sup>2</sup>, В.Н. Бирюков<sup>2</sup>, П.С. Будяков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, 344010

Е-mail: [alexey.zhuk96@mail.ru](mailto:alexey.zhuk96@mail.ru)

<sup>2</sup>Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,

Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, 347922

В настоящее время комплементарные полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (*CJFET*) находят все большее применение в современных аналоговых интегральных схемах (ИС), предназначенных для обработки сигналов датчиков различных физических величин [1]. Упомянутые выше ИС как правило используются на беспилотных космических аппаратах, которые часто работают в экстремальных условиях, в том числе при радиационном воздействии. *CJFET*, в свою очередь, обладают минимальным уровнем собственного шума и высокой радиационной стойкостью [2].

Для описания вольт-амперных характеристик (ВАХ) *CJFET* при нормальных условиях достаточно эффективна *SPICE*-модель *CJFET*, так же известная как модель Шичмена-Ходжеса:

$$I(V_{DS}, V_{GS}) = \begin{cases} 0, & \text{for } V_G \leq 0; \\ \beta(2V_G - V_{DS})V_{DS} (1 + \lambda V_{DS}), & \text{for } V_{DS} \leq V_G; \\ \beta V_G^2 (1 + \lambda V_{DS}), & \text{for } V_{DS} > V_G, \end{cases} \quad (1)$$

где  $I$  – ток стока;  $V_{DS}$  – напряжение сток-исток;  $V_{GS}$  – напряжение затвор-исток;  $V_G = V_{GS} - V_{TH}$ ;  $V_{TH}$  – пороговое напряжение;  $\beta$  – удельная крутизна;  $\lambda$  – коэффициент модуляции длины канала.

При радиационном воздействии ВАХ *CJFET* существенно отличаются от типовых, поэтому относительная погрешность *SPICE*-модели значительно возрастает и на некоторых участках может превышать 50%. Пример выходных ВАХ четырех тестовых образцов *CJFET*, описанных в [2], при воздействии быстрых электронов с энергией 6 МэВ и флюенсом  $10^{16}$  эл./см<sup>2</sup> представлен на рис. 1.

Применение шаблонных моделей (ШМ) является наименее трудоемким способом получения приемлемого уровня максимальной относительной погрешности моделирования полевых транзисторов при экстремальных условиях [3]. Для создания ШМ необходимо заменить один или несколько параметров исходной физической модели функцией управляющих напряжений. Параметры исходной модели полупроводниковых приборов рекомендуется заменять отношением степенных рядов, что позволяет обеспечить монотонность ВАХ в отличие от разложения в степенной ряд, при котором возможно нарушение монотонности. В данной работе для получения ШМ предлагается заменить параметры  $\beta$  и  $\lambda$  в исходной физической модели (1) следующими выражениями:

$$\beta = \beta_0 \frac{\beta_1 V_G}{\beta_1 V_G + \beta_2 V_G^2}; \quad \lambda = \lambda_0 \frac{\lambda_1 V_{DS}}{\lambda_1 V_{DS} + \lambda_2 V_{DS}^2}. \quad (2)$$

где  $\beta_0$  и  $\lambda_0$  – физические параметры шаблонной модели;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  и  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – эмпирические коэффициенты.

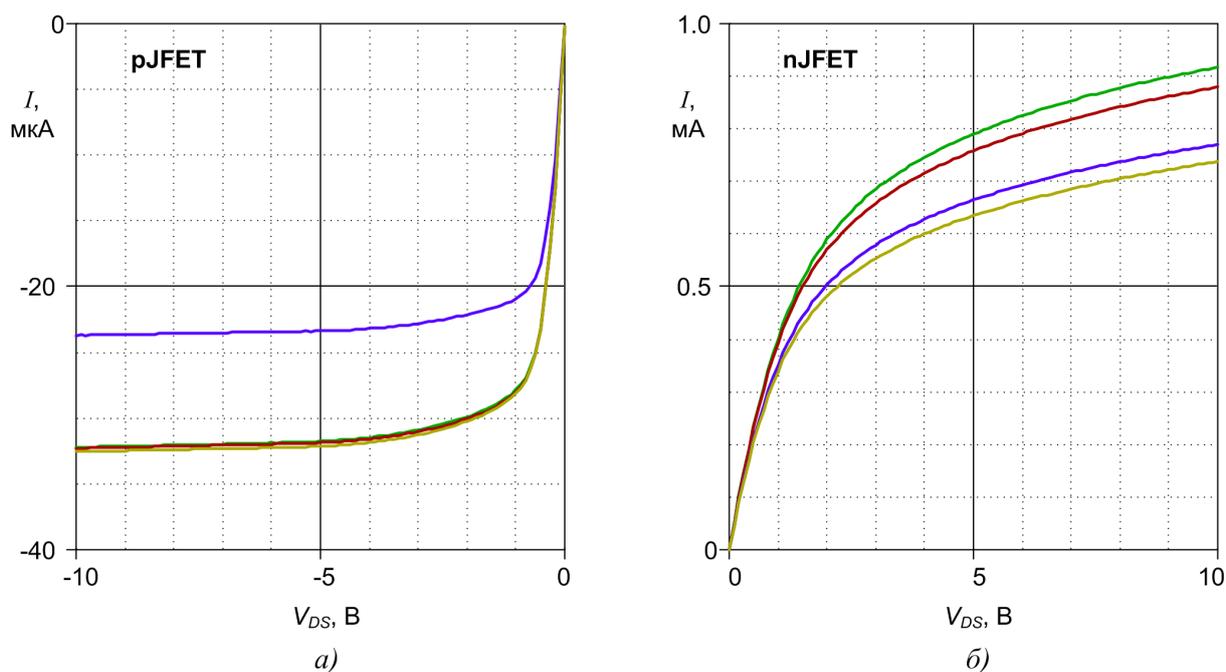


Рис. 1. Выходные ВАХ четырех тестовых образцов pJFET (а) и четырех тестовых образцов nJFET (б) при  $V_{GS} = 0$

Предлагаемая шаблонная модель обеспечивает повышение точности моделирования ВАХ *CJFET* в 3-4 раза по сравнению с известной физической моделью (максимальная относительная погрешности моделирования не превышает 10 %). Следует отметить, что для различных видов полевых транзисторов требуется использовать различные исходные физические модели, поскольку чем точнее исходная модель, тем точнее шаблонная модель.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Tchekhovski V.A., Bugakova A.V., Maliy I.V. Cryogenic Operational Amplifier on Complementary JFETs // Proceedings of 2018 IEEE East-West Design and Test Symposium (EWDTS), 2018. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524640.
2. Dvornikov O. V., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The accounting of the simultaneous exposure of the low temperatures and the penetrating radiation at the circuit simulation of the BiJFET analog interfaces of the sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings, 2017. DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507.
3. Бирюков В.Н. Шаблонная модель р-канального полевого транзистора с изолированным затвором // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2019. – № 2. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/11/text.pdf> – 31.08.2019.



ТОПОЛОГИЯ И ПАРАМЕТРЫ ТЕСТОВОГО КРИСТАЛЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
КОМПЛЕМЕНТАРНЫХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N  
ПЕРЕХОДОМ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ И В УСЛОВИЯХ РАДИАЦИИ

А.А. Жук, Д.Г. Дроздов, П.С. Будяков, А.Е. Титов  
Донской государственный технический университет,  
Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, 344000

E-mail: [alexey.zhuk96@mail.ru](mailto:alexey.zhuk96@mail.ru)

Полевые транзисторы с управляющим p-n переходом (*JFET*) достаточно перспективны для применения в аналоговых микросхемах, работающих в тяжелых условиях эксплуатации [1]. Для совершенствования их конструкции и технологии изготовления в АО «НПП «Пульсар» (г. Москва) разработан тестовый кристалл, топология которого показана на рис. 1.

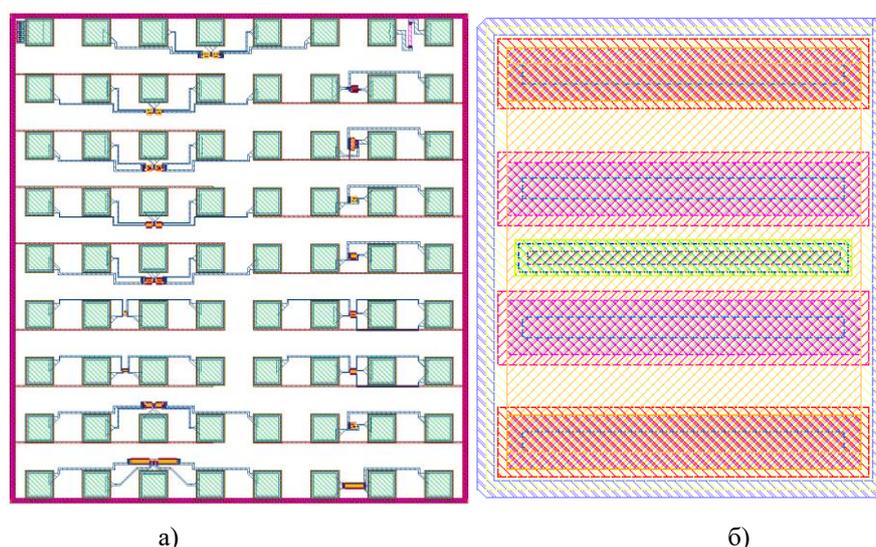


Рис. 1. Топология кристалла с p- и n-канальными JFET (а) и структура n-канального JFET (б)

Таб. 1. Основные параметры тестовых транзисторов

Параметр	$pJFET$	$nJFET$
IDSS (A): (UD = 10 В, UG = 0 В)	$-1,0 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
UTO (В): (UD = 10 В, ID = $\cdot 10^{-10}$ А)	5,5	-2,9
UDS: (UG = 0 В)	-31,0	29,5

Конструкция тестового кристалла позволяет исследовать свойства JFET в диапазоне криогенных температур и воздействии проникающей радиации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Д.Г. СВЧ комплементарный биполярный технологический процесс с высокой степенью симметрии динамических параметров транзисторов: Дис... канд. техн. наук: 05.27.01. – Защищена 24.10.2017. – Москва, 2017. - 165 с.: ил. – Библиогр.: с. 142-164.

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ КЛИНИЧЕСКОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ  
НА ГРАНИЦЕ ПЛАСТИКОВОГО БОЛЮСА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ  
ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ**

Ю.А. Зубкова, Е.А. Бушмина, А.А. Булавская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [yaz8@tpu.ru](mailto:yaz8@tpu.ru)

Онкологические заболевания представляют одну из главных проблем в современном обществе. Известным подходом к лечению злокачественных новообразований является метод лучевой терапии пучками электронов. Используя данный метод лечения, очень важно контролировать характеристики пучка, для того чтобы правильно проводить лечение. При планировании процедур лучевой терапии возникает сложность в доставке соответствующей дозы к опухоли. Решением этой проблемы может стать использование пластиковых изделий, изготовленных при помощи технологии трехмерной печати. Применение подобной технологии позволяет в сжатые сроки получить изделия требуемой формы, с помощью которых возможно учитывать особенности конкретных клинических случаев. Следовательно, используя подобные пластиковые устройства повышается точность доставки дозы к очагу новообразования, в результате чего растет эффективность лечения пациентов с онкологическими заболеваниями.

Одним из таких специализированных пластиковых изделий является болус, изготовленный из тканеэквивалентных материалов. Данное устройство располагается на поверхности тела пациента и позволяет контролировать глубинное распределение дозы в заданном направлении, а также повторять контуры тела человека [1]. Так как болус находится в непосредственном контакте с поверхностью человеческого тела, при планировании процедур лучевой терапии необходимо учитывать рассеяние на краях данного изделия разной толщины.

В данной работе исследовалось рассеяние клинического пучка электронов на краях пластикового болуса. С помощью программного кода была получена зависимость дозы, выраженной в процентах, от расстояния. В ходе обработки результатов были построены касательные полученных кривых и определены их углы наклона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 500 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЛУБИННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДОЗ  
ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАСТИКОВЫХ ОБРАЗЦАХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ  
С РАЗНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЗАПОЛНЕНИЯ МАТЕРИАЛОМ

В.С. Кондратьева, А.А. Булавская, И.А. Милойчикова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [vsk29@tpu.ru](mailto:vsk29@tpu.ru)

Основной задачей лучевой терапии является лечение злокачественных образований с помощью ионизирующего излучения при минимизации повреждения нормальных тканей, находящихся вблизи области облучения. Для этих целей в электронной лучевой терапии создаются индивидуальные коллиматоры, которые позволяют формировать сложные поля для облучения новообразований, расположенных близко к критическим органам. Одним из перспективных направлений в этой области является применение технологии трехмерной печати методом послойного наплавления для изготовления подобных изделий. С помощью этого метода можно изготавливать коллиматоры любой сложности и формы, что позволяет применять их для формирования терапевтических полей электронов индивидуальной конфигурации. Это позволит повысить эффективность методов лечения, использующих пучки электронов [1-3]. Однако, для определения форм и толщин таких коллиматоров, необходимо проводить предварительное численное моделирование процесса облучения. Таким образом, необходимо разработать численную модель электронного пучка с характеристиками, наиболее приближенными к реальным.

В рамках данной работы была разработана численная модель формирующей системы линейного ускорителя электронов в среде GEANT4 для расчета геометрических параметров полимерных формирующих изделий, включающую в себя систему формирования выведенного электронного пучка клинического ускорителя, так и параметры материалов, пригодных для изготовления изделий методами трехмерной печати. Численное моделирование глубинных дозных распределений проводилось в пластиковых образцах с разным коэффициентом заполнения материалов для оптимизации изготовления пластиковых коллиматоров в дальнейшем.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Милойчикова И.А. Формирование дозных полей индивидуальной конфигурации клинических пучков электронов с помощью полимерных изделий, изготовленных посредством технологий трехмерной печати: дис. канд. физ.- мат. наук: 01.04.20. - Томск, 2018. – 12 с.
2. Климанов В.А. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1. Радиобиологические основы лучевой терапии. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии пучками тормозного и гамма-излучения и электронами. Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011.
3. Лысыч М.Н., Белинченко Р.А., Шкильный А.А. Материалы для 3d печати // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. - 2014. - №4. - С. 200-205.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ PVD И CVD МЕТОДАМИ ОСАЖДЕНИЯ

Д.В. Корженко<sup>1</sup>, Ю.Н. Юрьев<sup>1</sup>, Емлин Д.Р.<sup>2</sup>, Плотников С.А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dman@tpu.ru](mailto:dman@tpu.ru)

<sup>2</sup>Институт электрофизики Уральского отделения РАН,  
Россия, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 106, 620016

<sup>3</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН,  
Россия, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18, 620137

Развитие промышленности требует непрерывного улучшения характеристик различных деталей и механизмов, в частности повышения срока службы при экстремальных нагрузках, работе в агрессивных средах, без использования смазки. Особенно высокие требования предъявляются к деталям, которые испытывают различное контактное воздействие: трение, качение и другие. Одним из способов улучшения свойств таких изделий является создание на их поверхности модифицированного слоя из защитного материала с высокой твердостью, низким коэффициентом трения, хорошей термической стойкостью, устойчивостью к агрессивным средам. Данные покрытия должны обладать малым абразивным износом, величина которого связана с более высокой твердостью материала покрытий, и показывать высокую усталостную прочность, которой обычно соответствуют большие значения модуля Юнга. На сегодняшний день существуют два основных способа получения углеродных алмазоподобных плёнок: PVD (physical vapour deposition), включающий дуговое распыление [1], магнетронное распыление [2], и т.д., а также CVD (chemical vapour deposition), основанный на разложении углеводородсодержащих газов с помощью различных видов разряда [3]. При использовании первых двух методов получают так называемые безводородные покрытия: тетраэдрический углерод (ta-C) и аморфный углерод (a-C) соответственно. С помощью газофазного метода осаждают плёнки гидрогенизированного аморфного углерода (a-C:H) [4].

Данная работа посвящена сравнению свойств покрытий на основе углерода, полученных методами химического и физического осаждения.

Полученные сравнительные результаты, позволяют сделать вывод о том, что эксплуатационные свойства тонкоплёночных покрытий на основе углерода, такие как, например, стойкость к износу, можно варьировать, подбирая оптимальный способ их осаждения.

Так более мягкие покрытия a-C и a-C:H, полученные с помощью магнетронного осаждения и несамостоятельного тлеющего разряда соответственно, обладают меньшей шероховатостью и содержат большее количество графитоподобных sp<sup>2</sup> связей, которые выступают в качестве смазки при статическом трении. Это обеспечивает более высокую стойкость таких покрытий к подобного рода нагрузкам, по сравнению с покрытиями ta-C. Использование плёнок a-C и a-C:H также позволяет практически в два раза снизить износ исходной подложки при динамических нагрузках на примере воздействия песком в пескоструйной машине.

Плѐнка ta-C обладает максимальной твердостью, среди всех типов углеродных покрытий, и средней же шероховатостью поверхности. Это обусловило ее максимальную стойкость к динамическим нагрузкам в пескоструйной машине. Наблюдается снижение износа поверхности более чем в 4 раза.

Таким образом, подбор защитного покрытия на основе углерода должен определяться характером предполагаемой нагрузки. Более мягкие покрытия a-C и a-C:H более устойчивы при статических нагрузках, тогда как покрытия ta-C к «динамическим» (под действием абразива). При наличии обоих видов нагрузок более целесообразно, по всей видимости, использовать комбинацию из твёрдого и мягкого покрытия. Такого типа покрытия (т.е. многослойные) обладают рядом преимуществ, главные из которых высокая твердость и низкий модуль Юнга. Следовательно, можно ожидать высоких показателей износостойкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrilov N.V., Mamaev A.S., Plotnikov S.A., Trakhtenberg I.Sh., Rubshtein A.P., Ugov V.A.. Comparison Testing of Diamond-Like a-C:H Coatings Prepared in Plasma Cathode-Based Gas Discharge and ta-C Coatings Deposited by Vacuum Arc. // *Surface and Coatings Technology*. – 2010. – V. 204. – P. 4018-4024.
2. Korzhenko D. V. , Yurjeva A. V. , Stepanova O. M., Yurjev Y.N. Deposition of Diamond-like Carbon Films from the Magnetron Discharge Plasma // *7th International Forum on Strategic Technology (IFOST - 2012): Proceedings: in 2 vol., Tomsk, September 18-21, 2012*. – Tomsk: TPU Press, 2012 – V. 1 – P. 384-387.
3. Romyani Goswami, Tapati Jana, Swati Ray. Transparent polymer and diamond-like hydrogenated amorphous carbon thin films by PECVD technique. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2008. – V. 41. – 155413.
4. Lifshitz Y. Diamond-like carbon – present status. // *Diamond and Related Materials*. – 1999. – V. 8. – 1659.

## СОЗДАНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ АНТРОПОМОРФНОГО ФАНТОМА ГОЛОВЫ

С.В. Мельченко, А.А. Григорьева, А.А. Булавская

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [annigilus@mail.ru](mailto:annigilus@mail.ru)

При лечении злокачественных новообразований с помощью ионизирующего излучения в целях улучшения качества медицинского обслуживания проводится предварительное дозиметрическое планирование процедур лучевой терапии. В настоящее время планирование осуществляется на основе методов компьютерного моделирования, а также проводится верификация плана на дозиметрических тканеэквивалентных фантомах (водных и пластиковых). В частных, особо сложных случаях, не удается провести качественное дозиметрическое планирование и верификацию плана на фантомах подобного типа, так как они имеют формы правильных геометрических фигур или примитивов, приближенных к формам частей человеческого тела. Использование таких упрощенных фантомов не позволяет получить достаточно точный результат планирования из-за невозможности учета индивидуальных особенностей организма пациента или облучаемого новообразования. В работе [1] авторами предложена методика изготовления индивидуальных дозиметрических фантомов по данным компьютерной томографии (КТ) и других методов визуализации для предварительного планирования, позволяющих учесть большинство индивидуальных особенностей.

В данной работе показан процесс создания трехмерной модели на основе данных формата DICOM. По данным компьютерной томографии тканеэквивалентного фантома, в программном обеспечении свободного распространения Slicer 3D, изготавливается 3D-модель по выбранным зонам интереса, которые отличаются КТ-индексами (индексами Хаунсфилда), которые обозначают проницаемость ткани излучением. По задающемуся интервалу индексов выбирается так называемая «зона интереса», которая включает в себя диапазон индексов (костная, мягкая ткани и т.д.). В данном ПО возможно ручное редактирование зон интереса, если требуется выделение или исключение определенных фрагментов. Программа строит модель выделенной зоны интереса в 3D, после чего требуется дальнейшая доработка поверхностей модели в ПО свободного распространения Autodesk Meshmixer, где сразу возможно переформатировать модель для последующей 3D-печати.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10014).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красных А.А., Берчук Д.Ю., Журавлев Д.В., Милойчикова И.А., Черепенников Ю.М., Стучебров С.Г. Оценка возможности изготовления материалов, пригодных для устройств быстрого прототипирования, с заданными КТ-индексами // Ядерная физика и инжиниринг. – 2017. – Т.8. – № 1. – С. 91-95.

## ХРОМОВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СПЛАВА ZR-1%NB К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ ОКИСЛЕНИЮ

М. Р. Ромбаева, Д. В. Сиделёв

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, 634050

E-mail: [mrr2@tpu.ru](mailto:mrr2@tpu.ru)

Основным материалом оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) водо-водяных реакторов является циркониевый сплав с добавкой 1% ниобия (Zr-1%Nb). Для защиты ТВЭЛов от высокотемпературного окисления предлагается использовать хромовые покрытия [1, 2]. В настоящей работе методом магнетронного распыления «горячей» мишени и с помощью дуального магнетрона на подложках из Zr-1%Nb были сформированы хромовые покрытия, стойкие к высокотемпературному окислению. Цель исследования заключается в установлении роли конструкции магнетронного диода в формировании хромовых покрытий, стойких к высокотемпературному окислению.

Осаждение хромовых покрытий на подложки из Zr-1%Nb 20×20 мм<sup>2</sup> и толщиной 2 мм проводилось на установке плазменного осаждения, оборудованной дисковыми магнетронными диодами, ионным источником, системой подачи рабочих газов (Ar, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>). В установке был реализован планетарный механизм вращения подложек. Рабочее давление Ar в процессе осаждения составляло 0,2 Па. Перед напылением пленок поверхность подложек обрабатывалась в течение 15 минут ионным пучком источника с замкнутым дрейфом электронов (ООО «Прикладная электроника», Россия) при напряжении 2,5 кВ и токе 35 мА. Для удаления загрязнений и окислов с поверхности мишеней проводилось их предварительное распыление в течение двух минут. Было получено 4 образца, параметры их осаждения представлены в таб. 1.

Таб 1. Режимы осаждения плёнок Cr на Zr-1%Nb

№	Тип мишени	Q, Вт/см <sup>2</sup>	t, мин	h, мкм
Cr-1	Магнетрон с «горячей» мишенью	29,9	25	1,8
Cr-2		33,0		3,1
Cr-3		37,7		4,5
Cr-4	Дуальный магнетрон	31,4	128	3,1

Примечание: Q – плотность мощности разряда; t – время осаждения; h – толщина плёнки.

При нанесении хромовых покрытий на подложки из циркония дополнительно в камеру были установлены образцы-свидетели (подложки из кремния). С помощью сканирующей электронной микроскопии (Philips 515, Нидерланды) была исследована микроструктура полученных покрытий и уточнены данные по толщине покрытий.

Анализ полученных изображений показывает, что хромовые покрытия, полученные методом распыления «горячей» мишени, имеют столбчатую микроструктуру, которая становится менее выраженной при увеличении мощности разряда ввиду более быстрого роста температуры подложки. Такая тенденция характерна для микроструктуры зоны II, согласно модели структурных зон (SZM) [3]. Данная зона характеризуется усилением диффузии адатомов, что приводит к формированию столбчатой микроструктуры с существенно меньшим числом дефектов, большей однородностью и упорядоченностью. При использовании

дуального магнетрона с мощностью 4 кВт получены покрытия с плотной и однородной микроструктурой, поскольку низкие скорости осаждения и большая энергия в расчете на один атом обеспечивают интенсивную поверхностную диффузию конденсирующихся атомов на подложке.

Для испытания хромовых покрытий на высокотемпературное окисление образцы циркония с защитными покрытиями из хрома помещались в атмосферную термокамеру, нагретую до 500°C. После этого осуществлялся нагрев со скоростью ~0,4°/с до 1100°C и выдержка образцов в течение 20 мин. После испытаний камера открывалась и образцы охлаждались естественным образом.

Данные спектromетрии тлеющего разряда, полученные с помощью прибора GD-Profilер-2 («Horiba Ltd.», Япония) после выдержки образцов в высокотемпературной печи, показали, что кислород проник в цирконий на глубину ~30 мкм в образце Cr-1. В остальных образцах кислород содержится в незначительных количествах на глубине 1-3 мкм, при этом его основная доля находится в покрытии, а в подложке – на уровне фонового сигнала спектрометра. Из данных рентгеновской спектроскопии (Shimadzu XRD-7000S, Япония) следует, что после окисления состав образцов представлен в основном фазами хрома (11,6-31,9 об.%) и его оксида (52,7-84,8 об.%). Образец Cr-1 с наименьшей толщиной хромового покрытия оказался наиболее всего подвержен высокотемпературному окислению, только в его составе был обнаружен стехиометричный оксид циркония  $ZrO_2$  (11,1 об.%), в остальных образцах обнаружена только фаза циркония с растворённым кислородом  $Zr_3O$  (0,4-9,8 об.%). Для образца, полученного помощью дуальной MPC, общее содержание фазы  $ZrO_x$  в плёнке составляет 0,4 об.% и является наименьшим среди всех образцов.

Таким образом, образцы, полученные в плазме дуальной MPC, являются более стойкими к окислению, нежели образцы с покрытиями, имеющими столбчатую микроструктуру, полученные при распылении «горячей» мишени. При анализе рабочих параметров напылительных систем было обнаружено, что магнетрон с «горячей» мишенью имеет производительность в 3-7 раз больше в сравнении с магнетронами, где реализовано только распыление мишени. Энергия, поступающая на подложку, в расчёте на 1 осажденный атом (4,9-8,1 эВ/ат.) существенно меньше при распылении «горячей» мишени, чем при использовании дуальной MPC (31,4 эВ/ат.).

Исследования выполнены за счёт средств гранта РФ (проект 15-19-00026).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петельгузов И.А. Влияние защитных покрытий из алюминия и хрома на окисление циркония и его сплавов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2012. – Т. 78. – № 2. – С. 114-119.
2. Селезнева Л.В. и др. Взаимодействие водорода с циркониевым сплавом с вакуумными ионно-плазменными покрытиями // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2008. – № 2. – С. 108-111.
3. Мовчан, Б.А. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония / Б.А. Мовчан, А.В. Демчишин // Физика металлов и металловедение. – 1969. – Т. 28. – № 4. – С. 23-30.



## ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОДУГОВЫХ СИЛИКАТНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.В. Угодчикова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

Биокomпозитные материалы являются наиболее используемыми и перспективными материалами медицинского назначения, особенно в травматологии, ортопедии и дентальной хирургии. Благодаря высоким физико-механическим свойствам металлы и сплавы имеют огромное преимущество использования в качестве имплантата в сравнении с керамикой и полимерными материалами [1]. Магний и его сплавы демонстрируют отличную биосовместимость, соответствующие биомеханические свойства и способность к био-резорбции в организме человека [2]. Основным недостатком магния и его сплавов является низкая коррозионная стойкость. Модифицирование поверхности магниевых сплавов позволяет улучшить коррозионные свойства и уменьшить скорость разрушения имплантата [3]. Известно, что покрытия системы CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> показывают высокую биоактивность и способствует росту костной ткани без образования фиброзного (промежуточного) слоя [4-5]. Силикатные покрытия, с одной стороны, выполняют защитную функцию, уменьшая скорость коррозии магниевых сплавов, и, с другой стороны, способствует ускорению процессов остеоинтеграции [6].

Для эксперимента были подготовлены пластинки из магниевых сплавов Mg-0.8мас.%Ca (Mg-0.8Ca). Микро-дуговые покрытия были сформированы в электролите-суспензии, представленном следующими компонентами: CaSiO<sub>3</sub> (волластонит), NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>. Осаждение покрытий осуществлялось в анодном потенциостатическом режиме при варьировании напряжения процесса в диапазоне 350-500 В. Частота следования и длительность импульсов составила 50 Гц и 100 мкс, соответственно. Длительность нанесения покрытий методом микро-дугового оксидирования составила 5 минут.

С помощью растровой электронной микроскопии (SEM, LEO EVO 50) исследовали морфологию поверхности покрытий и элементный состав. Множество кристаллов удлиненной формы, схожей с частицами волластонита, распределены по всей поверхности покрытия (рис. 1а)

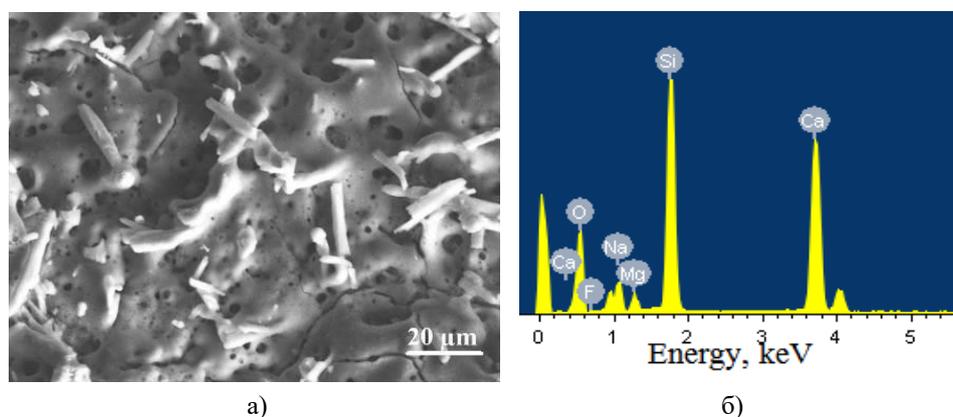


Рисунок 1 – РЭМ изображение морфологии поверхности (а) покрытия на Mg-0.8Ca сплаве при напряжении процесса 450 В и элементный состав (б) силикатных покрытий

Количественный элементный анализ осажденных покрытий при напряжении 450 В показал наличие элементов: О –  $63.5 \pm 0.5$ ; Mg –  $1.8 \pm 0.7$ ; Si –  $16.5 \pm 0.3$ ; Ca –  $14.3 \pm 0.8$ ; F –  $1.6 \pm 0.2$ ; Na –  $2.5 \pm 0.7$ . Повышенное содержание магния и кислорода наблюдается во внутреннем слое покрытий, возле магниевой подложки. Содержание кремния и кальция наблюдается преимущественно во внешнем слое биопокрытий из-за осаждения частиц волластонита из электролита на поверхность.

Толщина силикатных покрытий увеличивается от 40 до 150 мкм с ростом напряжения процесса МДО от 350-500 В. Шероховатость осажденных покрытий (Ra), полученных при напряжении процесса 350 В составила 2-3 мкм, в то время как, при напряжении 500 В шероховатость покрытий увеличивается до 10 мкм. Таким образом, были сформированы силикатные покрытия на Mg–0.8Ca сплаве методом микродугового оксидирования с напряжением процесса 350 – 500 В. На поверхности покрытий обнаружены кристаллы продолговатой формы, соответствующие частицам волластонита. Результаты элементного анализа подтвердили высокое содержание кремния и кальция в покрытии. Также с ростом напряжения процесса наблюдается заметное увеличение толщины и шероховатости покрытий от 40 до 150 мкм и от 2 до 10 мкм, соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tian P., Liu X. Surface modification of biodegradable magnesium and its alloys for biomedical applications // *Regener. Biomater.* – 2015. – №2. – С. 135–151.
2. Wan P., Tan L., Yang. Ke. Surface Modification on Biodegradable Magnesium Alloys as Orthopedic Implant Materials to Improve the Bio-adaptability: A Review // *J. Mater. Sci. Tech.* – 2016. – №32, С. 827-834.
3. Johnston S., Shi Z., Dargusch M. S., Atrens A. Influence of surface condition on the corrosion of ultra-high-purity Mg alloy wire // *Corr. Sci.* – 2016. - № 108. – С.66–75.
4. Zhai W., Lu H., Wu Ch., Chen L., Lin X., Naoki K., Chen G., Chang J. Stimulatory effects of the ionic products from Ca–Mg–Si bioceramics on both osteogenesis and angiogenesis in vitro // *Acta Biomater.* – 2013. – №9. С.8004–8014.
5. Razavi M., Fathi M., Savabi O., Hashemi Beni B., Vashae D., Tayebi L. Surface microstructure and in vitro analysis of nanostructured akermanite ( $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ) coating on biodegradable magnesium alloy for biomedical applications // *Colloids Surf.* – 2014. – №117 В. – С.432-440.
6. Sainz M. A., Pena P., Serena S., Caballero A. Influence of design on bioactivity of novel  $\text{CaSiO}_3$ – $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$  bioceramics: In vitro simulated body fluid test and thermodynamic simulation // *Acta Biomater.* – 2010. – №6. – 2797.

## ОПТИМИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

А.М. Шихада, В.М. Головков

Национальный Исследовательский Томский Политехнический Университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050.

E-mail: [shihada@tpu.ru](mailto:shihada@tpu.ru)

**Ключевые слова:** циклотрон, быстрые нейтроны, мощность дозы.

**Цели исследования:** Была исследована конструкция коллиматора для получения более желательных характеристик нейтронов, таких как мощность поглощенной дозы, энергия определенного диапазона (быстрые нейтроны). Терапия быстрыми нейтронами требует относительно высоких энергий нейтронов в диапазоне от 1 до 20 МэВ в зависимости от области и глубины обрабатываемых тканей, она требует как можно более медленных и рассеянных нейтронов. По этой причине, структура и материалы апертуры, коллиматорные компоненты должны быть тщательно спроектированы. Согласно процедурам, для быстрой нейтронной терапии нужны нейтроны в диапазоне быстрых нейтронов как можно выше, а другие части спектра нейтронов и гамма- или рентгеновские лучи - как можно ниже.

**Пациенты и методы:** Эксперименты проводились следующим образом: 1. Изучение влияния изменения размеров апертуры коллиматора с помощью свинцового внутреннего слоя. 2. Изучение эффекта добавления кусочка свинцового металла перед направлением нейтронного пучка. 3. Изучение влияния диаметра апертуры с дополнительным свинцовым слоем. 4. Изучение эффекта изменения геометрии полиэтиленовой детали с помощью дополнительного металлического слоя.

**Результаты:** Во всех изученных случаях были получены усиления быстрых нейтронов. В частности, увеличение на 300% для относительно большого диаметра отверстия с постепенным уменьшением толщины слоя свинцового металла. Также путем изменения цилиндрической полиэтиленовой части сборки в коническую форму, которая имеет более широкий диаметр отверстия. Это позволяет собирать больше рассеянных быстрых нейтронов и возвращать их в основной поток нейтронного пучка. Кроме того, узкий пучок обработки может быть достигнут путем изменения геометрии и угла раскрытия полиэтиленовой части, чтобы она представляла собой конический коллиматор с небольшим полем облучения на конце диаметром 1-2 см. Это эквивалентно цилиндрическому коллиматору с большим диаметром отверстия, обеспечивающему одинаковые потоки быстрых нейтронов и мощности поглощенной дозы в точке обработки или детекторе. Таким образом, более эффективные и точные процедуры лечения могут быть сделаны. К счастью, это также может сократить время, затрачиваемое на лечение в тяжелой некомфортной ситуации с пациентами, помимо возможности доставлять больше мощности дозы на небольшие участки тела пациента.

**Заключение:** Показано, что с помощью оптимизации геометрии и материалов источника быстрых нейтронов можно увеличить поток и мощность дозы нейтронов подводимой к опухоли в 3 раза. Показано, что нейтронный пучок можно ограничить апертурой поля облучения около 1 см<sup>2</sup>. При этом плотность потока нейтронов сопоставима с потоком нейтронов при широкой апертуре коллиматора.

## РАСЧЁТ И НАНЕСЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ С ЗАДАНЫМИ СВОЙСТВАМИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ОПТИКИ

О. А. Ярославцева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [oay2@tpu.ru](mailto:oay2@tpu.ru)

В ходе работы все плёнки наносились методом электронно-лучевого испарения. В первой серии экспериментов оксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) использовался в сочетании с оксидом гафния ( $\text{HfO}_2$ ) для формирования просветляющего покрытия [1] на  $\lambda=1064\pm 15$  нм с  $R<0,3\%$ . Во второй серии - стояла задача создания отражающего покрытия для  $\lambda=1064\pm 15$  нм с  $R>99,8\%$ . Для достижения заданных характеристик, предварительно были сделаны расчёты в программах «OpenFilters» и «CompleteEASE».

В первом случае расчёты велись для просветляющего  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  покрытия на  $\lambda=1064\pm 15$  нм с углом падения луча  $0^\circ$  при отсутствии поляризации. Толщина слоя оксида гафния составила 61,19 нм, оксида кремния – 226,71 нм, показатель преломления на длине волны 1064 нм – 1,9778 и 1,4485, соответственно. На полученных со спектрофотометра и эллипсометра результатах (рис. 1) видно, что экспериментальные данные близки к расчетным, подтверждая их корректность.

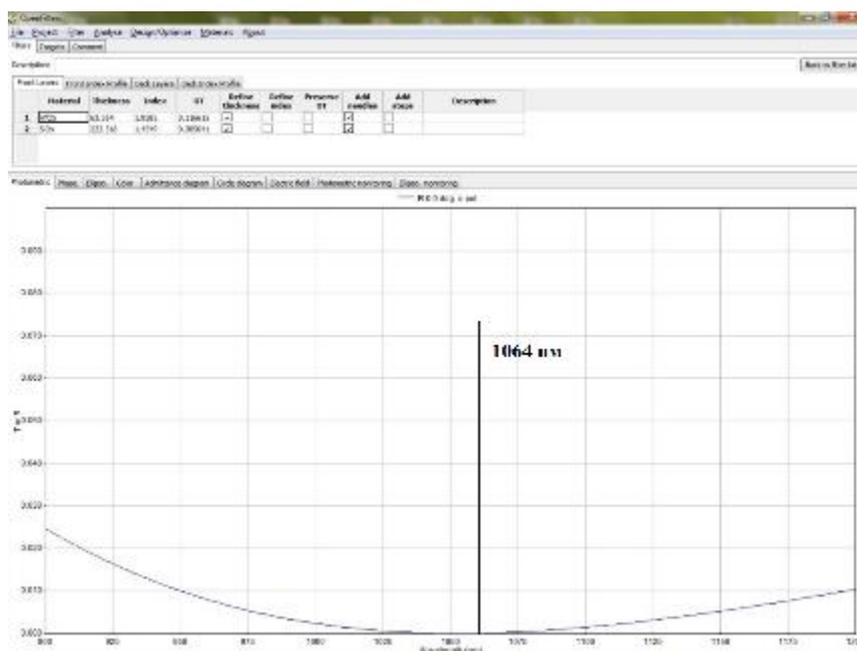


Рис. 1. Масштабированный спектр отражения  $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$  покрытия

Цель по приближению коэффициента отражения к нулю достигнута.

Во втором случае задача отражения  $>99,8\%$  решалась путём подбора числа пар четвертьволновых слоев  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  и оптимизации оптического покрытия (рис. 2). Требуемый техническим заданием коэффициент отражения на  $\lambda=1064\pm 15$  нм достигается нанесением 17 слоёв.

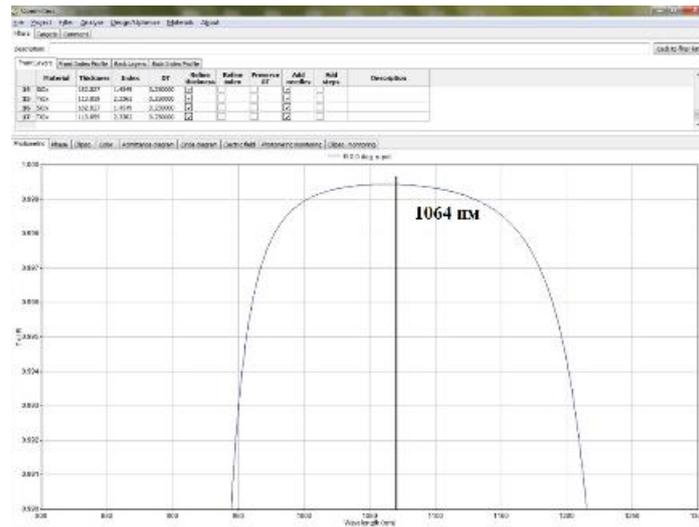


Рис. 2. Масштабированный спектр отражения TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> покрытия

Результат был проверен на приборах и соответствует действительности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Materion Corporation – A Global Leader in Advanced Materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://materion.com/resource-center/newsletters/newsletter-archives/coating-materials-news-2000-to-2010/silicon-dioxide-sio2-for-optical-coating>. – 10.09.19.

## СЕКЦИЯ 6

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ  
ЯДЕРНОГО НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ,  
БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЯ ЯДЕРНОЙ ОТРАСЛИ

**УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

К.Р. Абдуллина, Е.П. Седанова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kristina\\_abdullina2212@mail.ru](mailto:kristina_abdullina2212@mail.ru)

Высокий уровень безопасности, соблюдаемой на объектах, является одним из главных факторов развития атомной энергетики. Одним из путей обеспечения режима безопасности является предотвращение аварий, вызванных отказом оборудования и элементов конструкций ядерных установок. Отсюда требования к качеству материалов и продукции, производимой для атомной отрасли, выше, чем для других отраслей промышленности.

Одним из путей обеспечения безопасности на ядерном объекте является регулярное проведение экспертизы неразрушающего контроля (НК). На сегодняшний день неразрушающий контроль играет важную роль в атомной отрасли, так как он позволяет проводить техническую диагностику оборудования и конструкций без нарушения целостности объекта контроля и сохраняя его технические параметры. Современное оборудование НК позволяет проводить диагностику, как при входном контроле, так и непосредственно в процессе эксплуатации ядерных установок, и выявлять скрытые дефекты различных типов и размеров. Своевременное обнаружение дефектов в структуре узлов и компонентов ядерных установок позволяет снизить риск отказа оборудования, а данные полученные в рамках экспертиз НК могут послужить базой для принятия решений об их модернизации. Одним из вариантов такой модернизации является применение новых более совершенных по свойствам материалов.

Перспективность применения материалов на основе карбида кремния в атомной отрасли обусловлена физико-химическими свойствами данного соединения, среди которых можно выделить жаростойкость, конструкционную прочность при относительно небольшой плотности материала, устойчивость к коррозии [1]. На сегодняшний день существует международная программа, направленная на разработку материалов на основе карбида кремния, свойства которых будут отвечать требованиям атомной энергетики [2].

Целью данной работы являлось исследование методом ультразвукового контроля структуры материалов на основе карбида кремния, синтезированных методом искрового плазменного спекания (ИПС). Также в рамках исследования были определены плотность и модуль Юнга материалов, исследовано влияние параметров режима спекания на их значения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-19-00192).

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Композиционные материалы. Механика и технология / Ф Мэттьюз, Р. Ролингс. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
2. Обзор направлений работ ВНИИНМ по разработке устойчивого к авариям топлива (ATF) для легководяных реакторов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfiles.net/preview/7605583/> – 17.08.19.

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАДИАЦИОННОГО ФОНА, ОБУСЛОВЛЕННОГО  
ИЗОТОПОМ ЙОДА 131 И ДОЛГОЖИВУЩИМИ РАДИОНУКЛИДАМИ

В.С. Бугрина, Н.Ю. Истомина, М.Д. Носков, А.Д. Истомин

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ,

Россия, г. Северск, Томской обл., пр. Коммунистический, 65, 636036

E-mail: [ybugrina@mail.ru](mailto:ybugrina@mail.ru)

Землетрясение в Японии 11 марта 2011 г. привело к образованию цунами, которое стало причиной аварийной ситуации на АЭС «Фукусима-1». Сбой в нормальной работе систем безопасности повлиял на развитие аварии, что привело к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу, масштабы которых значимы и представляют десятки процентов от выбросов при аварии в Чернобыле. [1]

Оценка последствий аварийного выброса на этой станции остается актуальной проблемой и сейчас. Решение этой задачи включает в себя определение параметров источника выбросов, метеоусловий, свойств радионуклидов, а также определение распределений радионуклидов на поверхности, и расчета доз, обусловленных радионуклидами, находящимися в приземном слое атмосферы и на поверхности.

Радиационные последствия аварии на АЭС в первое время определялись изотопами йода и теллура ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  и  $^{132}\text{Te}$ ) и лишь затем основную часть мощности дозы гамма-излучения на местности стали давать  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Количество наиболее биологически значимого из них —  $^{137}\text{Cs}$ , который определяет среднесрочные и долгосрочные последствия подобных аварий, в первые часы трудно определить средствами традиционных сетей мониторинга, затруднительно это сделать и по результатам измерений радиоактивного загрязнения проб объектов внешней среды. Более удобным маркером является  $^{134}\text{Cs}$ , так как этот изотоп сравнительно легко можно идентифицировать в окружающей среде.

Основной задачей данной работы является оценка источника аварийных выбросов на основе моделирования переноса радиоактивных веществ, выброшенных в атмосферу при аварии на АЭС «Фукусима-1» и анализ данных по динамике радиационной обстановки в префектуре Фукусима.

Представленные в настоящей работе данные являются определенным обобщением данных, полученных из источников [1-3] и результатом их моделирования в программном комплексе «АРИА». Работа которого базируется на взаимодействующих друг с другом геоинформационной, моделирующей и экспертно-аналитической систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Труды ИБРАЭ РАН / под. общ. ред. чл-кор. РАН Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М. : Наука, 2007 – Вып. 13 : Авария на «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки / науч. ред. Р. В. Арутюнян. -2013.-246 с.: ил.-ISBN 978-5-02-038468-2 (в пер.).
2. Численность населения в населенных пунктах вблизи Фукусима [Электронный ресурс]/ naseleniye.population.city/yaponiya/fukushima/ Режим доступа: свободный.
3. Карта [Электронный ресурс]/ [http://world-maps.pro/satellite/карта\\_Японии](http://world-maps.pro/satellite/карта_Японии) / Режим доступа: свободный.



## ПРОБЛЕМА ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА КОРЕЙСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

И.В. Воробьев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [ivv23@tpu.ru](mailto:ivv23@tpu.ru)

Северокорейский ядерный кризис, продолжающийся уже на протяжении более двух десятков лет, является одной из самых актуальных проблем мирового сообщества и представляет серьезную угрозу международному режиму нераспространения и безопасности в Северо-Восточной Азии.

Государство, которое осуществляло ядерные исследования, выходящие за рамки ДНЯО, нарабатывала ядерные материалы оружейного качества и вышедшее из ДНЯО и МАГАТЭ, предоставило себя как минимум ненадежным. С началом обострения отношений КНДР и МАГАТЭ и в последующие несколько лет стало понятно, что данная ситуация является серьезной проблемой и требует незамедлительного решения. Впоследствии, испытание ядерного оружия и пуски баллистических ракет, которые нарушали международные соглашения и договора, только подтвердили этот факт. Из всех способов и попыток решения сложившейся ситуации, наиболее значимыми и оптимальными показали себя шестисторонние переговоры (РФ, США, КНР, Япония, КНДР, РК), которые помогли прийти ко многим договоренностям в урегулировании Корейского ядерного кризиса, однако полностью решить проблему не смогли. С 2009 года, после того как шестисторонние переговоры пришли в тупик, перспектив в урегулировании проблем региона нет [1]. Эти условия, в совокупности с напряженными отношениями между США и КНДР, а также дальнейшее развитие КНДР своей ядерной и ракетной программы, являются источником нестабильности и военно-политической напряженности в Северо-Восточной Азии.

Наиболее оптимальным решением проблемы ядерной безопасности на Корейском полуострове будет возвращение к прошлому шестистороннему формату переговоров. Есть несколько причин по которым именно шестисторонние переговоры могут привести к денуклеаризации Корейского полуострова. Во-первых, Вашингтон отверг план «двойного замораживания» предложенный Россией и Китаем для снижения напряженности на Корейском полуострове, увидев в нем лишь стремление подрвать систему американских военно-политических союзов в регионе. Во-вторых, введение новых или ужесточение уже существующих санкций против КНДР не окажет заметного воздействия на нее. Население Северной Кореи не имеет возможности оказывать давление на свое правительство, поэтому данная политика может привести к тому, что значительная часть населения КНДР окажется в бедственном положении, но на руководство страны это никак не повлияет [2]. В-третьих, если даже Китаю и России удастся уговорить Пхеньян временно отказаться от испытательной деятельности в обмен на частичное сокращение военной активности США, Южной Кореи и Японии, то они будут носить символический характер, потому что Вашингтон не пойдет на сокращение мероприятий оборонного плана в регионе. В-четвертых, Россия и Китай имеют хорошие отношения с КНДР и к тому же имеют большое влияние на мировой арене, поэтому в случае продвижения переговоров по урегулированию проблемы они могут оказать на Северную Корею политическое давление, чтобы сподвигнуть ее на решение конфликта [3].

В итоге, если ведущие игроки действительно хотят решить ядерную проблему корейского полуострова, то жизнеспособных альтернатив мирного регулирования проблемы ядерной безопасности на Корейском полуострове шестисторонним переговорам практически нет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клоков Н.С. Позиция и роль России на шестисторонних переговорах по «северокорейской ядерной проблеме» // Территория новых возможностей. – 2009. – № 2. – С. 84 – 92.
2. Лукин А. Л. Урегулирование ракетно-ядерного кризиса на Корейском полуострове: интересы России и перспективы многостороннего формата // Известия Восточного института. – 2018. – № 2. – С. 32 – 40.
3. Морозов Ю.В. Северокорейская ядерная проблема и возможные пути ее решения совместными усилиями России и Китая // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2018. – Т. 14. № 7. – С. 1360 – 1378.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ ГАММА-КВАНТОВ ГЕРМАНИЕВЫМ ДЕТЕКТОРОМ

Е.А. Маренкова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [eam33@tpu.ru](mailto:eam33@tpu.ru)

На сегодняшний день германиевые детекторы широко распространены в гамма-спектрометрии. Данный тип детектора обладает высокой разрешающей способностью и эффективностью регистрации гамма-квантов. Однако в ходе эксплуатации наружный слой германиевого кристалла изменяется: потертости, микроцарапины, увеличение мертвого слоя из-за окисления, дефекты кристаллической решетки, вызванные взаимодействием ионизирующего излучения с веществом детектора. Все эти факторы и процессы оказывают влияние на характеристики самого детектора: эффективность регистрации гамма-кванта и эффективность поглощения гамма-квантов веществом детектора.

В данной работе проведены 2 серии измерений стандартных образцов на коаксиальном детекторе из высокочистого германия. Используемые образцы:  $Am^{241}$ ,  $Cd^{109}$ ,  $Co^{57}$ ,  $Ba^{133}$ ,  $Cs^{137}$ ,  $Mn^{54}$ ,  $Zn^{65}$ ,  $Co^{60}$ . Для каждого источника гамма-излучения была рассчитана активность на дату измерения с учетом активности на дату аттестации образца и прошедшего времени.

На рисунке 1 отображены кривые эффективности регистрации детектора в точечной геометрии на 2016 и 2019 год при расстоянии источник – детектор 0 мм.

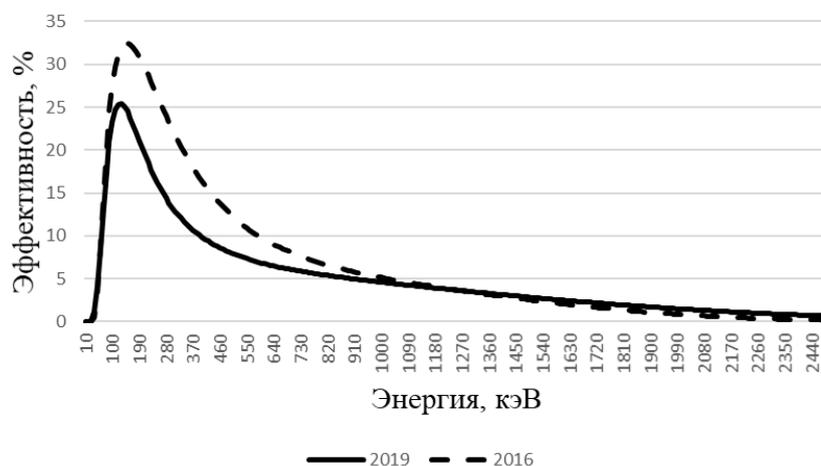


Рис. 1. Эффективность детектора при расстоянии источник – детектор 0 мм

В работе отмечено, что абсолютная эффективность регистрации гамма-квантов изменилась. Для всей области энергий отмечается снижение эффективности детектора по абсолютному значению. Наибольшее уменьшение эффективности регистрации характерно для низкоэнергетической области из-за уменьшения чувствительности объема детектора, которое обусловлено увеличением мертвого слоя детектора.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев А.В. Методы измерения ядерных материалов в: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2007–276 с.

## АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ОРГАНИЗАЦИИ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АЭС

Е.А. Селихова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [eas76@tpu.ru](mailto:eas76@tpu.ru)

Мировая практика свидетельствует, что многие страны значительную долю своих потребностей в области электроэнергетики стремятся реализовать за счет ее производства на атомных электростанциях (АЭС). Россия также входит в число этих стран, доля атомной энергетики в общей выработке электроэнергии России в 2018 году составила 18,7 % [1].

Главной задачей в соответствии с действующим законодательством Российской Федерации производственная деятельность ядерных объектов (ЯО) (выработка электроэнергии) на территории страны является обеспечение надежной системы физической защиты (СФЗ) ядерных материалов и установок, в том числе энергетических, на всех этапах их жизненного цикла [2]. Защита объектов данной категории – комплексная задача, которая решается с учетом современных угроз и научно-технических достижений в области безопасности. Ее актуальность обусловлена необходимостью пресечения на ранних стадиях возможных диверсионно-террористических акций и любого вида вмешательства в технологический процесс посторонних лиц и неквалифицированного персонала.

Обеспечение безопасности эксплуатации российских АЭС - сложная, многоплановая проблема, для которой одним из важнейших аспектов является создание системы физической защиты, направленной на предотвращение несанкционированных действий. СФЗ дает достаточные гарантии выполнения норм безопасности на АЭС, тем не менее, необходимо ее совершенствование, которое должно строиться на системном подходе к созданию физической защиты на вновь строящихся объектах атомной энергетики и ее совершенствовании на действующих АЭС [3]. Концепция должна определять идеологию построения системы физической защиты АЭС, которая должна периодически корректироваться с учетом изменений в социально-экономической и политической сферах, разработки новых управленческих и организационных мероприятий, технических и инженерных средств, архитектурных и строительных решений, а также совершенствования тактики действий и вооружения подразделений охраны АЭС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. [Годовой отчет АО "Атомэнергопром" за 2018 год](http://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://atomenergoprom.ru/ru/invest/annual/>. – 15.08.2019.
2. Севрюков Д.В., Асфандияров А.Х. Системы физической защиты объектов ядерной энергетики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2008/10/16/461>. – 15.08.19.
3. Хасянов Р.С. Ключевой фактор обеспечения эффективности систем комплексной безопасности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.psj.ru/saver\\_people/detail.php?ID=94625](http://www.psj.ru/saver_people/detail.php?ID=94625). – 19.08.19.

**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ  
БЕЗОПАСНОСТИ**

Ю.В. Фатеева, Б.П. Степанов

Национальный исследовательский Томский политехнический институт

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [fateeva-dog@yandex.ru](mailto:fateeva-dog@yandex.ru)

Двадцать первый век — это век цифровых технологий и внедрение компьютерных технологий в промышленные и научные отрасли. В частности, компьютерные технологии активно внедряются в системы безопасности атомных станций и других объектов ядерно-топливного цикла.

Одним из важных вопросов обращения с ядерным материалом является вопрос его защиты от несанкционированных действий. Для этого требуется создание системы безопасности и квалифицированный персонал.

Современным и эффективным способом обучения студентов является виртуальная среда, которая представляет собой виртуальный комплекс с инженерными и техническими средствами, а также моделями нарушителей и различными сценариями хода событий. Данный комплекс предназначен для освоения теоретической информации об основных элементах системы безопасности, а также для отработки данной информации на практике.

Компьютерная модель позволит совместно реализовывать нормативные требования и варианты реализации оснащения в рамках применения современных технологий.

Одним из первых этапов создания виртуальной среды является написание сценария действий пользователя в данной среде. К сценарию относится последовательность действий пользователя, а также эскизные решения по описанию элементов и устройств системы безопасности. Эскизные решения должны отображать основные элементы физической защиты: персонал, инженерные и технические средства технической защиты и организационные мероприятия.

Данная работа посвящена созданию в Томском политехническом университете компьютерной учебной среды, в которой реализуются процессы создания системы безопасности, а также отображены основные ее элементы. В работе отражены задачи по анализу алгоритмов моделирования функционирования элементов и устройств систем безопасности, а также выборки и обоснования эскизных решений по описанию элементов и устройств системы безопасности оснащения.

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ВНУТРЕННЕГО НАРУШИТЕЛЯ

К.А. Хужажинова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kah7@tpu.ru](mailto:kah7@tpu.ru)

До последнего времени большое внимание уделялось обеспечению физической защиты для предотвращения действий от внешних нарушителей. Сейчас же руководства предприятий, на которых ведется обращение с ядерными материалами, всерьез озадачены вопросом выявления потенциальных внутренних нарушителей. Готовность обнаружить людей, склонных к совершению противозаконных действий по отношению к работе предприятия или ядерному материалу под влиянием внешних обстоятельств и внутренних переживаний, и убеждений, в процессе работы или на первичном собеседовании при приеме на работу позволит не брать на работу таких сотрудников, а также выявить группу риска, за которой нужен особый контроль и присмотр.

Целью данной работы является разработка программы противодействию угрозам от внутренних нарушителей, выявление группы риска, создание специализированной помощи этой группе и систематизированного подхода к анализу уязвимости.

Благодаря методике ведения интервью с потенциальным внутренним нарушителем можно выявить такой тип нарушителя на стадии приема на работу, а также уже при осуществлении деятельности на предприятии. Согласно результатам проведения данного опроса, формируется критическая группа, с которой будет работать квалифицированный специалист: клинический психолог. Собирая информацию о будущем или действующем сотруднике можно не только с помощью интервью, но и при использовании открытых баз данных, благодаря которым, можно предположить нестабильное эмоциональное состояние человека на данный или ближайший период.

Систематизированная оценка уязвимости при решении задач СФЗ в зависимости от модели нарушителя позволит проверить: эффективность предупредительных и защитных мер. Для того, чтобы была возможность все целостно оценить ситуацию на объекте, в таблице были рассмотрены не только меры по противодействию внутренних, но и внешних нарушителей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Предупредительные и защитные меры в отношении угроз, исходящих от внутреннего нарушителя МАГАТЭ: практическое руководство STI/PUB/1359. [Электронный ресурс]. – Вена: МАГАТЭ, 2009. – Режим доступа:
2. [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1359r\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1359r_web.pdf), свободный – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения 11.05.2019 г.
3. НП-083-15. Требования к системам физической защиты ядерных материалов, ядерных установок и пунктов хранения ядерных материалов. [Электронный ресурс]. – Введен 23.11.2015 г. – Режим доступа: <https://www.seogan.ru/np-083-15-trebovaniya-k-sistemam-fizicheskoiy-zashitiyader-nix-materialov-yadernix-ustanovok-i-punktov-xraneniya-yadernix-materialov.html>, свободный – Заглавие с экрана. – Язык русский. Дата обращения 13.05.2019 г.

**NATIONAL NUCLEAR AND RADIOACTIVE MATERIAL SECURITY REGIME  
IN GHANA**

Paul Amoah, Michael Ansah

National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk,

Lenin str., 30, 634050

E-mail: [rock4evah@yahoo.com](mailto:rock4evah@yahoo.com), [michaelansah67@gmail.com](mailto:michaelansah67@gmail.com)

An evaluation of the National Nuclear and Radioactive Material Security Regime in Ghana has been done. Ghana has the Nuclear Regulatory Authority (NRA) as the statutory mandatory regulator for the sustenance of an effective nuclear and radioactive material security regime. The NRA and other radiological related service providers such as the Ghana Atomic Energy Commission (GAEC) adopts international standards to support the drafting and implementation of the regulations which is rooted in the national legislative documents. The evaluation was conducted by considering factors such as the adaptation and implementation of regulations that guide emergency measures, national management plans, the detection and response to illegal trafficking, control and accounting, physical protection systems and information security. The major mode of national leverage on security considerations is by conclusions based on the design basis threat (DBT). The DBT is fed with updates from threat assessment, vulnerability assessment and consequence analysis, whose product indicates the degree of risk that the various facilities that undertake peaceful nuclear technological applications pose to the nation.

The National Security Council (NSC) coordinates the affairs of the Nuclear Security Committee which has representatives from all stakeholders who spearhead responsibilities in ensuring the safety and security of the public, the environment and various occupationally exposed persons as well within the nuclear facilities and activities. The Nuclear Security Committee which is also ably represented, has been able to ensure that there is an independent regulatory structure that supervises the activities and facilities of the various nuclear and radiological applications. Such regulatory structure in cooperation with other relevant stakeholders have been able to establish various technical projects such as: (a) Development of infrastructure for radiation protection, medical and public exposure control, environmental radiation protection, secondary standards dosimetry, transport and waste safety and security; (b) Application of nuclear science and technology in human health, agriculture, non-destructive testing, radiation processing, nuclear agriculture, water resources management, oil and gas industry and research and teaching. In all these applications, adequate, systematic and sustainable education and training especially of those who are occupationally exposed is key to maintaining a sustainable radiation protection programme, safety culture and security culture commensurate with the hazards posed by the varied and complex nuclear technologies introduced and evolving over the years for socio-economic development of Ghana. Such policy has yielded the development and update of policy documents such as: (i) National Policy and Strategy for Education and Training in Radiation, Transport and Waste Safety and Security. (ii) National Nuclear and Radiological Emergency Response Plan, drafted by the National Disaster Management Organisation (NADMO) and the Ghana Atomic Energy Commission (GAEC). The National management plan that has been instituted is to ensure that there is effective international cooperation in information security through channels such as the Regulatory Authority Information System (RAIS).

THE CALCULATION OF THE STATIC STRENGTH OF THE FRAME CONNECTION OF THE COOLING TUBING IN THE MAIN CIRCULATING PIPELINE OF REACTOR VVER-1000

A.E. Ovsenev, K.S. Kostyuchenko, A.E. Ovsenev

National research Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk 30, Lenina Avenue, Tomsk, 634050

E-mail: [ovsenev1993@mail.ru](mailto:ovsenev1993@mail.ru)

More than half of the reactor plants operating in the Russian Federation are VVER-1000 reactor plants. The design life of this unit is 30 years. Most of them have already worked this time. To extend the service life it is necessary to carry out calculations on the justification of the extension of service life.

The purpose of this work is to calculate the static strength of the insert of the cooling pipeline branch pipe into the main circulation pipeline for justification in further operation.

The calculation of stresses at the location of tie-in pipe pipeline were carried out using the software ANSYS [1]. In the process of calculation, a finite-elementary model was developed. The design of the considered unit takes into account the peculiarities of geometric parameters.

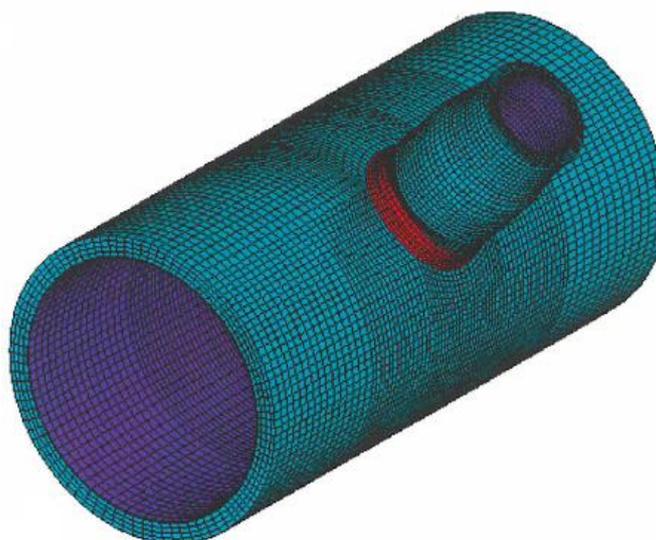


Fig. 1. Petruk duct cooling in the main circulating pipeline

During the calculation, the performance of the strength conditions in relation to the considered nodes is checked. The voltages must not exceed the respective permissible values [2].

As a result of the calculation of the tie-in of the cooling pipe, it was determined that the voltages do not exceed the permissible values. Further operation of the cooling pipe is considered possible.

#### REFERENCES

1. Software package for PC. Software package for solving thermomechanical problems by finite element method, ANSYS Mechanical, V. 14.5, ANSYS, Inc., 2013.
2. Reactor upper block. Initial data on materials properties of reactor upper block and reactor head for strength calculations. Podolsk 2015.



## СЕКЦИЯ 7

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КАМЕРЫ ВИХРЕВОГО РАЗМОЛА

К.Р. Абдуллин, Р.Г. Ахмедов, Е.В. Ефремов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kra2@tpu.ru](mailto:kra2@tpu.ru)

В рамках проекта «Прорыв» сотрудниками ОЯТЦ ТПУ разрабатывается «Код оптимизации и диагностики технологических процессов» КОД ТП, предназначенный для имитации работы технологических схем замкнутого ядерного топливного цикла с целью исследования работоспособности, управляемости и оптимизации как отдельных процессов и установок, так и технологических схем в целом. Одним из технологических процессов цикла является изготовление топливных таблеток. Данный процесс включает в себя операцию вихревого размола сыпучих компонентов.

Аппарат вихревого слоя представляет собой рабочую камеру, расположенную в индукторе вращающегося магнитного поля, содержащую цилиндрические ферромагнитные элементы, размер и количество которых зависит от рабочей зоны аппарата [1]. Эффект измельчения определяется характером движения ферромагнитных элементов в рабочей камере аппарата.

Для моделирования процесса измельчения частиц в аппарате вихревого слоя был выбран метод, основанный на теории цепей Маркова. Данный метод позволяет учитывать функцию разрушения, параметры процесса, физическое движение частиц внутри аппарата и гранулометрический состав материала [2].

Для реализации математической модели измельчения в аппарате вихревого размола была написана программа в среде Matlab, в которой рассчитываются селективная функция, функция разрушения и матрица измельчения.

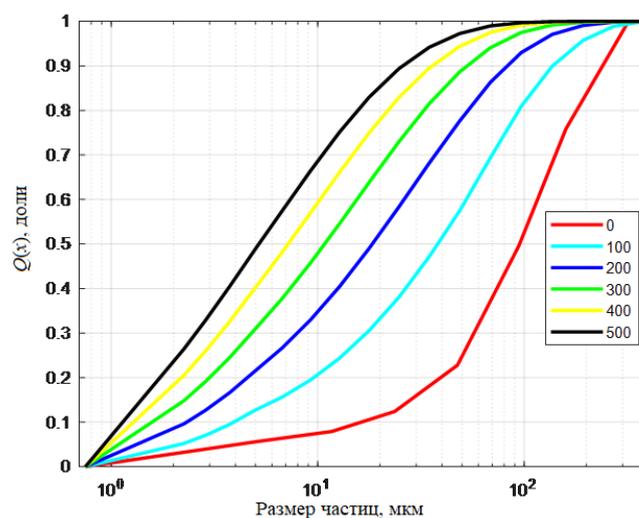


Рис. 1. Гранулометрический состав порошка до и после измельчения

Так как в матрице измельчения возможен переход только во фракции меньшего размера, то при моделировании процесса измельчения все частицы переходят во фракции с меньшим размером либо остаются в своей фракции. На рисунке 1 представлены исходный гранулометрический состав и гранулометрические составы порошка после различного времени нахождения в камере. При увеличении времени нахождения

в камере количество частиц с меньшим размером увеличивается, что говорит о качественной адекватности модели.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Логвиненко Д.Д., Шеляков О.П. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. – Техника, 1976. – 144 с.
2. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technology. – 2005. – Vol. 157. – pp. 128–137.

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ БЛОКОМ  
ДОБЫЧИ УРАНА МЕТОДОМ СПВ**

Н.Р. Адонин, А.В. Юров

Северский технологический институт

Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,

Россия, г. Северск, пр. Коммунистический, 65, 636036

E-mail: [d273anr@edu.ssti.ru](mailto:d273anr@edu.ssti.ru)

Автоматизация добывающих стадий ядерного топливного цикла является одним из перспективных направлений инновационного развития атомной отрасли [1]. При этом необходимым условием становится интеграция автоматизированных систем в общую информационную среду производства, растут требования к их интеллектуальным возможностям. Так, в результате совокупного анализа данных, поступающих от технологического объекта в реальном времени, и информации, получаемой от смежных систем верхнего уровня, оператор желает видеть готовые сценарные решения по повышению эффективности и качества производства.

Настоящим предлагается к рассмотрению система управления и сбора данных, разработанная в части проекта по автоматизации эксплуатационного блока уранодобывающего предприятия. Занимая нишу диспетчерского управления, система осуществляет прямую связь с КТС среднего уровня, а также, через хранилище данных, взаимодействует с вышестоящими системами. Архитектурно система (рис. 1) выполнена по клиент-серверной технологии и имеет четыре узла с разграничением прав доступа. В качестве программного комплекса исполнения выступает Trace Mode 6.

Все ключевые свойства SCADA-систем нашли свое отражение в разработке. С возможностью дистанционного управления и настройки — в настоящем времени интерпретируются и визуализируются основные параметры технологического процесса и состояния технических средств, развитый механизм сопровождения тревог сообщает о любых нештатных ситуациях и помогает оператору устранить проблему, архивирование данных позволяет отследить историческое развитие наблюдаемых процессов. [2]

Специфическим образом налажено взаимодействие с внешней базой данных, которая выступает связующим звеном между различными верхнеуровневыми приложениями. Для них SCADA-система служит информационным каналом, обеспечивающим за счет перенаправления архивируемых данных в СУБД доступ к важным параметрам технологического процесса. В свою очередь, для SCADA-системы архивные данные агрегируются в новые величины, существенные для тактики управления. Аналогичным образом эти величины доводятся до оператора, чтобы на их основе он принимал окончательные решения.

Такой подход позволяет перенести вычислительные мощности по обработке накопленных данных на специализированные приложения или даже непосредственно на СУБД. Так, например, средствами СУБД в SCADA-системе реализован широкий инструментарий по работе пользователя с архивом: благодаря этому SCADA-программа, имея очевидный приоритет в отношении доступа к текущим данным, может более сосредоточиться на анализе ограниченного объема быстро меняющихся параметров.

Каждая подобная функция, замкнутая на человека, должна обладать развитым и дружелюбным интерфейсом. Концепцию «умного интерфейса» удалось воплотить за счет программирования на расширениях языков стандарта МЭК, а также обширной динамизации графических элементов, реализованных в Trace Mode.

Работу описанного принципа взаимодействия через базу данных замечательно иллюстрирует заложенный в систему механизм оптимального диспетчерского управления. Так, архивные данные, переданные SCADA-системой за сутки, силами СУБД агрегируются в суточные показатели работы добычного блока и автоматически представляются на суд оператору. Не выходя за рамки SCADA-программы, оператор (например, лично обратившись к анализу архива) вправе скорректировать эти показатели, дабы исключить последствия возможных сбоев в измерительном оборудовании. Используя заверенные данные, внешняя система оптимизации через некоторое время предоставит оптимальные значения расходов, которые оператор сможет реализовать через дистанционное задание.

В итоге удастся обеспечивать логичное управление в отношении 30 технологических скважин добычного блока и сопряженного оборудования согласно постоянно действующей на предприятии математической модели месторождения. Концепция SCADA-системы как связующего окна вкупе с разработанной технологией построения графического интерфейса позволяет автоматизировать движение информационных потоков и удержать всю работу по тактическому управлению и мониторингу в пределах одного приложения — SCADA-программы.

Созданная система управления и сбора данных, успешно пройдя опытную, принята в промышленную эксплуатацию, и ныне находится в стадии сопровождения. Функционал системы постоянно растет, находя положительные отзывы как со стороны непосредственных пользователей, так и вышестоящего руководства. Опыт автоматизации настоящего эксплуатационного блока планируется перенести на другие добычные блоки и урановые месторождения [3].

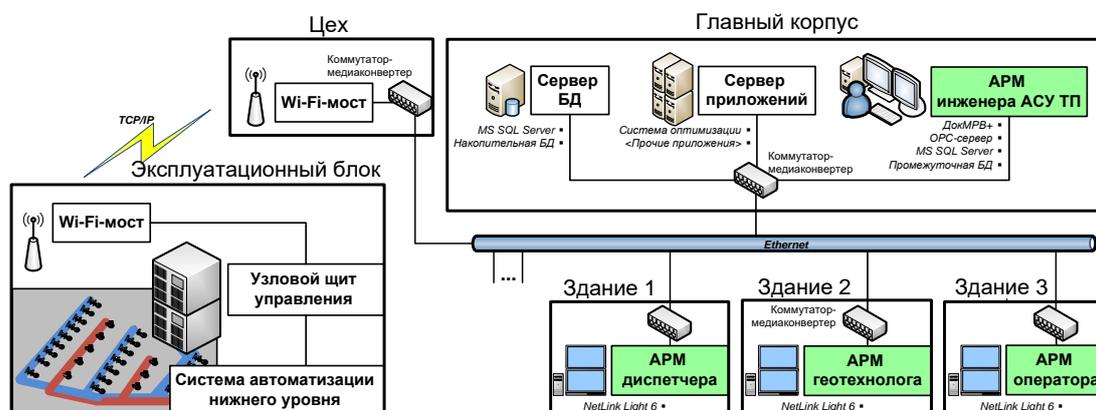


Рис. 1. Архитектура автоматизированной системы

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геотехнология урана (российский опыт): монография / Под ред. И.Н. Солодова, Е.Н. Камнева. – М.: «КДУ», «Университетская книга», 2017. – 576 с.
2. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 606 с.
3. Росатом / Архив новостей / «Умный полигон» заработает на всех месторождениях Хиагдинского рудного поля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rosatom.ru/>. – 23.06.19.

## **ВЫБОР НОМИНАЛОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВЫДАЧИ СИЛОВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ ПОТЕРЕ ПИТАНИЯ**

М.А. Архипов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [maa20@tpu.ru](mailto:maa20@tpu.ru)

В ряде современных электронных и электромеханических устройств отказ по основному питанию может создать нештатную ситуацию. Поэтому в них, как правило, применяются источники резервного питания. Резервными источниками питания электронных и электромеханических устройств чаще всего являются конденсаторы и аккумуляторы [1]. Аккумуляторы уступают конденсаторам по КПД, поскольку при преобразовании энергии, часть ее теряется, а также по времени зарядки, поскольку скорость зарядки конденсатора ограничена только максимальным током [2]. Поэтому при необходимости возможно использование конденсатора в качестве резервного источника питания.

Целью данной работы является выбор номиналов устройства, выдающего при потере основного питания на нагрузку с известными свойствами импульс заданного напряжения и продолжительности, обеспечивая выполнение функции управляемого узла.

В работе рассматривается схема автоматической выдачи силового импульса при потере питания, выдающая ток и напряжение заданных номиналов в течение заданной длительности при известных параметрах нагрузки. Накопителем энергии в схеме является суперконденсатор. Для цели выдачи кратковременного импульса он имеет меньшую массу по сравнению с аккумулятором.

Личным вкладом автора является разработанная модель схемы, созданная в программе «EWB v5.12», выбор номиналов элементов схемы, а также полученные результаты моделирования функционирования схемы, доказывающие правильность выбора номиналов. Модель, алгоритм выбора номиналов и результат моделирования также представлены в докладе.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о способности электрической схемы при потере питания обеспечить автоматическую выдачу требуемого силового импульса.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ефимов И.П. Источники питания. – У.: УлГТУ, 2001. – 135 с.
2. Латипов С.Т. Накопители электроэнергии как средство предотвращения нарушений электро-снабжения // Молодой ученый. – 2017. – № 16. – С. 187–189.

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ БЛОКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Р.Г. Ахмедов, К.Р. Абдуллин, Е.В. Ефремов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [rga4@tpu.ru](mailto:rga4@tpu.ru)

В рамках проекта «Прорыв», осуществляемого ГК «Росатом» в рамках федеральной целевой программы, сотрудниками ОЯТЦ ТПУ разрабатывается программный комплекс КОД ТП, предназначенный для имитации работы технологических схем замкнутого ядерно-топливного цикла (ЗЯТЦ). Одним из технологических процессов ЗЯТЦ является процесс изготовления топливных таблеток, включающий несколько операций измельчения. Именно поэтому и возникла необходимость создания в КОД ТП блока измельчения. Аппараты измельчения предназначены для непрерывного механического разрушения различных материалов до требуемых размеров с использованием различных способов дробления и помола [1]. Для создания математического описания процесса измельчения был выбран метод, использующий теорию цепей Маркова [2, 3].

Для реализации математической модели измельчения была написана программа в среде Matlab.

На рисунке 1 представлены исходный гранулометрический состав и составы порошка после различного времени нахождения в аппарате измельчения.

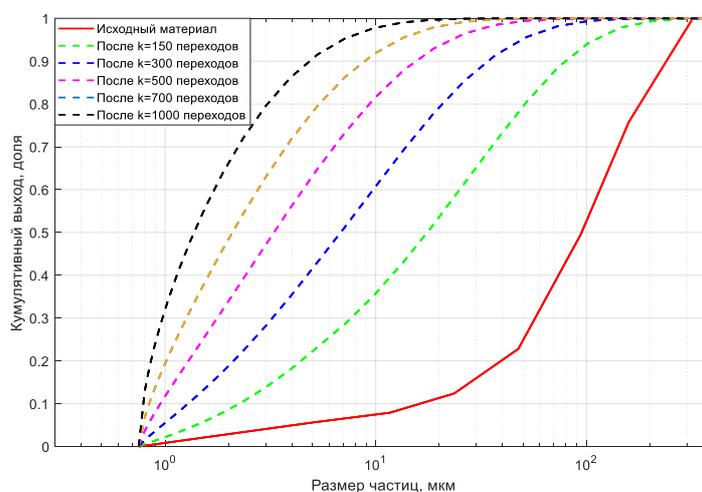


Рис. 1. Кумулятивные функции распределения частиц по размерам

Из данного рисунка можно сделать вывод, что полученная модель адекватна на качественном уровне, т. к. при увеличении числа  $k$ , т. е. увеличении элементарных актов разрушения, увеличивается доля частиц, имеющих меньший размер. Доля более крупных частиц уменьшается.

Более наглядно данный процесс представлен на графиках дифференциального распределения частиц по размерам (рисунок 2).

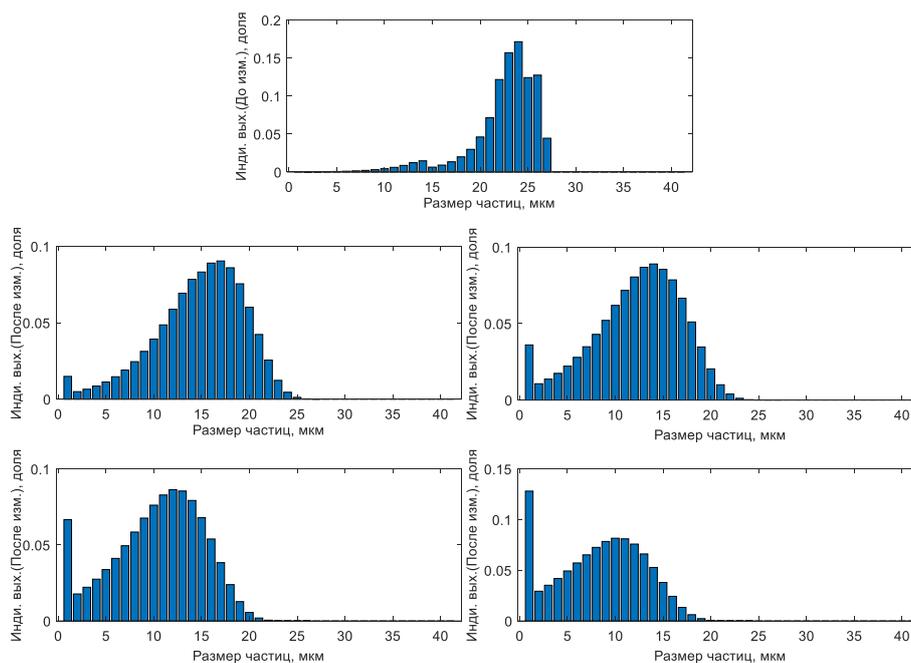


Рис. 2. Дифференциальное распределение частиц по размерам

Как видно из диаграмм, распределение частиц по размерам смещается в сторону фракций с меньшим размером, по сравнению с исходным распределением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кафаров В.В., Дерехов И.Н., Арутюнов С.Д. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешивания сыпучих материалов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
3. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology // Powder Technology. – 2005. – Vol. 157. – pp. 128–137.





- для минимизации занимаемой площади тестовые транзисторы обычно имеют небольшое отношение ширины затвора к длине, в то время как, во входной дифференциальной паре ОУ для уменьшения шумов за счет увеличения крутизны существенно увеличивают ширину затвора. Таким образом, зависимость  $\Delta V_{GS}=f(I_D)$  для тестовых транзисторов не вполне адекватно характеризует разброс параметров входной дифференциальной пары JFET;
- измерение передаточной ВАХ  $I_D=f(V_{GS})$  каждого тестового транзистора выполняется в широком диапазоне напряжений  $V_{GS}$  с некоторым приращением, величина которого ограничивает точность определения разброса  $\Delta V_{GS}$ .

Для устранения указанных недостатков предлагается модифицированная методика определения разброса пары интегральных JFET на основе измерений сдвоенного истокового повторителя, показанного на рисунке 1а. Она включает: измерение зависимости тока стока  $I_{S1}$ ,  $I_{S2}$  транзисторов  $VT1$ ,  $VT2$  от напряжения питания; расчет по полученным данным сопротивлений резисторов  $R1$ ,  $R2$ ; измерение зависимости напряжения на выходах  $Out1JF$  и  $Out2JF$  как функции тока потребления  $I^+$  от источника питания; оценки  $\Delta V_{GS}$  транзисторов  $VT3$ ,  $VT4$  по соотношению:

$$\Delta V_{GS34} = V_{OUT1} - I_{S1} \cdot R_1 - (V_{OUT2} - I_{S2} \cdot R_2).$$

Разработанные рекомендации были апробированы при схемотехническом моделировании с учетом разбросов сопротивлений резисторов величиной до 5 % и напряжений отсечки – до 10 %. Применяемые модели  $p$ -JFET учитывали взаимосвязь напряжения отсечки  $V_{TH}$  и максимального тока стока. Типичный результат моделирования показан на рисунке 1б.

Анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что предложенная методика позволяет определить  $\Delta V_{GS}$  даже при 1 % разбросе  $V_{TH}$ .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворников О.В. Проблемы проектирования аналоговых устройств с входными полевыми транзисторами // Компоненты и технологии. – 2005. – № 7. – С. 216–222.
2. Fleischer D.A., Shekar S., Dai S., Field R.M., Lary J., Rosenstein J.K., Shepard K.L. CMOS-Integrated Low-Noise Junction Field-Effect Transistors for Bioelectronic Applications // IEEE Electron Device Letters. – 2018. – Vol. 39. – No 7. – pp. 931 – 934.
3. Dvornikov O.V., Dziallau V.L., Prokopenko N.N., Petrosiants K.O., Kozhukhov N.V., Tchekhovski V.A. The Accounting of the Simultaneous Exposure of the Low Temperatures and the Penetrating Radiation at the Circuit Simulation of the BiJFET Analog Interfaces of the Sensors // 2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). DOI: 10.1109/SIBCON.2017.7998507.
4. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. – М.: Бином, 2014. – 706 с.

## ТОКОВЫЙ ПОРОГОВЫЙ ЛОГИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ОБРАТНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО СДВИГА

Н.В. Бутырлагин, И.В. Пахомов, Н.И. Чернов, В.Я. Югай

Донской государственный технический университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000

E-mail: [ilyavpakhomov@gmail.com](mailto:ilyavpakhomov@gmail.com)

Токковые логические элементы циклического сдвига (ЛЭЦС) [1], базирующиеся на принципах линейной (не булевой) алгебры [2], предназначены для создания нового поколения многозначных элементов памяти, а также специализированных устройств автоматического управления и передачи цифровой информации и т.п.

На рисунке 1 представлена схема порогового КМОП ЛЭЦС [1], обеспечивающего циклический сдвиг токовой троичной входной логической переменной ( $x$ ).

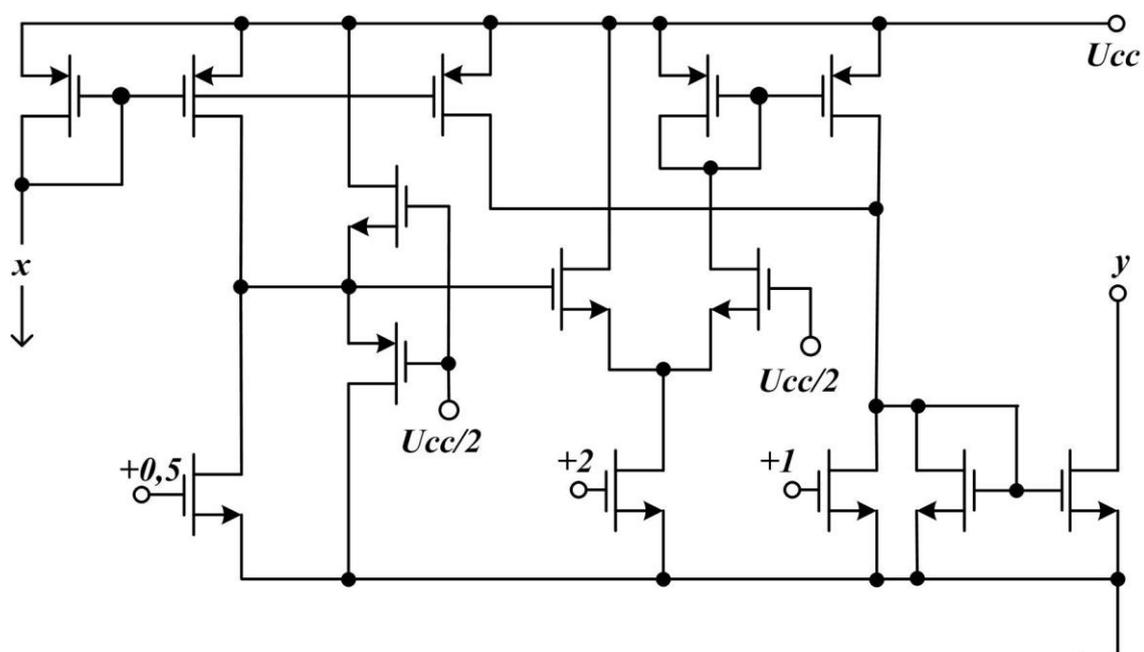


Рис. 1. КМОП токовый пороговый логический элемент обратного циклического сдвига

Операции преобразования токовых входных сигналов ( $x$ ) в схеме рис. 1 могут быть представлены следующим уравнением [1]:

$$y = x - 1 + 2 \cdot (x - 0,5).$$

Применение пороговых функций и соответствующих им пороговых логических элементов обеспечивает (кроме реализации заданной логической функции) масштабирование и нормализацию уровней выходных сигналов. Это устраняет погрешности преобразований, возникающие до порогового элемента. Рассмотренное схемотехническое решение ЛЭЦС для входной логической переменной ( $x$ ) характеризуется многозначным состоянием сигналов на его токовых входах и выходах и может быть положено в основу нетрадиционных вычислительных и управляющих устройств, использующих многозначную линейную алгебру.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00061.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 2693590 РФ. МПК8 H03K 19/0175. Токовый пороговый логический элемент обратного циклического сдвига / Н.В. Бутырлагин, Н.И. Чернов, Н.Н. Прокопенко, В.Я. Югай. Заявлено 20.12.2018; Оpubл. 03.07.2019, Бюл. № 19. – 15 с.
2. Чернов Н.И. Основы теории логического синтеза цифровых структур над полем вещественных чисел. – Таганрог: ТРТУ, 2001. – 147 с.

**СОЗДАНИЕ СТЕНДА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
НА ПЛАТФОРМЕ ПЛК «ОВЕН»**

Д.А. Вебер, К.А. Иванов

Северский технологический институт НИЯУ МИФИ,

Россия, Томской обл., г. Северск, пр. Коммунистический, 65, 636036

E-mail: [d275vda@edu.ssti.ru](mailto:d275vda@edu.ssti.ru), [KAIVanov@mephi.ru](mailto:KAIVanov@mephi.ru)

Целью данной работы является создание стенда программно-аппаратного моделирования на платформах ПЛК «ОВЕН» и MATLAB.

Программно-аппаратное моделирование (ПАМ, англ. hardware-in-the-loop simulation) актуальный метод в технических науках, для разработки и испытаний сложных встроенных систем реального времени. ПАМ предоставляет эффективную платформу, за счёт сложной системы взаимодействия программной и аппаратной части. Сложная система взаимодействия присутствует на этапе тестирования и разработки, так как добавлено математическое представление всех связанных динамических систем. Это математическое представление называют «программной моделью». Встроенная система взаимодействует с программной моделью и позволяет тестировать её.

Первым этапом создания лабораторного стенда программно-аппаратного моделирования был этап конфигурации аппаратной платформы, на которой развернётся программная модель. Для этого был смонтирован учебный шкаф, ключевыми узлами, которого являются: ПЛК ОВЕН, частотный преобразователь, асинхронный двигатель.

Управление двигателем осуществляется при помощи частотного преобразователя, который связан с ПЛК по промышленному интерфейсу RS-485 и протоколу Modbus RTU. В рамках проекта была адаптирована существующая библиотека управления частотным приводом. Так же был создан интерфейс оператора, позволяющий упростить работу оператора по настройке стенда.

Результатом работы первого этапа создания лабораторного стенда программно-аппаратного моделирования стала реализация аппаратной платформы для развёртывания программной модели. В дальнейшем планируется интеграция различных имитационных моделей в программно-аппаратный комплекс.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. ПЛК160. Контроллер программируемый логический. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.owen.ru/product/plk160/connection>. – 05.08.19.
2. ПЧВ1 и ПЧВ2 преобразователь частоты. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.owen.ru/product/preobrazovatel\\_chastoti\\_oven\\_pchv1\\_i\\_pchv2](https://www.owen.ru/product/preobrazovatel_chastoti_oven_pchv1_i_pchv2). – 05.08.19.
3. Деменков Н.П. Системы автоматического управления на основе программируемых логических контроллеров // Техническая коллекция SchneiderElectric. – 2006. – № 16. – С. 26–42.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛОКА ЖИДКОСТНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ

А.И. Гожимов, С.Н. Ливенцов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aig3@tpu.ru](mailto:aig3@tpu.ru)

Данная работа посвящена разработке имитационной модели системы управления блоком жидкостной хроматографии, входящей в состав модуля переработки ШУП ОЯТ. Разработанная имитационная модель реализует расчет процесса хроматографической очистки, расчет управляющих воздействий системы управления, отказы оборудования, и внедрена в состав среды имитационного моделирования КОД ТП. На рисунке 1 представлен внешний вид модели блока жидкостной хроматографии в среде КОД ТП.

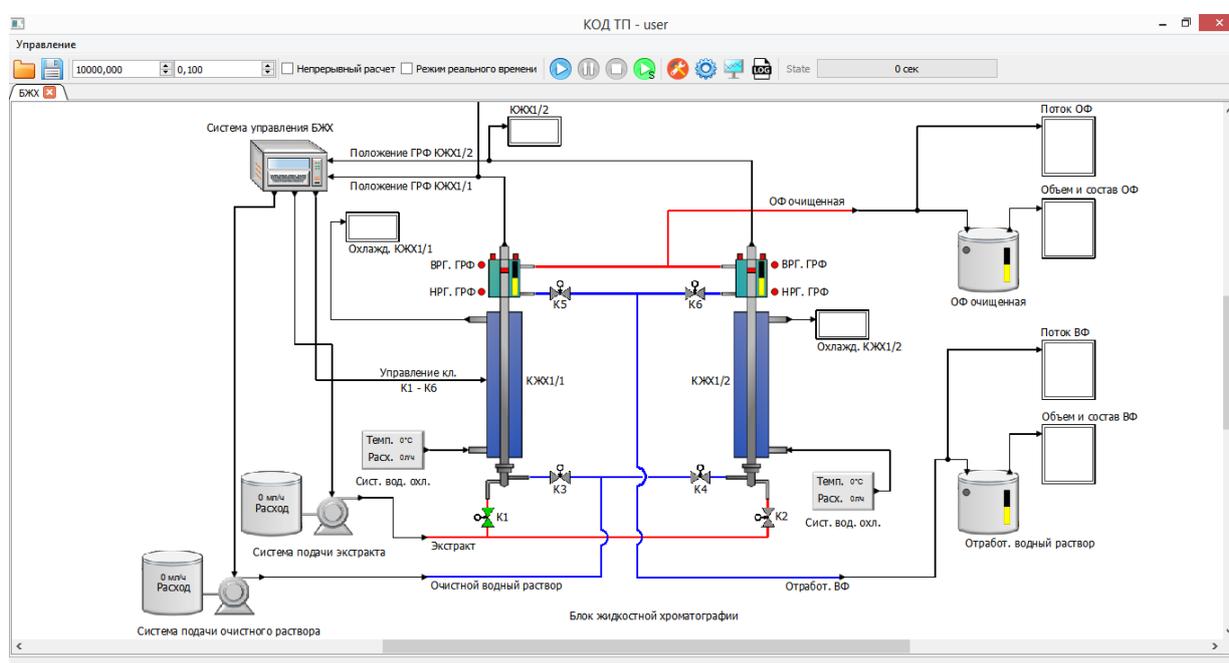


Рис. 1. Модель блока жидкостной хроматографии в КОД ТП

Математическая модель процесса жидкостной хроматографии была составлена на основе физических закономерностей и параметров установки, а также был проведен эксперимент на экспериментальной установке для оценки адекватности модели. На основе полученных результатов экспериментов была проведена настройка модели.

Разработанная модель позволяет анализировать составы выходных продуктов (очищенная органическая фаза и отработанный водный раствор) в зависимости от составов входных продуктов, от управляющих воздействий системы управления. Моделирование отказов оборудования позволило составить ряд рекомендаций и предложений по модернизации структуры с целью повышения надежности и безопасности установки.

Данная модель может быть использована для создания тренажера оператора технологического процесса.

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛИНИИ СПЕКАНИЯ  
ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК В СРЕДЕ КОД ТП**

Е.Л. Григорьева, К.А. Козин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [elg2@tpu.ru](mailto:elg2@tpu.ru)

Для приобретения эффективных навыков управления технологическими процессами в атомной промышленности и ядерной энергетике используют специальный компьютерный тренажер, моделирующий технологический процесс и производящий необходимый математический расчет параметров объекта. Использование этого метода обучения увеличивает и поддерживает приемлемый уровень навыков оперативного персонала и предупреждает возникновения аварийных ситуаций на объектах, помогает получить опыт и последовательность действий в нештатных ситуациях без экономического, экологического вреда и производственного ущерба из-за ошибок персонала или неэффективного управления.

Разрабатываемая математическая модель для тренажера предназначена для имитации работы технологических схем замкнутого ядерного топливного цикла для исследования работоспособности, управляемости и оптимизации и состоит из различных частей линии спекания таблеток смешанного нитридного уран-плутониевого топлива, которая является завершающей стадией уплотнения топливных таблеток и определяет состав, структуру и свойства топливной композиции. Линия спекания состоит из диспетчерского бокса, входного и выходного перчаточного бокса, толкательной печи спекания и обратного транспортера. Разрабатываемая математическая модель осуществляет имитацию параметров и визуализацию основных переменных объекта, и моделирование аварийных ситуаций. Расчет выполнен на языке C++.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Нагайцева О.В., Ливенцова Н.В., Ливенцов С.Н. Концепция тренажерной модели электрохимического производства // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т.315. – № 5. – С. 89–93.

**СРЕДА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ**

М.Е. Губарь, А.И. Гожимов, А.О. Плетнёв, С.Н. Ливенцов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [meg3@tpu.ru](mailto:meg3@tpu.ru)

Среда имитационного моделирования технологических процессов КОД ТП представляет собой программный комплекс, написанный на языке C++. Данный комплекс будет использован для проведения вычислительных экспериментов, анализа технологических процессов и их систем управления и в качестве тренажера оператора АСУ ТП.

Программный комплекс КОД ТП состоит из независимых модулей, где каждый модуль реализует часть функционала всего программного комплекса. Данное архитектурное решение снижает общую сложность программного кода и упрощает расширение и сопровождение программы [1].

Расширяемость программного комплекса достигается путем использования интерфейсных классов, которые позволяют разработчикам писать динамические библиотеки для расширения функционала программного комплекса и добавлять их в программный комплекс без перекомпиляции исходного кода. Каждый интерфейсный класс необходим для модификации конкретной части программного комплекса. Плагиновая архитектура позволяет использовать только часть от написанных плагинов, в зависимости от нужд пользователя в конкретный момент времени [2].

Например, в случае необходимости можно добавить возможность связи программного комплекса с другими программными средствами. Для этого необходимо написать плагин, в котором будет содержаться настройка соединения и обмена данными и добавить к программному комплексу. При этом экономится время разработчиков и упрощается сопровождение программы [3].

Ключевым звеном в работе программного комплекса является модель технологического процесса, состоящая из моделей технологических аппаратов и систем управления, называемых блоками. Блоки состоят из графического образа и математического описания. В программном комплексе реализована база типовых блоков, на основе которой выполняется моделирование технологических процессов путем установки связей между блоками, представляющих технологические узлы.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Фаулер М. Архитектура корпоративных программных приложений. – М.: Вильямс, 2007. – 544 с.
2. Макконнелл С. Совершенный код. – М.: Microsoft Press, 2017. – 896 с.
3. Джонсон Р. Приемы объектно-ориентированного программирования. Паттерны проектирования. – М.: Питер, 2016. – 366 с.



**МОДУЛЬ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МОДЕЛИРОВАНИЯ  
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ КТ-NIMFA**

В.А. Данилкина, А.О. Плетнёв, А.И. Гожимов, С.Н. Ливенцов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [vad17@tpu.ru](mailto:vad17@tpu.ru)

В рамках проекта «ПРОРЫВ» сотрудниками ЭАФУ НИ ТПУ разрабатывается Код Оптимизации и Диагностики Технологических Процессов (КОД ТП), предназначенный для имитации работы технологических схем ЗЯТЦ с целью исследования работоспособности, управляемости и оптимизации процессов. Оптимизация и диагностика технологических процессов как правило требует проведения серии экспериментов с различными параметрами. Исходя из этого, возникла необходимость в создании модуля автоматизации процесса моделирования серии экспериментов с различными параметрами для программного комплекса КОД ТП.

В КОД ТП создается большое количество разнообразных схем, для которых требуется моделирование каких-либо параметров. Чтобы пользователю не пришлось запускать множество экспериментов с различными наборами параметров вручную, предложен механизм автоматического запуска серий экспериментов с различными параметрами. Пользователю лишь необходимо написать сценарий экспериментов с требуемыми параметрами в специальный скрипт файл, загрузить его в разработанный модуль и запустить. Модуль автоматизации процесса моделирования серии экспериментов обработает скрипт файл и в соответствии с его содержанием выполнит команды, написанные пользователем. Кроме этого, модуль автоматизации серии экспериментов позволяет производить параллельный расчет нескольких схем в режиме выполнения скрипта. Предложенный механизм автоматического запуска серий экспериментов позволяет существенно сэкономить время и сократить трудозатраты пользователя.

Разработанный модуль позволяет пользователю отслеживать прогресс исполнения скрипта моделирования. Помимо этого, модуль позволяет использовать функционал загрузки состояний. Используя этот функционал можно произвести расчет до определенного времени, сохранить состояние, продолжить расчет, загрузить сохраненное состояние, изменить требуемые параметры, произвести расчет, снова загрузить сохраненное состояние, изменить требуемые параметры и вновь произвести расчет, что позволит значительно сократить время выполнения расчета серии экспериментов.

Модуль автоматизации процесса моделирования позволяет многократно производить расчет схем с различными параметрами. Причем модуль позволяет изменять значения как всех имеющихся параметров у блока, так и только тех параметров, которые необходимо заменить для дальнейшего расчета.

Применение разработанного модуля автоматизации процесса моделирования к настоящим объектам с реальными параметрами позволит производить решение различных оптимизационных задач.

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕТИ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ УСТАВОК  
В СИСТЕМУ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ  
ТОКАМАКА КТМ

А.А. Дериглазов, С.В. Федин, Д.Б. Зарва, Ю.Н. Голобоков  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aad3@tpu.ru](mailto:aad3@tpu.ru)

Экспериментальные установки, в основе которых лежат сверхвысокоскоростные физические явления ставят перед разработчиками систем управления задачу организации надёжной и быстрой связи между подсистемами, для отработки управляющих воздействий со стороны контроллера и оператора. Казахский материаловедческий токамак (КТМ) – яркий пример физической установки с подобного рода подсистемами. Необходимо решить задачу организации сетевого взаимодействия между системой управления плазмой (СУП) и системой цифрового управления (СЦУ) универсальными тиристорными преобразователями (УТП) [1] со следующими характеристиками: размер пакета – 18 байт; скорость обмена – 115200 бод/с; режим передачи – симплексный, однонаправленный; длина линии связи – 100 м; защита от наведенных электромагнитных помех. Кроме вышеперечисленных требований необходимо выдерживать временные ограничения, связанные с работой СЦУ в режиме жесткого реального времени, а именно: цикл управления –  $1600 \pm 100$  мкс, максимально допустимое количество пропущенных пакетов – не более 1 за время эксперимента. Следовательно, возникает необходимость в использовании операционных систем, драйверов и программного обеспечения с поддержкой реального времени. Для реализации поставленной задачи авторами были применены ряд аппаратных и программных решений, показанных и подробно рассмотренных в данной работе. Схематическое изображение процесса передачи управляющих воздействий от оператора к объекту управления показано на рисунке 1.



Рис. 1. Схема передачи управляющих воздействий

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зарва Д.Б., Дериглазов А.А., Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л., Павлов В.М., Ли А.М., Мезенцев А.А., Меркулов С.В., Голобоков Ю.Н. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2018. – Т.41. – № 2. – С. 59–69.

## СИНТЕЗ САУ МОДЕЛЬЮ КАМЕРЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

Е.И. Деркач, А.А. Полосин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [kajsderkach@gmail.com](mailto:kajsderkach@gmail.com)

В работе рассматривается проблема синтеза САУ камеры охлаждения, входящей в состав модуля фабрикации/рефабрикации СНУП-топлива. В исследовании использовалась среда имитационного моделирования технологических процессов КОД ТП, позволяющая разрабатывать и исследовать подобные модели.

В рассматриваемой камере происходит процесс охлаждения топливных шашек после высокотемпературного прокаливания в печи карботермического синтеза. Камера представляет собой герметичный контейнер, снабженный контуром водяного охлаждения, датчиками температуры и давления, системами подачи и отвода газов. При разработке САУ используется математическая модель объекта, которая основывается на известных физических закономерностях и проектной документации.

Задача разрабатываемой САУ состоит в поддержании давления атмосферы в камере (управляемая координата). Управляющей координатой является массовый расход отводимого газа. Влияние охлаждаемых шашек на температуру атмосферы, влияние входного расхода газа на количество газа в камере и влияние контура охлаждения на температуру атмосферы выступают основными возмущающими воздействиями при регулировании давления.

Была проведена идентификация объекта по управляющей координате и возмущающим воздействиям, были получены передаточные функции для остальных элементов САУ. В качестве закона управления, вследствие отсутствия статической ошибки регулирования, был выбран ПД-закон регулирования. Для двух возмущающих воздействий были реализованы компенсирующие цепи [1]. Структурная схема САУ изображена на рисунке 1.

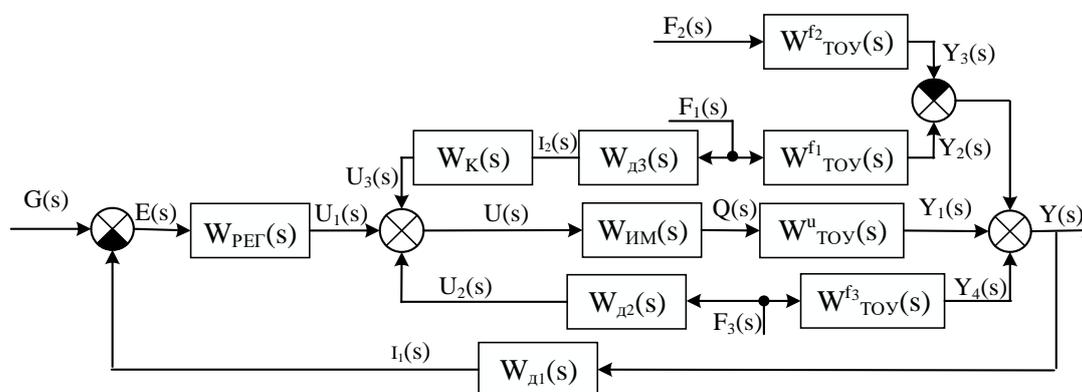


Рис. 2. Структурная схема САУ

Результатом работы является синтезированная САУ, соответствующая заявленным требованиям. Среди недостатков можно указать сложность реализации и настройки данной системы. Дополнительно, в рамках работы были выявлены возможные эксплуатационные ограничения объекта управления и сформулированы рекомендации по их устранению.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дядик В.Ф., Байдали С.А., Криницын Н.С. Теория автоматического управления: учебное пособие. – Томск: Издательство ТПУ, 2011. – 196 с.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА КАСКАДНЫХ  
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

М.С. Ефремов

Научный руководитель В.Ф. Дядик

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [mse5@tpu.ru](mailto:mse5@tpu.ru)

Экономичное, надежное и безопасное функционирование сложных промышленных объектов, каковыми являются технологические процессы предприятий ядерного топливного цикла, может быть обеспечено с помощью лишь самых совершенных принципов и технических средств управления.

Большинству промышленных объектов свойственны значительное чистое запаздывание и нестабильность динамических характеристик. В таких случаях даже при оптимальных настройках регуляторов одноконтурные системы автоматического управления (САУ) характеризуются большими динамическими ошибками. Для повышения качества регулирования необходим переход от одноконтурных САУ к более сложным системам. Повышение динамической точности САУ можно достигнуть путем применения каскадных САУ [1]. Каскадная САУ является двухконтурной, содержащей внешний контур регулирования основной регулируемой переменной с корректирующим (основным) регулятором  $R_1$  и внутренний контур регулирования промежуточной регулируемой переменной со стабилизирующим (вспомогательным) регулятором  $R_2$ . Синтез каскадной САУ предполагает последовательный расчет параметров регуляторов  $R_2$  и  $R_1$ . При расчете параметров регуляторов внутреннего и внешнего контуров каждый раз рассматривается одноконтурная САУ, состоящая из регулятора и обобщенного объекта, представляющего собой остальную часть схемы.

Для автоматизации процесса синтеза каскадных САУ разрабатывается программный комплекс в среде компьютерного моделирования MATLAB. В программном комплексе модели объектов внутреннего и внешнего контуров регулирования представлены различными динамическими звеньями. Программный комплекс позволяет производить вычисление параметров настройки ПИ и ПИД регуляторов при помощи различных методик расчета [2, 3]. В процессе моделирования строятся графики переходных процессов во задающему и возмущающему воздействиям, вычисляются прямые показатели качества, проводится оценка грубости САУ при варьировании параметров модели объектов. При анализе сравниваются прямые показатели качества, обеспечиваемые САУ синтезированными различными методами. Таким образом, конечным итогом выполнения программы являются параметры настройки регуляторов внутреннего и внешнего контуров регулирования каскадной САУ, при которых достигается наилучшее качество регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматическое управление в химической промышленности: учебник / Под ред. Е.Г. Дудникова. – Москва: Химия, 1987. – 368 с.
2. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
3. Aidan O'Dwyer. Handbook of PI and PID controller tuning rules. – 3rd Edition-London: Imperial College Press, 2009. – 608 с.

РУКОВОДЯЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО СОЗДАНИЮ В СРЕДЕ LTSPICE  
МАКРОМОДЕЛЕЙ CJFET ИНТЕРФЕЙСОВ ДАТЧИКОВ ДЛЯ РАБОТЫ В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ  
ТЕМПЕРАТУР И ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

А.А. Жук, А.А. Игнашин, М.В. Ляшов, А.Е. Титов

Донской государственный технический университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000

E-mail: [Alexey.Zhuk96@mail.ru](mailto:Alexey.Zhuk96@mail.ru)

Макромодель (ММ) является очень полезным инструментом при разработке и исследовании сложных электронных схем. Достоверность результатов моделирования зависит от того, насколько точно модель активного элемента (АЭ) учитывает характеристики реального электронного прибора.

В программе моделирования LTspice [1] отсутствуют встроенные макромодели АЭ для проектирования аналоговых устройств в условиях низких температур и проникающей радиации. В этой связи рекомендуются следующие этапы создания ММ новых или впервые разработанных АЭ.

Перед созданием ММ необходимо убедиться в работоспособности электрической схемы АЭ, указать ограничения для работы и максимально подробно описать её возможности. Это позволит заранее определить функционал ММ при использовании в конечном более сложном устройстве.

Для проектирования и оптимизации аналоговых схем, в т.ч. CJFet, с помощью библиотеки распределенных эволюционных вычислений с открытым исходным кодом DEAP [2], на первом этапе необходимо собрать полную электрическую схему АЭ, например, операционного усилителя (ОУ), зачастую без «обвязки». В данном контексте ММ представлена на двух уровнях: на графическом в виде символа, и на функциональном в виде подсхемы АЭ. ММ можно использовать для проектирования сложных (составных) устройств, а также для оптимизации аналоговых схем с помощью библиотеки распределенных эволюционных вычислений с открытым исходным кодом DEAP [2].

Для построения конкретной макромодели в среде LTspice необходимо:

- спроектировать схему активного элемента (ОУ, МОУ, КСН и т.п.) и провести исследование ее основных параметров в среде LTspice, построить характеристики и т.п.;
- собрать в среде LTspice схему созданного АЭ без подключения питания, нагрузки и т.д. Все проводники, связывающие АЭ с внешней средой, необходимо обозначить уникальными именами. На рисунке 1 приведен пример собранного таким образом компенсационного стабилизатора напряжения (КСН), который имеет 4 вывода: *vcc*, *vee*, *inp*, *out*.

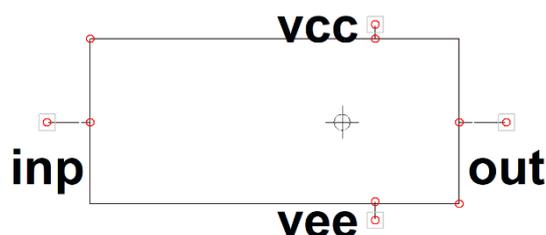


Рис. 1. Вид символа макромодели АЭ в программе LTspice

Чтобы использовать созданную макромодель при проектировании более сложного аналогового устройства, создается схема этого устройства с «обвязкой», в которую добавляется макромодель из списка активных компонентов. Затем добавляются остальные компоненты, которым присваиваются конкретные значения переменных. Далее в папку с проектируемым устройством (ARC-фильтр, аналоговый интерфейс и т.п.) добавляется схема с макромоделью (с расширением asc) и запускается ее моделирование.

Если необходимо промоделировать схему с макромоделью АЭ при различных температурах, радиации или других условиях, то все переменные и директивы помещаются в схему включения так, будто подсхема АЭ, заключенная в макромодели АЭ, собрана непосредственно в схеме включения. При этом, компоненты в макромодели должны быть из одной библиотеки (или из совместимых библиотек) и иметь правильные названия, соответствующие названиям в библиотеке, а также, при необходимости, они должны включать в себя все переменные, которые будут изменяться в схеме включения АЭ.

На рисунке 2 представлен пример использования макромодели КСН, работающего на конкретную нагрузку и с конкретным источником питания.

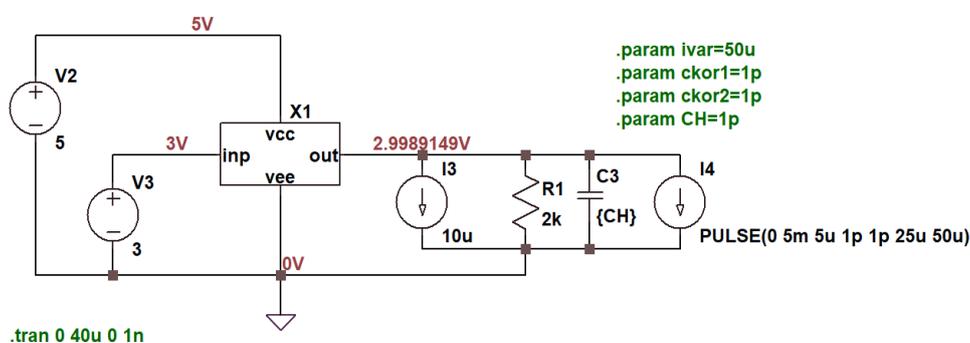


Рис. 2. Схема макромодели КСН с «обвязкой»

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LTspice® XVII, 1998-2019 Analog Devices Corporation All rights reserved [Online]. – Available: <http://LTspice.linear.com>. – May 13, 2019.
2. Liashov M.V., Prokopenko N.N., Ignashin A.A., Dvornikov O.V., Zhuk A.A. Parametric Optimization Subsystem in LTspice Environment of Analog Microcircuits for Operation at Low Temperatures // 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2019). – 2019.

## СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ В СРЕДЕ LTSPICE РАДИОЧАСТОТНЫХ И НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСНЫХ МИКРОСХЕМ

### ЭВОЛЮЦИОННЫМИ АЛГОРИТМАМИ

А.А. Жук, М.В. Ляшов, А.А. Игнашин

Донской государственный технический университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000

E-mail: [Alexey.Zhuk96@mail.ru](mailto:Alexey.Zhuk96@mail.ru)

Оптимизация аналоговых схем на уровне компонентов является достаточно затратной по времени процедурой (из-за необходимости проведения большого количества Spice-моделирований) с зачастую непредсказуемыми результатами поиска. Разработанный метод оптимизации позволяет проектировать радиочастотные и интерфейсные аналоговые схемы, в том числе для криогенного диапазона температур, с использованием соответствующих моделей транзисторов. Программа работает с последней версией LTSpiceXVII [1], имеет возможности локальной оптимизации (NM, MAGPM), глобальной оптимизации (DE, jDE, PSO, SA, ABC), многокритериальной оптимизации (NSGA-II, SPEA2, MO-CMA-ES), параллельной оптимизации на многоядерном процессоре, распределенной оптимизации на кластере персональных компьютеров, построения графиков функций приспособленности и эффективности по Парето. Для оптимизации конкретной схемы необходимо подготовить ее netlist в среде LTSpice, а также указать оптимизируемые элементы и диапазон изменений их значений.

В качестве примера рассматривается многокритериальная оптимизация схемы LC-фильтра 5-го порядка (рис. 1а) на языке Python. Здесь приоритетными параметрами являются номиналы элементов  $C1$ ,  $L2$ ,  $C3$ . Рассчитаны полоса частот ( $BW$ ) и частота, на которой происходит ослабление входного сигнала до  $-20$  дБ ( $KGF$ ). В результате вычислений были получены следующие параметры элементов:  $C1=3,91108162274386e-10$  Ф;  $L2=1,000001479849402e-06$  Тл;  $C3=1,0000004040235719e-09$  Ф. Затем были вычислены значения фитнес функций приспособленности для полосы частот  $BW=9,87491$  и частоты ослабления сигнала  $KGF=13,8665$ , которые изображены на рисунке 1б.

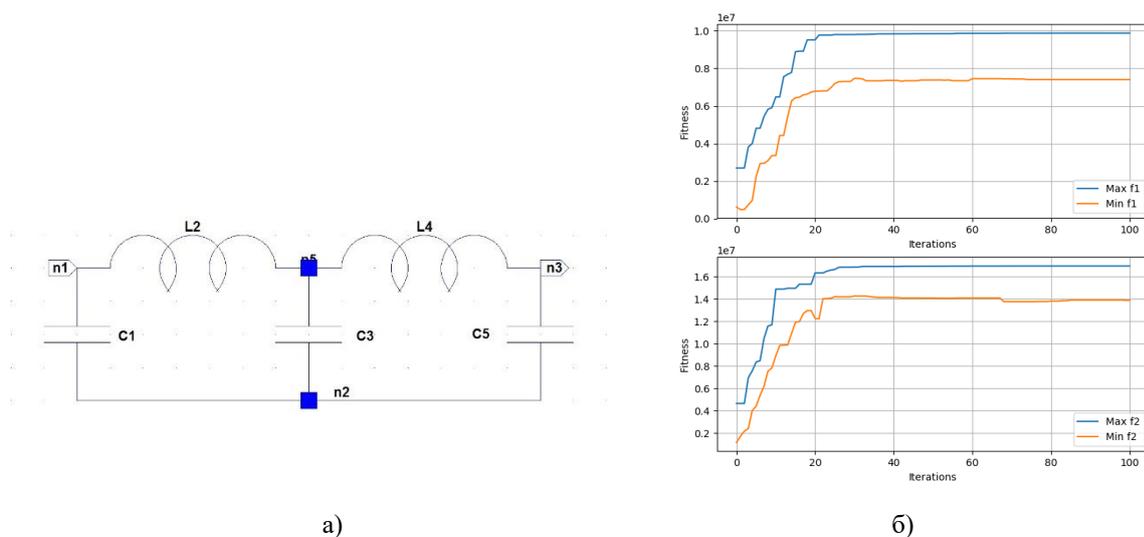


Рис. 1. LC-фильтр 5-го порядка (а) и функции приспособленности  $BW$  ( $f1$ ) для полосы частот и частоты ослабления сигнала  $KGF$  ( $f2$ ) (б)

По найденным оптимумам значений функций приспособленности для полосы частот и частоты ослабления сигнала составлена эффективность по Парето для оптимизированных функций, которая изображена на рисунке 2.

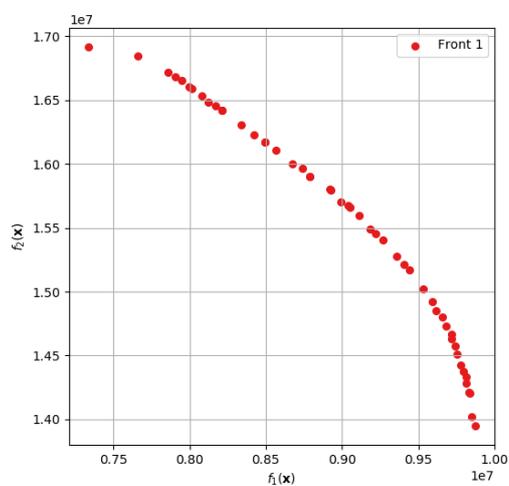


Рис. 2. Эффективность по Парето оптимумов функций

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. LTspice® XVII, 1998-2019 Analog Devices Corporation All rights reserved [Online]. – Available: <http://LTspice.linear.com>. – May 13, 2019.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ ТРАНЗИСТОРОВ  
С РАЗЛИЧНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕЙСОВ  
ДАТЧИКОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР И РАДИАЦИИ

А.А. Жук, Е.М. Савченко, Д.Г. Дроздов, П.С. Будяков

Донской государственный технический университет,

Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина 1, 344000

E-mail: [Alexey.Zhuk96@mail.ru](mailto:Alexey.Zhuk96@mail.ru)

Разработанный в АО «НПП «Пульсар» [1, 2] технологический процесс позволяет проектировать аналоговые микросхемы (АМ), содержащие как JFet полевые, так и СВЧ комплементарные биполярные транзисторы и по уровню основных достигнутых параметров соответствует техпроцессу BiCom3HV фирмы Texas Instruments (США). Исследованы два типа конструкций  $p$ - и  $n$ -канальных JFet транзисторов. Особенности первой (тип 1) конструкции  $p$ -канальных JFet являются: формирование областей стока/истока за счёт пассивной базы  $nnp$ -транзистора и областей глубокого коллектора  $pnp$ -транзистора при расстоянии между областями сток/исток – 4,2 мкм; формирование канала на основе  $p$ -слоя коллектора  $pnp$ -транзистора; формирование нижнего затвора с применением  $p^+$  скрытого слоя; формирование верхнего затвора за счёт активной базы и поликремниевого эмиттера  $nnp$ -транзистора.

Во второй конструкции (тип 2)  $p$ -канальных JFET предусмотрено: формирование областей стока/истока за счёт пассивной базы  $nnp$ -транзистора и областей глубокого коллектора  $pnp$ -транзистора при расстоянии между областями сток/исток – 6,6 мкм; формирование канала на основе  $p$ -слоя коллектора  $pnp$ -транзистора; формирование нижнего затвора с применением  $p^+$  скрытого слоя; формирование верхнего затвора за счёт пассивной базы.

В отличие от  $p$ -канальных транзисторов, для которых получены напряжения отсечки  $U_{T0} \sim 4-5,5$  В, для  $n$ -канальных транзисторов напряжение отсечки составляет  $U_{T0} \sim 1,7-3,2$  В. Это приводит к тому, что для  $n$ -канальных JFet при той же площади получены меньшие значения тока стока. Соответственно, данные транзисторы целесообразно сравнивать не при 50 мкА (как для  $p$ -канальных транзисторов), а при токе стока 10 мкА.

Выполнены экспериментальные исследования стоко-затворных характеристик  $p$ - и  $n$ - JFet при разных напряжениях на стоке. Разработанные конструкции JFet активных элементов рекомендуется использовать при организации производства СВЧJFet аналоговых микросхем и интерфейсов датчиков при воздействии низких температур и радиации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Д.Г. СВЧ комплементарный биполярный технологический процесс с высокой степенью симметрии динамических параметров транзисторов: Дис... канд. техн. наук. – Москва, 2017. – 165 с.
2. Drozdov D.G., Prokopenko N.N., Savchenko E.M., Grushin A.I., Dukanov P.A. Complementary JFETs Integrated into the Microwave Complementary Bipolar Double Self-Aligned Technology // 17th IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2019). – 2019.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И МАГНИТНОГО ПОТОКА В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ ТОКАМАКА КТМ

Д.А. Зольнов, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [daz19@tpu.ru](mailto:daz19@tpu.ru)

Технологические процессы создания токамаков-реакторов требуют разработки и испытаний новых материалов для защиты первой стенки и приемных диверторных пластин. Казахстанский токамак материаловедческих исследований (КТМ) является базовой установкой для проведения системных исследований образцов материалов. Существует два варианта исследования процессов, происходящих внутри вакуумной камеры токамака: первым является многолетние опытные испытания; вторым, наиболее безопасным и выгодным, использование специальных компьютерных моделей. Данные модели позволяют быстро и безопасно воспроизводить то, как поведет себя плазменный шнур при тех или иных параметрах физического пуска установки.

Поддержание формы плазменного шнура обеспечивается системой магнитного управления током, которая состоит из системы электромагнитной диагностики и системы импульсного электропитания обмоток управления конфигурацией магнитного поля. Для получения информации о магнитной конфигурации плазменного шнура, по периметру вакуумной камеры расположены 12 датчиков магнитного потока и 36 двухкомпонентных датчиков электромагнитной индукции. Используя известные по базовому сценарию разряда установки КТМ данные, появляется возможность не только рассчитать физические параметры плазменного шнура, но и отображать его форму на графической модели.

Результат работы программы моделирования для одного из моментов базового сценария разряда в токамаке КТМ показан на рисунке 1. При использовании данных электромагнитной диагностики и задании всех параметров полоидальных обмоток, а также самого плазменного шнура, по принципу суперпозиции был получен суммарный магнитный поток, создаваемый в сумме плазменным шнуром и всеми обмотками управления.

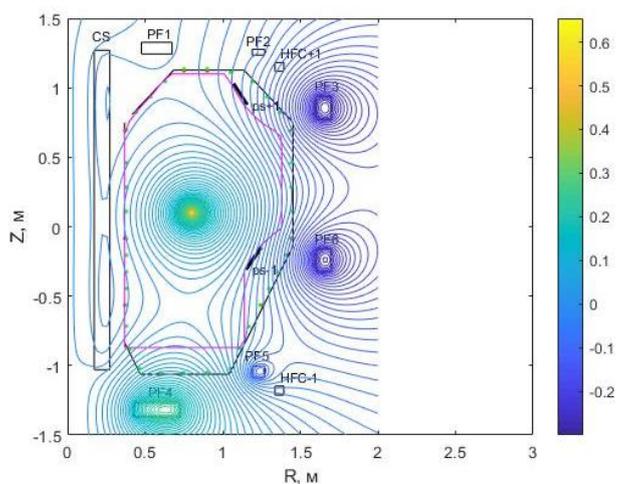


Рис. 1. Результат работы программы моделирования

В дальнейшем данную модель планируется применять в алгоритмах реконструкции формы плазменного шнура по любым данным электромагнитной диагностики, поступающим с реальной установки КТМ.

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩАЯ СИСТЕМА УСТАНОВКИ ОЧИСТКИ ОБЛУЧЕННОГО БЕРИЛЛИЯ

С.А. Ильиных

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК,

Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбіт атом, 10, 071100

E-mail: [ilinykh@nnc.kz](mailto:ilinykh@nnc.kz)

Целью разработки является автоматизация процесса очистки облученного бериллия от радионуклидов методом хлорирования на установке с прямоточной реакционной камерой хлоратором, направленная на повышение эффективности технологии и создание безопасных условий эксплуатации установки.

Основным назначением информационно управляющей системы установки очистки облученного бериллия является:

- автоматическая обработка сигнала интенсивности светового потока (люксметра) являющегося критерием концентрации хлора в реакционной камере;
- автоматическая регулировка температуры технологического процесса на основных узлах установки;
- сбор и регистрация измерительных каналов;
- удаленное управление клапанами (открытие/закрытие).

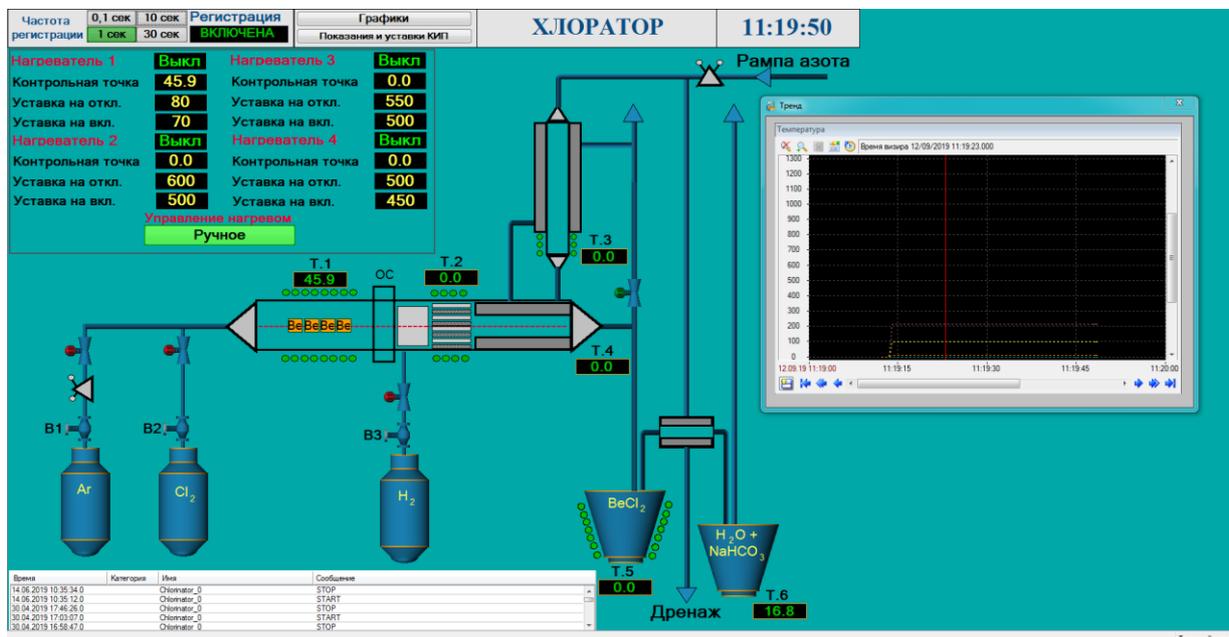


Рис. 1. Информационно-управляющая система «Хлоратор»

Информационно-управляющая система установки очистки облученного бериллия позволяет удаленно управлять технологическим процессом, тем самым исключая возможность взаимодействия людей с вредными для здоровья веществами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство пользователя SCADA Trace Mode 6. – Москва, 2011. – Т.1. – 14 издание. – 11 с.
2. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1988.
3. Васильев Ю.С., Пивоваров О.С., Зуев В.А., Игнашев В.И., Колодешников А.А., Яковлев В.В. Внереакторный экспериментальный стенд для исследования проблем безопасности быстрых реакторов // Вестник НЯЦ РК. – 2002. – № 1. – С. 18–24.
4. Колокольцов М.В. Разработка программного обеспечения автоматизации быстродействующей системы измерений параметров жидкого натрия на платформе WINDOWS // Вестник НЯЦ РК. – 2005. – № 4. – С. 102–109.
5. Kubo S., Tobita Y., Sato I., Kotake S., Endo H., Koyama K., Konishi K., Kamiyama K., Matsuba K., Toyooka J., Zuyev V.A., Pakhnits A.V., Vityuk V.A., Gaidaichuk V.A., Vurim A.D., Kolodeshnikov A.A., Vassiliev Y.S. Main outcomes and future plan of the EAGLE project // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – № 1. – С. 13–18.
6. Каражигитов Д.Б., Коровиков А.Г. Информационно-измерительная система параметров жидкого натрия // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – № 3. – С. 65–70.

## СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА КТМ

С.В. Котов, Д.Б. Зарва, В.М. Павлов

Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Институт атомной энергии,

Республика Казахстан, г. Курчатов, ул. Бейбит атом, 2Б, 071100

E-mail: [kotov@nnc.kz](mailto:kotov@nnc.kz)

В Курчатове вводится в эксплуатацию первый в республике Казахстан Токамак КТМ [1]. Благодаря применению ВЧ-нагрева, время удержания плазмы в камере планируется довести до 4 секунд, что накладывает особые требования на систему управления вертикальным положением плазмы.

В рамках работ по созданию системы управления вертикальным положением плазмы, в настоящее время полностью смонтирована система питания обмоток (НФС), состоящая из согласующего трансформатора, двух последовательно соединенных универсальных тиристорных преобразователя и инвертора напряжения [2]. Моделирование системы питания обмотки НФС показало соответствие скоростей ввода тока в обмотку заданным значениям (рис. 1). Завершение пусконаладочных работ по основным источникам питания позволит получить экспериментальные данные, необходимые для дальнейшей настройки системы управления обмоток НФС.

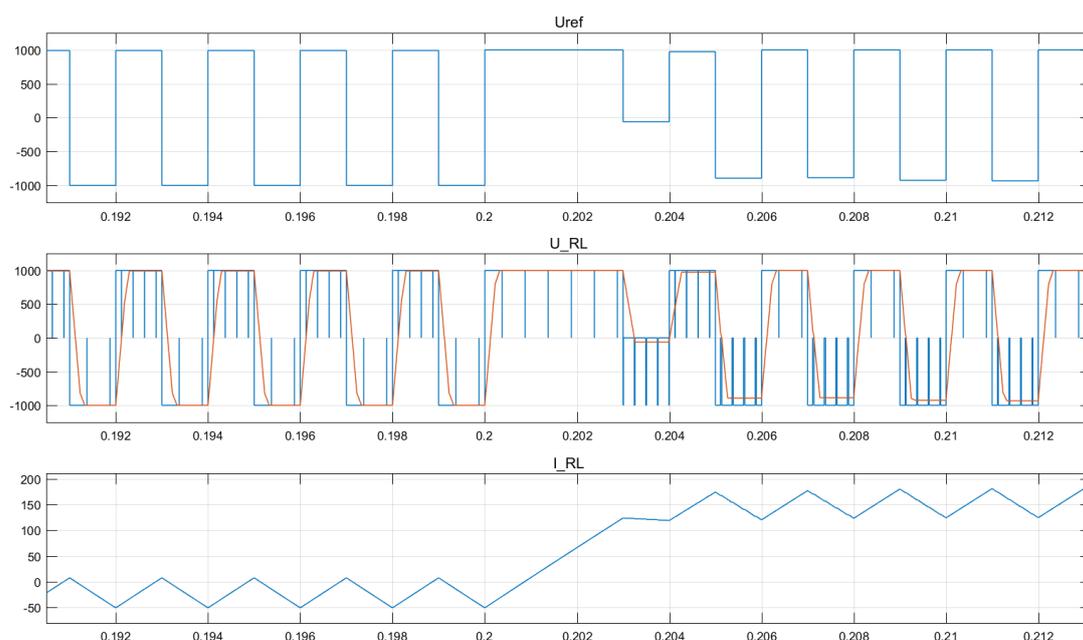


Рис. 1. Моделирование ввода тока в обмотку НФС

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азизов Э.А., Тажибаева И.Л., Велихов Е.П., Школьник В.С. Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы термоядерного синтеза. – Алматы, 2006. – 236 с.
2. Зарва Д.Б., Дериглазов А.А., Батырбеков Э.Г., Тажибаева И.Л. Электротехнический комплекс системы импульсного электропитания токамака КТМ // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2018. – Т.41. – № 2. – С. 59–70.

СИСТЕМА ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СЕТИ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ТОКАМАКА КТМ

А.М. Ли, Д.Б. Зарва, С.В. Котов, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [alee@tpu.ru](mailto:alee@tpu.ru)

Система силового импульсного электропитания Казахстанского материаловедческого токамака (КТМ) обеспечивает питание электромагнитной системы (ЭМС) токамака, состоящей из обмотки тороидального поля TF, индуктора CS и обмоток полоидального поля PF1-PF6. Источники питания обмоток ЭМС представляют собой 12-пульсные тиристорные преобразователи. Источники питания обмоток CS и PF работают в 4-х квадрантном режиме преобразования.

Система цифрового управления (СЦУ) источниками питания обмоток ЭМС построена на основе магистрально-модульной x86 архитектуре под управлением ОС реального времени Linux/Херонаі с циклом управления 1,667 мс. СЦУ выполняет следующие функции: выдачу управляющих импульсов на тиристоры согласно алгоритму импульсно-фазового управления; управление напряжением на вводах обмоток ЭМС по заданной диаграмме углов или диаграмме напряжений (в режиме работы с ПИ-регулятором напряжения); измерение напряжений на выходе источников и тиристорных преобразователей; защиту источников питания.

На рисунке 1 показаны графики экспериментальных данных – напряжений и токов, полученных в разряде №2935. СЦУ работала в режиме регулирования выходным напряжением по заданной диаграмме напряжений, рассчитанной, чтобы обеспечить желаемую эволюцию токов в обмотках ЭМС.

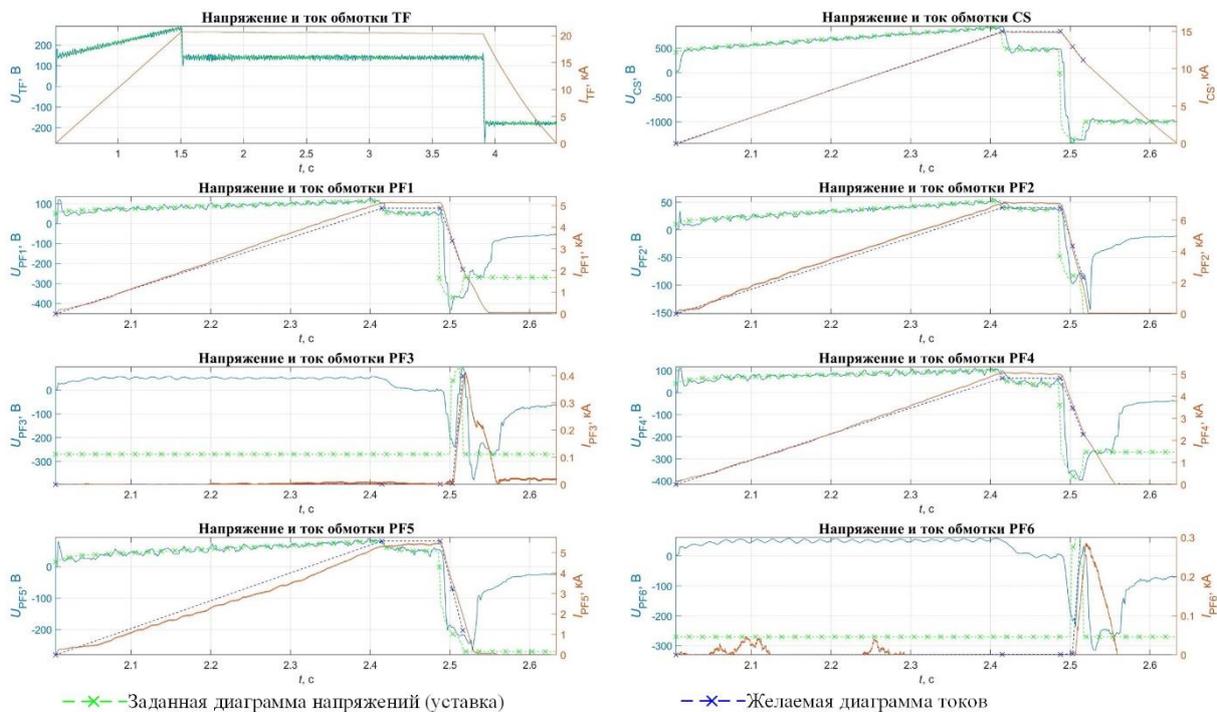


Рис. 1. Экспериментальные данные разряда №2935 токамака КТМ

## АЛГОРИТМ КОНФИГУРИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОДСТАНЦИЙ

А.А. Липатникова, А.В. Обходский, А.С. Попов, Е.С. Усков

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [aal63@tpu.ru](mailto:aal63@tpu.ru)

В настоящее время передовые технологии необходимые для производства современных систем управления переходят от этапа научных исследований и экспериментов к практическому использованию. Интенсивно разрабатываются и внедряются современные стандарты связи для обмена информацией. Происходит значительное развитие алгоритмов управления аппаратным и программным обеспечением. Появление новых международных стандартов и развитие современных информационных технологий открывает возможность новых подходов к решению задач автоматизации и управления энергообъектами, позволяя создать электроэнергетические подстанции нового типа – цифровые подстанции (ЦПС) [1,2].

Согласно нормативной документации, цифровая подстанция должна обеспечивать высокий уровень автоматизации. Управление работой подстанции, процессы обмена информацией между ее элементами должны выполняться в цифровой форме на основе стандартов серии МЭК 61850.

Одной из целей внедрения стандартов МЭК 61850 является снижение времени восстановления выводимого из строя оборудования, уменьшение количества технологических нарушений (непрерывная диагностика оборудования и цепей). Достижение этих целей предполагает использование механизмов удаленного конфигурирования, что и является одним из основных требований к функциям ЦПС (рисунок 1).

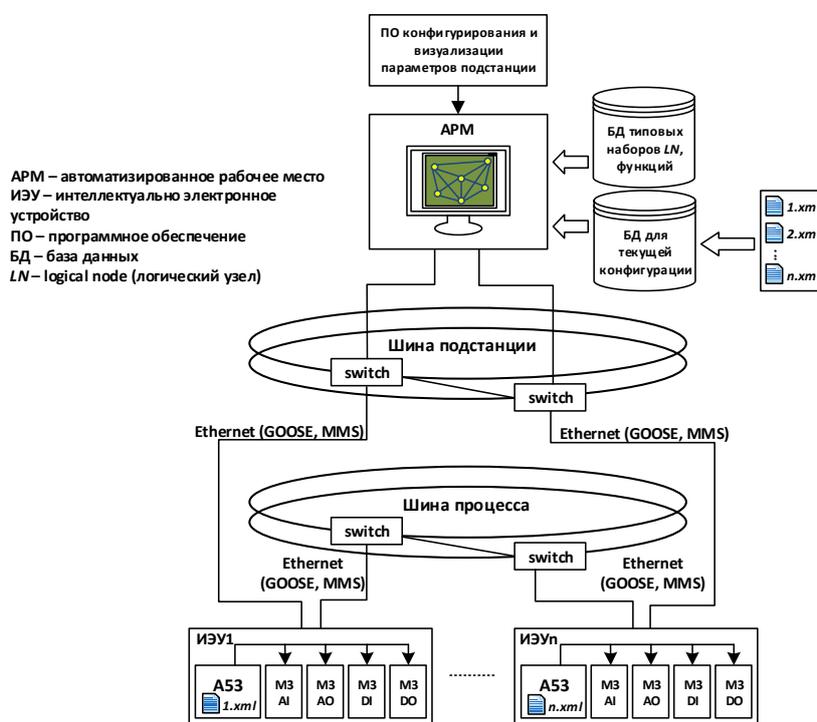


Рис. 1. Структура системы контроля и управления типовой электроэнергетической подстанции

Конфигурирование подстанций по стандарту МЭК 61850 должно происходить следующим образом. Оператором подстанции формирует структура схемы обработки данных, обмена информацией и алгоритмы

управления, по этой схеме формируется xml набор из базы данных типовых наборов логических узлов и задаются параметры настройки каждого отдельного узла. После чего, xml-файл загружается в ИЭУ и инициализируется работа каналов ввода/вывода. Сбор данных с ИЭУ и запись параметров в ИЭУ при этом могут осуществляться за счет механизмов репликации СУБД, работающих с одинаковыми сегментами базы данных.

Стандарт МЭК 61850 предполагает использование базы данных для большого количества распределенных подстанций. Задача проектирования логической структуры базы данных состояла в определении состава таблиц и атрибутов (полей) таблиц базы данных. Для каждого поля были определены тип, название и сформировано его содержание (рисунок 2).

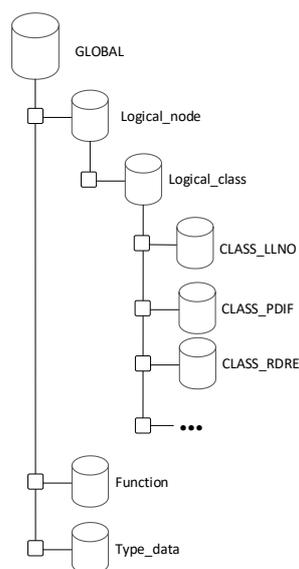


Рис. 2. Физическая структура базы данных

Для минимизации объема отдельных таблиц, каждому полю было присвоено уникальное обозначение. Обозначения выбирались с учетом сохранения логической связи с названиями полей. Например, поле «Logical\_node» обозначено символами «LOG\_NODE», полю «Identification\_PICOM» присвоено обозначение «IDENTIF\_PICOM» и так далее.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Соглашение о предоставлении гранта RFMEFI57818X0272.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик Т.Г., Кириенко О.В. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии «Цифровая подстанция». Первый российский прототип // Релейная защита и автоматики. – 2012. – С. 86–89.
2. Липатникова А.А., Дьячков Е.В., Обходская Е.В. Информационная система геохимического и геофизического мониторинга месторождений углеводородов // Молодежь и современные информационные технологии: Сборник трудов XVI Междунар. научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых. – Томск, 2019. – С. 174–175.



**ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ РАСХОДОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ  
РАДИОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

И.П. Лысенко, Г.В. Сумин, А.А. Денисевич

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [denisevichaa@tpu.ru](mailto:denisevichaa@tpu.ru)

В настоящее время Госкорпорацией РОСАТОМ реализуется проект ПРОРЫВ, одной из задач которого является реализация замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ). Одной из ключевых особенностей ЗЯТЦ является малая производительность аппаратов, и соответственно малые расходы материальных потоков.

На данный момент на рынке приборов контроля расхода жидких сред существует множество датчиков, основанных на различных принципах действия: тахометрические, расходомеры постоянного и переменного перепада давления, ультразвуковые кориолисовые расходомеры и др. Но далеко не все приборы позволяют измерять малые расходы в диапазоне до 6 л/ч. Так же указанные измерители малых расходов не могут применяться для радиоактивных жидкостей и не могут устанавливаться в «горячих» камерах (из-за невозможности отделения и дистанционного удаления электронного модуля от сенсора).

Из аналитического обзора установлено, что для измерения малых расходов в лабораторных условиях можно использовать капиллярные расходомеры, которые являются подвидом расходомеров с гидравлическим сопротивлением. Таким сопротивлением является капиллярная трубка определенной длины, по перепаду давления на которой определяется объёмный расход среды. Именно данный тип расходомеров взят за основу для разработки прибора контроля малых расходов радиохимических производств.

Принцип действия расходомера с гидравлическим сопротивлением заключается в измерении перепада давления, создаваемого гидравлическим сопротивлением, которое установлено в трубопроводе. Данным сопротивлением служит капиллярная трубка длиной 500 мм, внутреннего и внешнего диаметра 2 мм и 3 мм соответственно. Для измерения перепада давления используется разработанный сотрудниками научно-образовательной лаборатории «Электроника и автоматика физических установок» Томского политехнического университета интеллектуальный измеритель дифференциального давления, который подключается через капилляры и фторполимерные тройники к торцам сужающего устройства. После реализации измерителя малых расходов, была проведена серия экспериментов по измерению расхода артезианской воды. Полученные результаты показали, что зависимость перепада давления от расхода жидкости имеет линейный характер.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Денисевич А.А., Ефремов Е.В., Ливенцов С.Н. Методы контроля технологических параметров ядерных энергетических установок: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 90 с.
2. Pletnev A.O., Denisevich A.A., Goryunov A.G., Manenti F. Development the device of automatic dispensing low flowrates of aggressive and radioactive liquids // Chemical Engineering Transactions. – 2018. – Vol. 70. – pp. 1411–1416.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ 1-ОЙ СТУПЕНЬЮ УЗЛА ДЕСУБЛИМАЦИИ  
ПРОИЗВОДСТВА ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

А.В. Николаев, Н.С. Криницын, В.Ф. Дядик

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [niav@tpu.ru](mailto:niav@tpu.ru)

Узел десублимации производства гексафторида урана на АО «Сибирский химический комбинат» построен по каскадному принципу и включает последовательно связанные друг с другом 3 ступени переработки технологического газа. Каждая ступень представляет собой аппарат десублимации, предназначенный для выделения ГФУ из состава поступающего на его вход технологического газа. По мере продвижения технологического газа по ступеням узла десублимации концентрация ГФУ в его составе уменьшается. Таким образом, максимальная нагрузка по выделению ГФУ приходится на аппараты 1-ой ступени узла десублимации.

Работа аппарата характеризуется двумя режимами, которые циклически повторяются: накопление и сброс десублимата. В зависимости от длительности времени накопления изменяется толщина и плотность полученного десублимата. В моменты сброса происходит осыпание десублимата в транспортные контейнеры.

Основным показателем работы узла десублимации является его производительность. Признаком стабильности работы аппарата является равенство массы сбрасываемого продукта за каждый цикл накопления и конечная масса транспортных контейнеров, в которые осыпается десублимат. Обеспечение равенства отгружаемых транспортных контейнеров возможно при условии регулирования толщины накапливаемого слоя за счёт изменения величины времени накопления [1]. Сложность задачи регулирования состоит в непостоянной доле ГФУ в составе перерабатываемого технологического газа и, соответственно, разной скорости нарастания десублимата.

Разработанная САУ управления 1-ой ступенью узла десублимации производства гексафторида урана позволяет добиваться стабильной производительности аппаратов. При расчёте управляющего воздействия (времени накопления десублимата) учитываются величина расхода технологического газа, доля ГФУ в его составе, температура хладагента в режиме накопления и толщина накапливаемого слоя десублимата. Формула расчёта получена методом статистического анализа путем проведения полного факторного эксперимента на разработанной пространственно-распределённой математической модели аппарата десублимации [2].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курин Н.П., Андреев Г.Г., Дядик В.Ф., Ливенцов С.Н., Маслов А.А., Онищук А.Н. АСУТП производств гексафторида урана // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т.305. – № 3. – С. 398–402.
2. Николаев А.В., Криницын Н.С., Дядик В.Ф. Математическая модель десублиматора производства гексафторида урана // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 12-3. – С. 97-103.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИМ МЕМБРАННЫМ МОДУЛЕМ

А.В. Платонова, И.С. Надеждин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [alena1997999@gmail.com](mailto:alena1997999@gmail.com)

Использование воды на производстве имеет различную направленность, примерами могут являться использование воды для промывки продукции, охлаждения продукта и оборудования, газоочистки, газотранспорта. В результате вода насыщается различными примесями как органического, так и минерального происхождения. Возникает необходимость очистки промышленных вод для повторного использования в технологических процессах. Фильтрация воды возможна с использованием таких методов как адсорбция, экстракция, ректификация и экстракция. В работе рассмотрена модель мембранного модуля, осуществляющего фильтрацию однокомпонентного раствора методом обратного осмоса. Данный метод фильтрации был выбран на основе относительно малого размера молекул растворенного компонента в исходном растворе. Цель данного исследования разработка системы управления обратноосмотическим мембранным модулем.

Автоматизация технологических процессов имеет важную роль, так как может обеспечить рост объемов продукции при минимальных затратах на ресурсы. Автоматизация любого производства начинается с анализа технологического процесса, создания модели данного процесса и разработки автоматизированной системы управления (АСУ). В ходе анализа данного процесса очистки воды как объекта управления был сделан вывод о том, что скорость и степень очистки воды зависят от расхода пермеата, поэтому в качестве контролируемой переменной была выделена именно эта величина. Движущей силой прохождения раствора через мембранный модуль и, как следствие фильтрации исходного раствора от примесей, является давление. Поэтому в качестве управляющей переменной было выбрано давление на входе мембранного модуля.

Одним из главных элементов АСУ является регулятор. В рамках данной исследовательской работы было проведено сравнение АСУ на базе ПИД регулятора и регулятора с прогнозирующей моделью (Model predictive Control – MPC регулятор). По результатам исследований был сделан вывод о том, что для управления обратноосмотическим мембранным модулем целесообразно использовать MPC регулятор, несмотря на трудности в реализации. Автоматизированная система управления на базе MPC регулятора обеспечивает стабильное протекание процесса очистки воды и позволяет снизить затраты электроэнергии на данный процесс водоочистки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Generaal B. Sc. Wind Driven Reverse Osmosis Desalination for Small Scale Stand-Alone Applications. – Delhi University of Technology, 2011. – 155 p.
2. Головашин В.Л., Лазарев С.И., Мамонтов В.В., Ворожейкин Ю.А. Математическое моделирование обратноосмотического аппарата трубчатого типа // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2009. – Т. 11. – №3. – С. 31–42.
3. Шендлер Ю.И. Справочник по автоматизации и средствам контроля производственных процессов. – М.: Недра, 1972. – 324 с.
4. Mejvik S., Nakan O. Model Based Engineering of a Reverse Osmosis Water Purification Plant. – Lund University, 2012. – 32 p.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ЛИНЕЙНОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

А.О. Плетнев, С.Н. Ливенцов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: [aop1@tpu.ru](mailto:aop1@tpu.ru)

В данной работе рассматривается разработка модели линейного кристаллизатора. Задачи моделирования решались при помощи инструментального комплекса КОД ТП, который позволяет разрабатывать и исследовать имитационные модели подобных технологических объектов радиохимических производств.

Кристаллизатор выполняет функцию очистки ядерного топлива от продуктов деления в модуле переработки. Исследуемый линейный кристаллизатор состоит из следующих основных компонентов: система дозирования плава, кристаллизационная колонна, накопительные емкости продукта. Принцип работы основан на различных условиях кристаллизации полезного продукта и загрязнителей смеси. Моделирование данного процесса сопровождается набором трудностей: многосвязность объекта, недостаточность описания процесса, большое количество наблюдаемых параметров, недостаток экспериментальных данных. Дополнительную трудность вызывает необходимость обеспечения непрерывности протекания процесса кристаллизации.

Конечный вариант модели линейного кристаллизатора разработанной в среде КОД ТП представлен на рисунке 1.

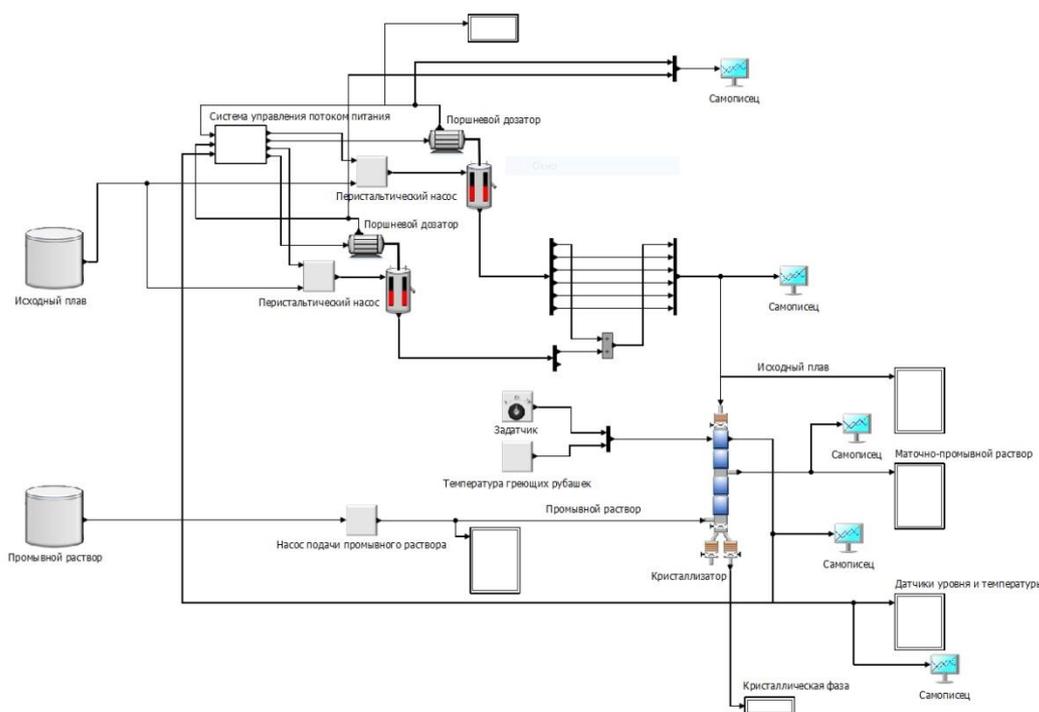


Рис. 1. Модель кристаллизатора в среде КОД ТП

Разработанная модель позволяет варьировать параметры процесса (состав исходных продуктов, расход продуктов, эффективность охлаждения и др.) и наблюдать характеристики конечного продукта, полученного при данных условиях. Помимо модели кристаллизации были разработаны модели сопроводительного оборудования и их систем управления на участке кристаллизации (система насосов, подачи промывного раствора и т.д.). Модель находит свое применение в вопросах синтеза системы автоматического управления и поиска оптимальных режимов работы аппарата. В дальнейшем планируется проверка адекватности модели и ее использование в рамках тренажера для обучения персонала.

## РАЗРАБОТКА УНИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ВЕКТОРОВ РАСЧЕТНЫХ ДАННЫХ КТ-NIMFA

А.Й. Погар, А.О. Плетнев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [dforean@inbox.ru](mailto:dforean@inbox.ru)

В рамках проекта «Прорыв», направленного на создание ядерных энергетических технологий на базе замкнутого ядерного топливного цикла сотрудниками лаборатории ЭАФУ ТПУ разрабатывается код оптимизации и диагностики технологических процессов (КОД ТП). КОД ТП предназначен для имитации работы технологических схем ЗЯТЦ с целью исследования работоспособности, управляемости и оптимизации как отдельных процессов, узлов и установок, так и технологических схем в целом. В настоящее время разработка, отладка и имитация схем ведется большим количеством человек в течение длительного времени, что влечет за собой проблемы в унификации и стандартизации данных, используемых разработчиками. В процессе взаимодействия отдельных блоков в КОД ТП возникла необходимость в установке соответствия входных и выходных векторов данных. Для решения данной проблемы предлагается создать единый стандарт для типовых блоков, чтобы использовать во всех технологических схемах.

Каждый блок представлен в виде логической и графической части, поэтому возникла необходимость добавить в их представление функционал, обеспечивающий унификацию векторов расчетных данных. Взаимодействие структуры блока с КОД ТП показано на рисунке 1.

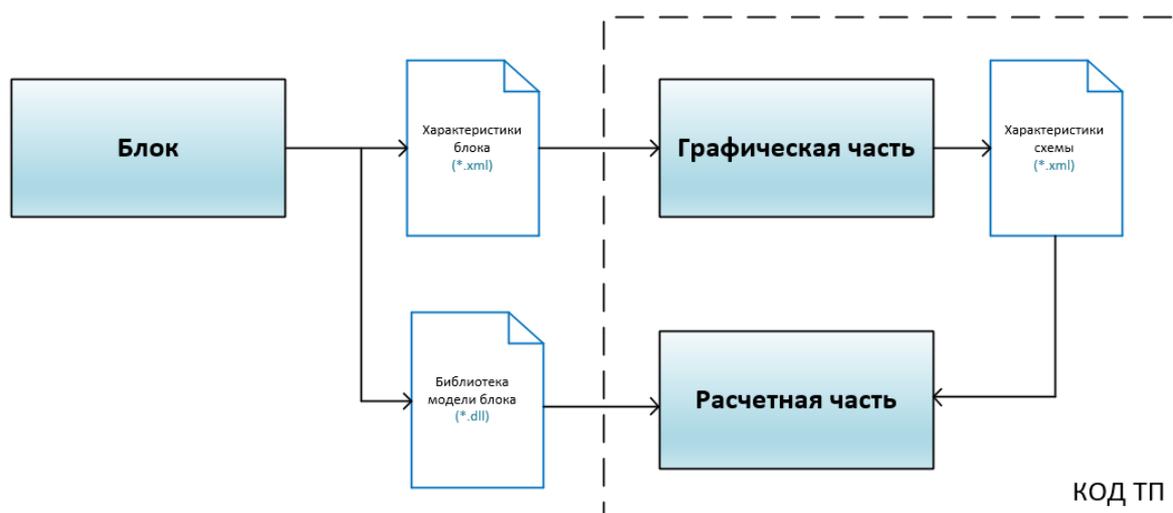


Рис. 1. Взаимодействие редактора блоков с КОД ТП

Данное дополнение позволит пользователю (разработчику технологических схем) вызывать графический интерфейс для создания структуры векторов расчетных данных для отдельного блока и сохранение этой информации в удобном формате xml. Также, созданный формат данных можно загрузить для уже существующих блоков и использовать его для создания шаблонов математического описания работы отдельных блоков и схемы в целом. Для достижения этой цели создан перечень следующих задач, которые требуется решить:

- разработка на языке c++ с применением фреймворка qt;
- вызов дополнительного окна в приложении «Редактор блоков»;
- формирование xml-документа с описанием векторов расчетных данных;
- добавление кода векторов расчетных данных в описание блока.

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕЧИ КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

А.А. Полосин, С.Н. Ливенцов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [chadik.free@gmail.com](mailto:chadik.free@gmail.com)

Работа посвящена разработке математической модели печи карботермического синтеза, входящей в состав модуля фабрикации/рефабрикации СНУП-топлива. В исследовании использовалась среда имитационного моделирования технологических процессов КОД ТП, позволяющая разрабатывать и исследовать подобные модели.

Печь карботермического синтеза является центральным элементом в технологии производства нитридного топлива. Конструкция имеет вид камерной садовой печи с горизонтальной герметичной ретортой. Процесс синтеза заключается в высокотемпературной обработке топливных шашек в сменяющейся газовой атмосфере, что приводит к химической реакции преобразования оксидного топлива в нитридное.

Модель печи основывается на научных статьях, физических закономерностях и известных параметрах оборудования. Разработка модели сопровождается рядом проблем: сложность математического описания; большое количество параметров процесса, многие из которых многосвязаны; отсутствие функционирующей реальной печи для проверки адекватности модели; многостадийность процесса синтеза. Помимо штатного режима работы описываются различные отказы оборудования, которые могут привести к аварийным ситуациям или ухудшению качества конечного продукта.

Конечный вид модели печи в среде моделирования КОД ТП представлен на рисунке 1.

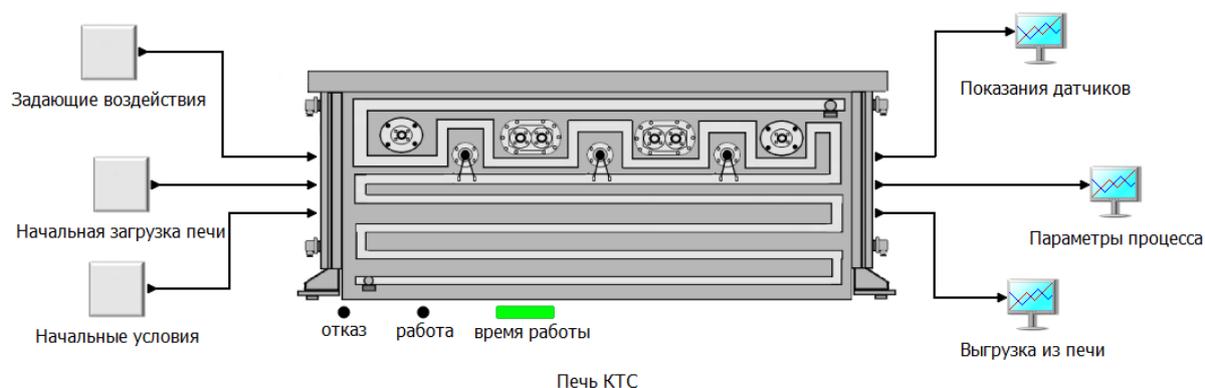


Рис. 1. Модель печи КТС

Разработанная модель позволяет устанавливать начальную загрузку синтезируемых шашек, задавать начальное состояние печи (состав атмосферы, температура отдельных элементов) и влиять на процесс синтеза задающими воздействиями (расходом газовых насосов, мощностью нагревателей), возможно наблюдать влияние отдельных отказов или их комбинаций на процесс синтеза.

Модель находит свое применение при проектировке реального технологического объекта, позволяя сформулировать рекомендации, и в вопросах синтеза системы автоматического управления. В дальнейшем планируется подтвердить адекватность модели, используя экспериментальные данные. Другим развитием модели является ее дальнейшее использование в основе тренажера.

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТА В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

А.С. Попов, А.В. Обходский, А.А. Липатникова, Е.С. Усков  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050  
E-mail: [asp5@tpu.ru](mailto:asp5@tpu.ru)

Цифровая подстанция (ЦПС) – это уникальный подход к автоматизации, который решает проблему эффективного управления энергетическими объектами, благодаря цифровой обработке информации [1]. Цифровая обработка также открывает возможности для применения наиболее современных методов обработки информации – искусственных нейронных сетей (ИНС).

Основной проблемой в использовании нейронной сети для подобных объектов является привязка к реальному времени. Реагировать на события, происходящие на ЦПС необходимо наиболее быстро, следовательно, скорость обработки информации должна быть наиболее высокой. Обучение ИНС является самой ресурсозатратной частью данного типа обработки при условии возникновения причин для переобучения на самой подстанции. Такое может быть необходимо, например, когда меняется оборудование. Более важным является момент принятия решения. Поскольку обученная ИНС делает это относительно быстро для большинства задач, ситуация с ЦПС может выглядеть иначе, поскольку там на вход подается огромное количество входных сигналов, а для некоторых случаев решение необходимо принимать за сотые доли секунды.

Значительное ускорение в работе ИНС можно получить, используя параллельные алгоритмы в совокупности с графическими ускорителями. В настоящей работе при помощи ранее разработанного экспериментального стенда [2] удалось добиться увеличения скорости обучения и принятия решений в 173 раза, используя технологию CUDA и библиотеку cudNN, позволяющую использовать возможности нейронной сети на графических ускорителях. Решалась задача моделирования выхода из строя трансформатора при помощи ИНС, обученной на выборках, сгенерированных на основе модели реального трансформатора в программном пакете MatLab SIMULINK.

Время обработки одного контрольного набора составило 0,007 сек. ИНС, обученная на 1000 выборках, предсказала выход трансформатора из строя в 10 контрольных случаях из 10, что, в совокупности с затрачиваемым временем на принятие решения, говорит о перспективности использования ИНС на ЦПС.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57818X0272.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горелик Т.Г., Кириенко О.В. Автоматизация энергообъектов с использованием технологии «Цифровая подстанция». Первый российский прототип // Релейная защита и автоматики. – 2012. – С. 86–89.
2. Dyachkov E.V., Kazaryan M.A., Obkhodskiy A.V., Obkhodskaya E.V., Popov A.S. & Sachkov V.I. Algorithm for Processing and Analysis of Raman Spectra using Neural Networks // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2018. – Vol. 11. – pp. 331–333.

РАСШИРЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ЧАСТИ КТ-NIMFA ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СРЕДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ С OPC-СЕРВЕРОМ  
ПО СПЕЦИФИКАЦИИ OPC DA 2.05A

М.М. Савинов, А.И. Гожимов, А.О. Плетнев, С.Н. Ливенцов  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [maxim.savinov.97@mail.ru](mailto:maxim.savinov.97@mail.ru)

Технологические процессы в атомной промышленности относятся к категории наиболее опасных и вредных производств, а также отличаются значительным превышением требуемых затрат электроэнергии в случае некорректного управления, либо незапланированных остановок производства ввиду человеческого фактора. Вследствие этого необходимо обеспечить рациональное и безопасное обучение и повышение квалификации персонала. Решением данной проблемы является использование компьютерного тренажера, который позволит поддерживать необходимый уровень знаний и навыков оперативного персонала, а также получать опыт действия при аварийных и нештатных ситуациях без ущерба для производства и окружающей среды.

Разрабатываемый тренажер для оператора технологического процесса состоит из различных модулей, каждый из которых выполняет свою определенную функцию, например, сбор данных, наблюдение, осуществление управления и др. Модули могут изготавливаться на разных программных платформах, поэтому для обеспечения целостного функционального взаимодействия между ними необходим специальный блок. Ключом для решения поставленной задачи является использование открытой и эффективной коммуникационной архитектуры взаимодействия между приложениями, которую предлагает программная технология OPC (OLE for Process Control), стандарта DA (Data Access) – основной промышленный стандарт взаимодействия между программными компонентами сбора данных и управления, основанный на Component Object Model (COM) фирмы Microsoft.

В итоге была разработана библиотека на основе спецификации OPC DA 2.05A, которая успешно внедрена в расчетную часть комплекса КТ-NIMFA, что обеспечило возможность обмена данными между моделью и OPC-сервером.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нагайцева О.В., Ливенцова Н.В., Ливенцов С.Н. Концепция тренажерной модели электрохимического производства // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т.315. – № 5. – С. 89–93.
2. Егорова О.В. Имитационная модель электролизного узла производства фтора для компьютерного тренажера: Дис. канд. техн. наук. – Томск, 2013. – 230 с.
3. OPCFoundation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://opcfoundation.org/>. – 29.03.19.
4. Федоренко Д.А. Программирование OPC клиентов на C++ и C#. Часть 1. OPC DA. Методическое пособие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://metodich.ru/programmirovanie-opc-klientov-na-c-i-c-chaste-opc-da/37260.pdf>. – 16.03.19.



## РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОНЛАЙН-ЛАБОРАТОРИИ

Г.В. Сумин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [gvs9@tpu.ru](mailto:gvs9@tpu.ru)

Современное образование в наши дни требует современных решений. Для обучения в современном цифровом обществе можно использовать традиционные методы обучения, однако, подобные методы уже сегодня можно считать устаревшими. Для обучения, подрастающего «цифрового поколения», актуально будет использование новых цифровых методов.

В ходе проведенной работы была проведена разработка онлайн-лаборатории для дистанционного изучения инженерных дисциплин. Для реализации проекта были использованы: микрокомпьютер Raspberry Pi с операционной системой Raspbian для создания сервера, микроконтроллеры Arduino моделей UNO и Nano в паре с Raspberry Pi для реализации стендов [1, 2].

Для обеспечения дистанционного доступа был написан веб-сервер на базе Apache 2 и базы данных MySQL. Обработка всех действий пользователя осуществляется с помощью языка текстовой разметки HTML и программ на скриптовом языке PHP. Доступ к стенду осуществляется после генерации и отправки одноразового пароля на указанный пользователем email адрес. Отправка email письма осуществляется с помощью ssmtp, который является smtp-клиентом, и используется для связи с серверами gmail. После проверки корректности пароля, пользователю будет отведен определенный промежуток времени для работы пользователя со стендом.

Разработанные стенды подключаются к общей локальной сети. Передача данных от веб-сервера к стендам осуществляется с помощью специально разработанной библиотеки на языке программирования Python. Библиотека устанавливает соединение внутри локальной сети и обеспечивает передачу массивов данных от сервера к микрокомпьютерам установленных на стендах. Стенды в свою очередь передают видеопоток с специально установленных веб-камер. Передача видеопотока на сервер осуществляется с помощью программы Motion [3].

После успешной передачи данных на микрокомпьютер стенда, используется программа на языке Python с подключенной библиотекой Serial, для передачи данных на микроконтроллер Arduino UNO или Nano.

В настоящий момент разработан сервер и собрано два стенда: стенд-манипулятор «Железная рука» и стенд «Лазерная лаборатория».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аппаратная платформа Arduino [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arduino.ru/>. – 20.07.19.
2. Front Page – Raspbian [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.raspbian.org/>. – 24.04.19.
3. Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.raspberrypi.org/>. – 10.05.19.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ТОРОИДАЛЬНЫХ ГАРМОНИК  
 ДЛЯ АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА  
 В ТОКАМАКЕ КТМ

А.Б. Тогузбаева, А.М. Ли

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [abt7@tpu.ru](mailto:abt7@tpu.ru)

Равновесие плазмы в токамаке описывается уравнением Грэда-Шафранова [1]:

$$r \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \begin{cases} -\mu_0 r J, & (r, z) \in S, \\ 0, & (r, z) \notin S, \end{cases}$$

$$J = r p'(\psi) + \frac{1}{\mu_0 r} F(\psi) F'(\psi),$$

где  $J$  – плотность тока плазмы,  $p(\psi)$  и  $F(\psi)$  – функции распределения давления плазмы и полоидального тока плазмы на магнитных поверхностях,  $\psi$  – полоидальный магнитный поток.

Уравнение Грэда-Шафранова в вакууме, в тороидальной системе координат  $(\eta, \zeta, \varphi)$  имеет аналитическое решение, называемое тороидальными гармониками [2]:

$$\Psi_{ext,n}^c(\eta, \zeta) = \frac{r_0 \cdot \sinh \zeta}{\sqrt{\cosh \zeta - \cos \eta}} \cdot Q_{n-\frac{1}{2}}^1(\cosh \zeta) \cdot \cos(n\eta),$$

$$\Psi_{ext,n}^s(\eta, \zeta) = \frac{r_0 \cdot \sinh \zeta}{\sqrt{\cosh \zeta - \cos \eta}} \cdot Q_{n-\frac{1}{2}}^1(\cosh \zeta) \cdot \sin(n\eta).$$

Распределение магнитного потока на границе плазмы  $\psi$  можно описать в виде линейной комбинации тороидальных гармоник:

$$\psi = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n^c \psi_{int,n}^c + a_n^s \psi_{int,n}^s + b_n^c \psi_{ext,n}^c + b_n^s \psi_{ext,n}^s)$$

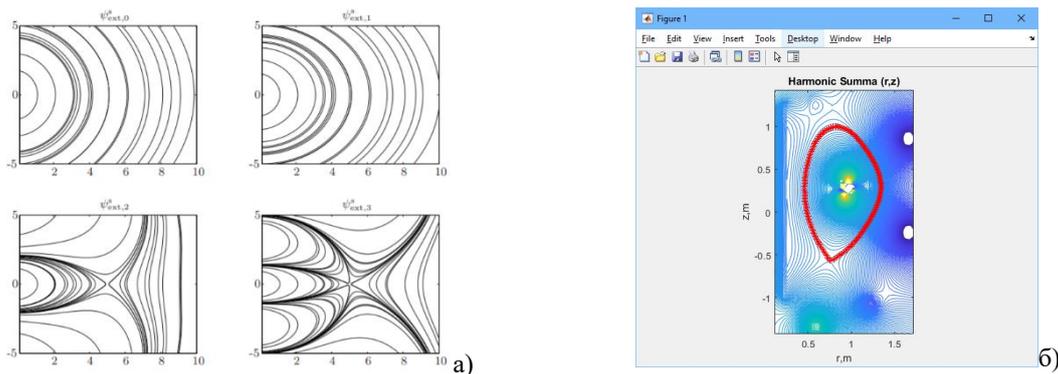


Рис. 1. Линии уровня некоторых тороидальных гармоник а) и результат восстановления потока б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеева Т.Е., Тимофеев В.Б. Уравнение Грэда-Шафранова в электродинамике магнитного ротора // Наука и образование. – 2005. – Т.1. – № 1. – С. 50–51.
2. Ariola M., Pironti A. Magnetic Control of Tokamak Plasmas. – Springer, 2008. – 159 с.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ПОЛОЖЕНИЕМ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Р.Б. Шишкин, В.М. Павлов

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [rbs2@tpu.ru](mailto:rbs2@tpu.ru)

В настоящее время управляемый термоядерный синтез является одним из наиболее перспективных способов получения энергии. Среди большого числа различных видов экспериментальных установок, предназначенных для его осуществления, самыми распространёнными являются установки типа ТОКАМАК. Создание эффективного и экономически выгодного термоядерного реактора сопряжено с необходимостью решения ряда инженерных и исследовательских задач. Это обусловлено тем, что физически высокотемпературная плазма является крайне нестабильным объектом, требующим тщательного всестороннего описания.

Система управления плазмой ТОКАМАКа является совокупностью большого числа подсистем, представляющих собой контуры управления плазменными процессами (форма, ток, положение плазмы и т.д.). Это позволяет рассматривать конкретный контур управления, как определяющий значение одного или группы параметров плазмы. В ТОКАМАКе КТМ плазма имеет D-образную форму, вытянутую по вертикали. Стабилизация положения плазмы вертикали является сложной задачей, требующей решения для обеспечения равновесия плазмы и недопущения её соприкосновения со стенками камеры [1].

Работы по созданию термоядерных реакторов ведутся уже более полувека. За это время человечество достигло больших успехов в области вычислительной техники. Поэтому на данный момент существует возможность использования компьютерного моделирования с неприменяемыми ранее методами управления объектам и обработки информации таких, как нейронные сети и нечеткая логика. Существуют примеры использования нечеткой логики при управлении положением плазмы в камере ТОКАМАК, в которых качество управления не уступало классическому ПИД-закону [2, 3].

В результате работы был разработан нечеткий регулятор, который был протестирован на существующей модели системы управления вертикальным положением плазмы, реализованной в среде графического моделирования SIMULINK.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов В.М., Обходский А.В., Голобоков Ю.Н., Овчинников А.В. Система управления плазмой. – М.: Издательство Томского политехнического университета, 2008. – 9 с.
2. Морелли Д.Э., Хироме А., Вуд Х.С. Плазменный регулятор положения на основе нечеткой логики для STOR-M // TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY. – 2005. – Т.13. – № 5. – С. 65–83.
3. Суратия П., Патель Д., Раджпал Р., Котия С., Говиндараджан Д. Нечеткий регулятор на базе ПЛИС для управления положением плазмы в токамаке ADITYA // Fusion Engineering and Design. – 2012. – № 87. – С. 1866–1871.

CIRCUIT METHOD FOR INCREASING THE HIGH-SPEED OF OPERATIONAL AMPLIFIERS  
AND ANALOGUE SENSOR INTERFACES BASED  
ON RADIATION-HARDENED SOI TECHNOLOGIES

A.V. Bugakova

Don State Technical University,

Russia, Rostov-on-Don, qu. Gagarina, 1, 344000

E-mail: [annabugakova.1992@mail.ru](mailto:annabugakova.1992@mail.ru)

The CMOS microcircuits with a silicon on insulator (SOI) structure [1] are a promising electronic component base for aerospace engineering and nuclear power control systems. They have increased radiation resistance, in addition to a high degree of integration and low current consumption.

In this paper, we consider a non-traditional [2, 3] circuit method for increasing the maximum slew rate of the output voltage (SR) in the analog interfaces of sensors based on the SOI of operational amplifiers (Op-Amps), based on the introduction of the nonlinear differentiating correction circuits (DCC) – capacitance  $C_{c2}$  into the well-known classical structure of the SOI Op-Amp [4] (Fig. 1).

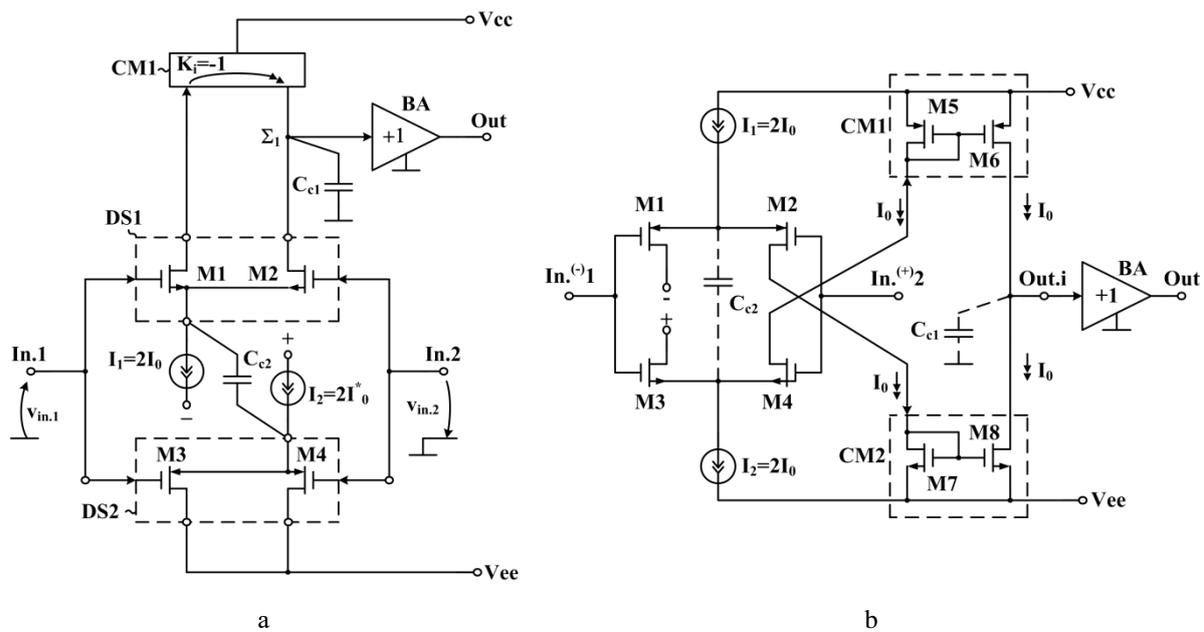


Fig. 1. SOI Op-Amp Schemes with a Nonlinear Differentiating Circuit

This simple circuit technique [2, 3] allows you to increase SR by 5–20 times, which was proved by mathematical analysis and computer simulation of transient Op-Amp Fig. 1 processes in the large signal mode. When this happens, the efficiency of switching on  $C_{c2}$  increases when choosing the static currents of the Op-Amp input transistors operate in the range of tens microamps (Fig. 2).

The introduction of DCC is promising not only in the input differential stage circuits [2, 3], but also in the intermediate stages of the Op-Amp (Patent RU 2684500) and in the buffer amplifiers of the Op-Amp (Patents RU 2668985, RU 2673003). In this case, the DCC practically does not affect the low-signal amplitude-frequency response (AFR) of the Op-Amp on a small signal. The AFR is traditionally formed by the integrating correction capacitance  $C_{c2}$  in the high-impedance node of the Op-Amp.

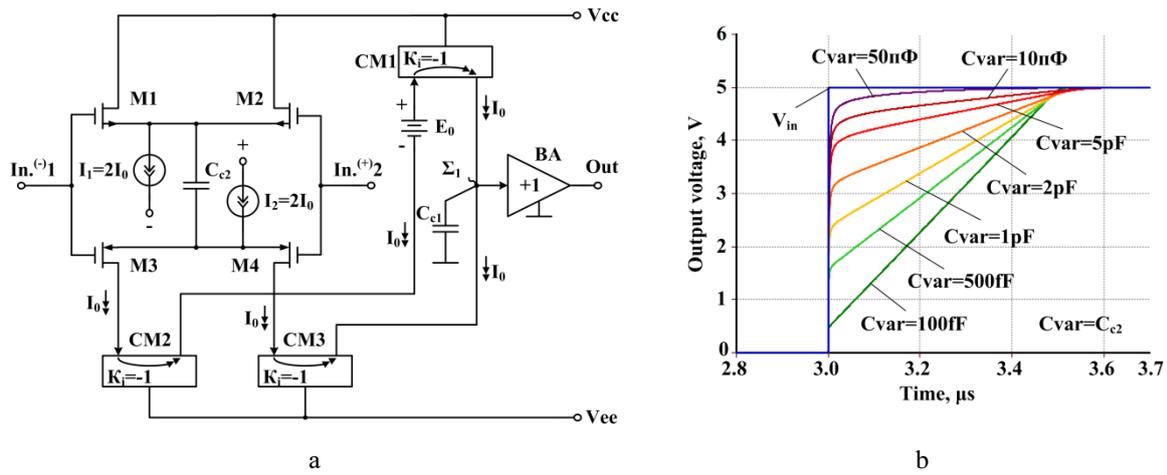


Fig. 2. Simulation results of high-speed CMOS Op-Amp

The proposed circuit solution is applicable to other technological processes.

The study has been carried out at the expense of the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 16-19-00122-P).

#### REFERENCES

1. Sambursky L.M. Development and research of circuit SPICE-models of elements of radiation-hardened and photosensitive CMOS LSI with the structure of the SOI / SOS: Abstract. thesis. ... Candidate of Engineering Sciences. – Moscow, 2013. – 30 p. (in Russian)
2. Pat. RU 2652504. IPC 8 H03F 3/45. High-speed differential operational amplifier / N.N. Prokopenko, A.V. Bugakova, P.S. Budyakov. Filed: Sept. 20, 2017; Publ.: Apr. 26, 2018, Bull. No. 12. – 19 p. (in Russian)
3. Pat. RU 2659476. IPC8 H03F 3/45. High-speed differential operational amplifier / N.N. Prokopenko, O.V. Dvornikov, A.V. Bugakova. Filed: Sept.12, 2017; Publ.: Jul. 2, 2018, Bull. No. 19. – 23 p. (in Russian)
4. Cherny A.I., Bogatyrev V.N., Povarnitsyna Z.M., Petrosyants K.O., Kharitonov I.A., Karelin A.A. Design and development of Op-Amp based on CMOS SOI technology // Problems of development of promising microelectronic systems – 2005. Collection of scientific papers / under the general. ed. A.L. Stempkovsky. – Moscow: IPPM RAS, 2005. – pp. 290–297. (in Russian)

## THE CURRENT THRESHOLD LOGIC ELEMENT OF DIRECT CYCLIC SHIFT

N.V. Butyrlagin, A.V. Bugakova, N.I. Chernov, V.Ya. Yugai

Don State Technical University,

Russia, Rostov-on-Don, sq. Gagarin 1, 344000

E-mail: [annabugakova.1992@mail.ru](mailto:annabugakova.1992@mail.ru)

It was shown in [1, 2] that Boolean algebra is a special case of a more general linear algebra (LA). The practical implementation of digital devices based on LA principles requires the creation of a special element base with a multi-valued internal representation of signals, where the current quantum is the equivalent of a standard logical signal.

In Fig. 1 shows the proposed [3] scheme of the current threshold logic element that provides a direct cyclic shift of the ternary input logical variable ( $x$ ). A possible area of its application is multivalued current memory elements, as well as neural networks. In some cases, this makes it possible to increase the speed of specialized information conversion devices and create a multi-valued elemental base for non-traditional construction of various controllers and automatic control systems.

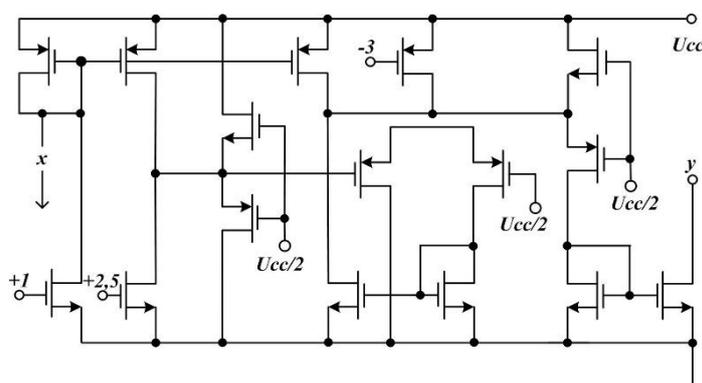


Fig. 1. CMOS current threshold logic element direct cyclic shift

The operation of the circuit Fig. 1 can be described by the following equation [3]:

$$y = x + 1 - 3 \cdot ((x + 1) > 2.5),$$

where  $x$  is the quantum of the input current.

The results of computer simulation [3] confirm the operability of the circuit of Fig. 1.

The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-37-00061.

### REFERENCES

1. Malyugin V.D. Realization of Boolean functions by arithmetic polynomials // Automation and Telemechanics. – 1982. – No. 4. – pp. 84–93. (in Russian)
2. Chernov N.I. Fundamentals of the theory of the logical synthesis of digital structures over polemic numbers. – Taganrog: TRTU, 2001. – 147 p. (in Russian)
3. Pat. RU 2693639. H03K 19/0175. Current threshold logic element of direct cyclic shift / N.V. Butyrlagin, N.I. Chernov, N.N. Prokopenko, V.Ya. Yugai. Filed: Dec. 20, 2018; Publ.: July 03, 2019. – 15 p. (in Russian)

THE PERSPECTIVE ARCHITECTURES OF ACTIVE LOW FREQUENCY RC FILTERS FOR LIMITING THE SIGNAL SPECTRUM AT THE DIFFERENTIAL INPUT OF ANALOG-DIGITAL SENSOR CONVERTERS

N.V. Butyrlagin, D.Yu. Denisenko, E.A. Zhebrun, D.V. Kleimenkin

Don State Technical University,

Russia, Rostov-on-Don, sq. Gagarin 1, 344000

E-mail: [d.u.denisenko@gmail.com](mailto:d.u.denisenko@gmail.com)

A significant influence on the dynamic performance of many analog-to-digital systems containing analog-to-digital converters of sensor signals (ADC) is exerted by active low-pass RC-filters (LPF), which must necessarily be included as spectrum limiters at the ADC input [1]. While for the advanced class ADC with differential input necessary antialiasing RC-filters with differential outputs, allowing independent setting of their main parameters [2].

In Fig. 1 shows the two proposed low-pass filters [2], which provide (when implemented on AD8132 amplifiers) an increase in the guaranteed attenuation of the amplitude-frequency characteristics (AFC) outside the working zones to the level of theoretical values of this parameter.

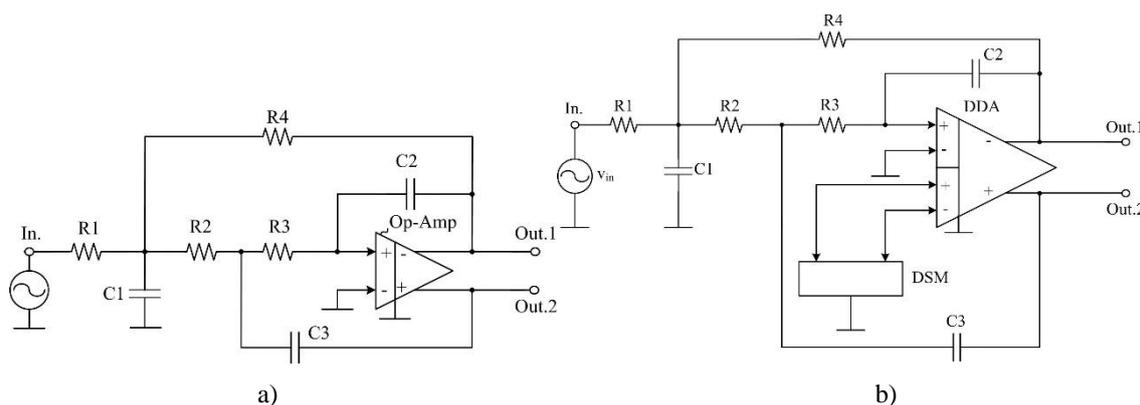


Fig. 1. The low-pass filter circuits with non-differential inputs based on Op-Amp (a) and DDA (b)

The basic equations of the schemes of Fig. 1 and the results of computer modeling of their prototypes, presented in [2], show a high coincidence of the frequency response with theoretical calculations.

The research is carried out at the expense of the Grant of the Russian Science Foundation (project No. 18-79-10109).

REFERENCES

1. Samoilov L.K., Denisenko D.Yu., Prokopenko N.N. Dynamic errors of sensor signal input process in analog-digital control and control systems // Radio engineering. – 2019. – No. 3. – pp. 63–69. DOI 10.18127/j00338486-201903-10. (in Russian)
2. Patent application RU 2019105119/08. The active low pass RC-filter of the third order on the basis of the operational amplifier with the paraphrase output // D.Yu. Denisenko, A.V. Bugakova, G.A. Svishev, N.N. Prokopenko. Filed: Feb. 25, 2019. (in Russian)

## DECISION SUPPORT MODULE FOR HEMOSTASIS FUNCTIONAL STATE ESTIMATION

E.A. Chursina<sup>1</sup>, A.V. Kudinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National research Tomsk polytechnic university, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30, 634050

<sup>2</sup>LLC «Rubius Group», Russia, Tomsk, Nakhimova St., 13/1, 634045

E-mail: [eac@tpu.ru](mailto:eac@tpu.ru)

Hemostasis is the physiological process in a human body that stops bleeding and maintains normal blood flow in the circulation. Disorders of hemostasis can be dangerous for patient life. Therefore, It's important to diagnose them fast and precisely.

Low-frequency piezoelectric thromboelastography is a test that provides information about all components of hemostasis. Thromboelastograph is a medical device that can execute this test.

Thromboelastograph presents the blood test result as graphic information with a set of additional numeric parameters which can be hard to interpret in detail by.

The existing decision support solution for thromboelastograph uses empirical methods to estimate the general state of hemostasis. This may not be enough for high-quality diagnosis. This paper describes the development of the decision support module that uses machine learning methods to distinguish eleven functional states of hemostasis.

A cascade classification algorithm based on the diagnose method expert uses to estimate the functional state of hemostasis was developed (Figure 1). Testing on real blood tests dataset showed high metrics values. The cross-validation accuracy of the cascade classification algorithm is 92.66 %. The classification algorithm was implemented in the decision support module that became a part of thromboelastograph software and is used to help doctors.

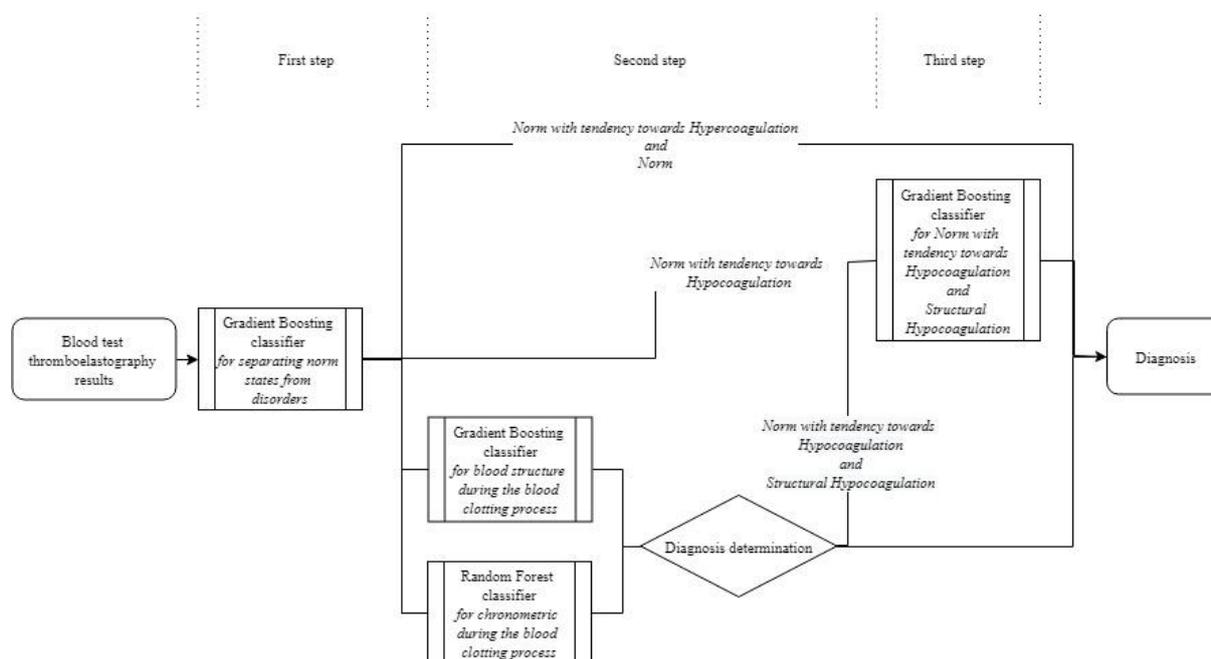


Fig. 1. The scheme of the cascade classifier developed for the decision support module

### REFERENCE

1. Tyutrin I.I. Piezothromboelastography low-frequency integral algorithms for the diagnosis and correction of hemostasiological disorders. – Tomsk State University Publishing House, 2016. – 170 p. (in Russian)
2. Andrew J.G. Current Understanding of Hemostasis // Toxicol Pathol. – 2011. – Vol. 39(1). – pp. 273–280.



CIRCUIT METHOD OF IMPROVING DYNAMIC PARAMETERS OF CRYOGENIC BUFFER AMPLIFIER ON COMPLETE FIELD TRANSISTORS WITH CONTROLLING P-N TRANSITION

E.P. Nikitina, A.V. Bugakova  
 Don State Technical University, Russia,  
 Rostov-on-Don, sq. Gagarina, 1, 344000  
 E-mail: [nikitinakate1511@yandex.ru](mailto:nikitinakate1511@yandex.ru)

A significant drawback of classic output stages (OS) in modern analog microcircuits on complementary field-effect transistors (CJFET) [1] is that they have low speed in the mode of a large pulse signal with a capacitive load. This is the result of the presence of small parasitic capacitors ( $C_1 = 1-2$  pF) in the gate circuit of the output CJFET and non-linear modes of their operation [2].

A feature of the proposed OS circuit (Fig. 1a) [3] is that in it a small through static current  $I_{thr}$  flowing through the output CJFETs is stabilized by a rational choice of the resistance  $R1$ , when at low (microampere) source currents  $M1$  the gate voltage source  $M1$  reaches maximum values. This allows you to set the minimum values of  $I_{thr}$  in a wide temperature range and to exclude the dead zone on the amplitude characteristic of the VC.

The output stage of Fig. 1a has a linear amplitude characteristic in a wide range of temperatures and load resistances ( $R_{load} = 2 \div 100$  k $\Omega$ ) with a small static current consumption.

In the circuit Fig. 1a, the process of recharging the parasitic capacitor  $C1$  is boosted with large negative changes in the input voltage. As a result, the transient process establishment time for a given zone of dynamic error (10 %) is reduced. In this case, the slew rate of the output voltage of the OS for the negative edge increases from 30 V/ $\mu$ s to 150  $\div$  180 V/ $\mu$ s.

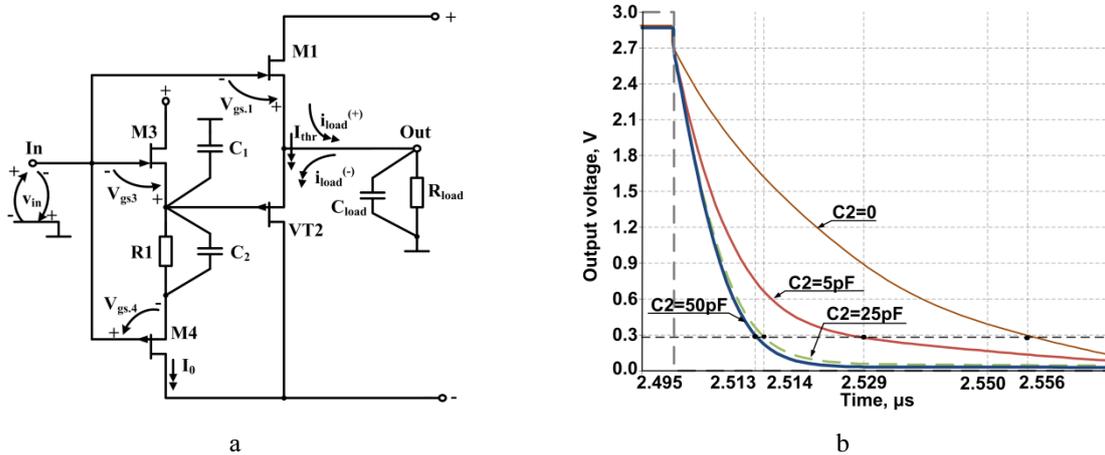


Fig. 1. The circuit CJFET (a) and its transient process (b)

The study has been carried out at the expense of the grant from the Russian Science Foundation (Project No. 16-19-00122-P).

REFERENCES

1. Pat. US 7764123, IPC H 03 F 3/18. Rail-to-rail buffer amplifier / Kimura; Hiroyuki // Appl. No.: 12/325,273; Filed: Dec. 1, 2008; Date of Patent: Jul. 27, 2010. – 16 p.

2. Prokopenko N.N. Nonlinear active correction in precision analog microcircuits. – Rostov-on-Don: Publishing House of the North Caucasian Scientific Center high school, 2000. – 222 p. (in Russian)
3. Patent application RU 2019126295/08. IPC H03F 3/26, H03F 3/34, H03F 3/45. The output stage of analog microcircuits on complementary field-effect transistors with a p-n junction control // N.N. Prokopenko, O.V. Dvornikov, E.P. Nikitina. Filed: Aug. 21, 2019. (in Russian)

Научное издание

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ  
В НАУКЕ, ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ**

**ФТПНПМ-2019**

Сборник научных трудов  
Международной научно-практической конференции  
студентов, аспирантов и молодых ученых

Компьютерная верстка *Е.А. Кулинич, Л.С. Митрофанова*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ  
Размещено на корпоративном портале ТПУ**

---



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ